OPTIBIOGAZ

Vers une gestion optimisée et intégrée de la production de biogaz à la ferme

Juin 2012

TABLES DES MATIÈRES

Tables des matières 3

Introduction 4

Action 1 : Suivi de paramètres clés lors de campagnes de suralimentation de digesteurs à l'échelle du laboratoire 10

Action 1 : Dynamique des populations microbiennes au sein de méthaniseurs pilotes en condition d'acidose 22

Action 1 : Suivi du processus de biométhanisation par nez électronique 27

Action 2 : Valorisation des sous-produits, chaleur et digestats 35

Action 2 : Installation Biogas Biekerich soc. coop. 38

Action 2 : Installation BioRecycle 100 % BIO (Francis Claudepierre) 40

Action 2 : Installation Kessler SCRL (Jean et Nicolas Kessler) 42

Action 2 : Installation Biogas Rohlingerhof (Matthias Kohl) 44

Action 3 : Impacts environnementaux des unités de biométhanisation 46

Action 4 : Réalisation d'un état des lieux / analyse des flux de matière et de l'efficacité globale d'unités de méthanisation modèles dans la Grande Région 52

Action 5 : Création d'un réseau d'expertises et de diffusion dans le domaine de la biométhanisation au niveau de la Grande Région 64

INTRODUCTION

Asbl «Au Pays de l'Attert»

Sylvie HUBERT – Benoît TOUSSAINT – Joachim ANSIAS – Nathalie DRUART – Marcel NICKERS

1. Historique du projet

Le partenariat OPTIBIOGAZ est la suite logique de différentes collaborations européennes sur le thème de la biométhanisation. Au fil des projets, les liens se sont renforcés et de nouveaux partenaires ont rejoint le groupe.

ENERGATTERT :
optimisation de la valorisation énergétique de la biomasse agricole dans la philosophie d'un Parc Naturel. 2002-2005

Ce dossier répondait à un appel à projet du 5e programme cadre «Energie, Environnement et Développement Durable» lancé par la Commission Européenne.

Coordonné par l'asbl «**Au Pays de l'Attert**», il réunissait la **ferme du Faascht** où devait être construite l'installation, un bureau d'étude luxembourgeois **LEE** pour la conception, un motoriste allemand **Schnell**, l'institut allemand **IZES** pour des recherches sur l'amélioration des rendements du moteur et les meilleures possibilités d'utiliser l'énergie calorifique, **Agra-Ost**, association wallonne spécialisée dans la valorisation des effluents comme engrais de ferme, pour l'étude des meilleurs mélanges à introduire et la meilleure valorisation agronomique du lisier digéré, **Laborelec** pour l'analyse économique de l'installation et la **FUL** pour le volet pédagogique.

Ce projet a permis la construction à Faascht de deux digesteurs de 750 m^3 et d'une cuve de stockage final du digestat de 2500 m^3 ainsi que l'installation de deux moteurs duals fuels d'une puissance totale de 160 kW. Il prévoyait

également le suivi et l'amélioration de cette installation de biométhanisation. En fonction de l'évolution du marché et des aides (certificats verts), il est vite devenu incontournable de modifier l'installation par le remplacement progressif d'un moteur dual fuel par un moteur 100 % biogaz afin d'atteindre une taille économiquement viable.

AGRICOMETHANE : développement du procédé de biométhanisation agricole dans les trois régions frontalières. 2005-2007

Introduit dans le cadre du programme européen Interreg IIIA Wallonie – Lorraine – Luxembourg qui visait à renforcer la coopération transfrontalière par la réalisation de projets locaux et régionaux entre opérateurs issus des trois régions, le projet AGRICOMETHANE a permis de promouvoir le procédé de biométhanisation agricole sur ce territoire transfrontalier.

Le partenariat regroupait autour de l'asbl «**Au Pays de l'Attert**», deux installations de biométhanisation, l'une à **Faascht** et l'autre à **Mignéville** en Lorraine, **Laborelec**, la **commune de Beckerich**, le **groupe de développement du biogaz en Lorraine** ainsi que **Trame Grand Est**.

Trois actions ont été réalisées en parallèle sur le territoire concerné :

Le procédé de biométhanisation était relativement récent et très peu répandu en 2005, tant au niveau des agriculteurs, des pouvoirs publics que du grand public. Cette situation constituait donc un premier obstacle au développement de la biométhanisation. Dans ce contexte, il était intéressant de réaliser un important effort de **promotion** et de **sensibilisation** de tous les acteurs du territoire. Pour cela, des brochures sur les installations de biométhanisation agricole des trois régions et un site Internet (www.agricomethane.eu) ont été réalisés en commun avec les différents partenaires.

Les propriétaires des installations de biométhanisation rencontraient des problèmes techniques et administratifs. Il en résultait le développement d'outils différents de par la législation et les aides financières propres à leur pays. **Une mise en commun des informations et un échange entre agriculteurs** ont permis de capitaliser diverses connaissances. C'est ainsi que chacun a pu bénéficier des expériences du groupe et résoudre certains problèmes qui avaient trouvé solution sur une autre installation.

L'installation de biométhanisation de Faascht a été **optimisée** afin de sécuriser l'installation, de faciliter la gestion de celle-ci et de valoriser la chaleur produite par les modules de cogénération.

Enfin, des **analyses méthanogènes** sur de nouvelles matières premières ont été réalisées (fanes de concombres, résidus de laiterie,…) afin de connaître le potentiel de ces matières à produire du biogaz en fermentation anaérobie.

Ce projet a également pu compter sur l'apport scientifique d'un nouveau partenaire, le Centre de Recherche Public - Gabriel Lippmann.

OPTIBIOGAZ :
Vers une gestion optimisée et intégrée de la production de biogaz à la ferme. 2008-2012

Le projet européen «OPTIBIOGAZ» a été introduit dans le cadre du programme opérationnel européen de coopération transfrontalière Interreg IVA «Grande Région». **La finalité du projet est d'obtenir une gestion optimisée et intégrée de la production de biogaz à la ferme.** Sous la supervision technique et administrative de l'Asbl «Au Pays de l'Attert», le projet rassemble autour de la biométhanisation cinq partenaires scientifiques belges, luxembourgeois, allemands et français ainsi que quatre installations agricoles pilotes, une dans chaque pays.

OPTIBIOGAZ a débuté en juin 2008 et se termine fin juin 2012. Le travail de chacun a porté sur plusieurs domaines d'action :

- **L'action 1** consiste en la réalisation d'un outil d'aide à la décision capable de prévenir les problèmes au cours du processus de digestion anaérobie et optimisant la production d'énergie. Il a été proposé par le biais de ce projet collaboratif interrégional de développer un système de suivi rapproché et précis du processus biologique de la biométhanisation d'abord à l'échelle d'un pilote pour des substrats agricoles (action recherche en laboratoire) puis d'assurer sa transposition à l'échelle réelle sur des unités en fonctionnement (action développement et transfert de technologie).

- **L'action 2** ambitionne la valorisation des deux principaux sous-produits de la biométhanisation (chaleur et digestats). Ces deux sous-produits de la biométhanisation sont actuellement sous valorisés. Il s'agit de développer un processus de réduction de la teneur en eau des digestats par évaporation sous vide en utilisant la chaleur résiduelle de la co-génération. Le but est de réduire les volumes à transporter et à épandre via le séchage du digestat (réduction des dépenses énergétiques de la ferme).

- **L'action 3** a pour objectif l'étude de l'impact environnemental de la biométhanisation via un contrôle des émissions gazeuses par analyses physico-chimiques et par olfactométrie et comparé aux pratiques usuelles d'épandage de fumier et lisier. Le but est de démontrer, chiffres à l'appui, que la biométhanisation est une option très favorable pour réduire les nuisances olfactives engendrées par les activités agricoles.
- **L'action 4** comporte d'une part, la comparaison des climats économiques et législatifs propres aux quatre pays, cet état des lieux devant permettre d'évaluer à quel(s) niveau(x) se situe la nécessité d'intervention. Elle comporte d'autre part, l'analyse des flux de matière par le biais de chaînes de production choisies et représentatives des unités modèles de la Grande Région.
- **L'action 5** porte sur la mise en place d'un réseau transfrontalier d'expertises pratiques et scientifiques en biométhanisation afin de pérenniser les résultats obtenus et de maximiser les échanges de compétence.

2. Partenariat

2.1. Asbl «Au Pays de l'Attert» (BE), porteur de projet

Créée en 1993, l'asbl «Au Pays de l'Attert» a pour objet toute activité se rapportant directement ou indirectement au développement de la commune d'Attert et plus globalement de la vallée de l'Attert. Ses principaux domaines d'action sont l'agriculture, la culture, le tourisme, la formation, la conservation de la nature, la sensibilisation à l'environnement et les énergies renouvelables. L'asbl est active dans la gestion du Parc Naturel de la Vallée de l'Attert et est responsable depuis 19 ans de l'animation de l'association des communes de la Vallée de l'Attert belgo-luxembourgeoise reprenant les communes d'Attert, Beckerich, Ell, Préizerdaul et Redange.

Les projets transfrontaliers pouvant amener de nombreuses solutions et des échanges d'expertises intéressants, l'association multiplie la coordination de ce type de projet. Rappelons bien sûr EnergAttert et Agricométhane mais elle a également coordonné d'autres projets Interreg : «Pappalapapp : apprendre et parler la langue du voisin» en collaboration avec quatre communes, deux belges et deux luxembourgeoises et «PôlEnergie» qui a pour objectif de créer un pôle de référence en utilisation rationnelle de l'énergie et en énergies renouvelables dans la zone transfrontalière de la Vallée de l'Attert belgo-luxembourgeoise.

2.2. Partenaires

Centre de Recherche Public - Gabriel Lippmann (LU)

Le Centre de Recherche Public - Gabriel Lippmann est un établissement public luxembourgeois ayant pour missions la recherche scientifique appliquée et le développement technologique, ainsi que le transfert de technologie et la formation permanente de haut niveau selon quatre axes majeurs pris en charge par quatre départements : Sciences et analyse des matériaux (SAM), Environnement et agro-biotechnologie (EVA), Informatique systèmes et communication (ISC), et Recherche en équipements automobiles (REA).

Depuis 2005, l'équipe impliquée dans le domaine de la biométhanisation a fourni un appui scientifique aux partenaires du projet AGRICOMETHANE et du projet OPTIBIOGAZ. Le Centre de Recherche Public - Gabriel Lippmann a aussi participé au projet ENERBIOM dans le cadre du programme opérationnel européen de coopération transfrontalière Interreg IVA «Grande Région». Il développe d'autre part des outils dédiés à l'aide à la décision dans le domaine de la biométhanisation (projet BIONIR, CAPTIVOCS, GASPOP).

IZES - Institut für ZukunftsEnergieSysteme (DE)

L'IZES (Institut für ZukunftsEnergieSysteme), Institut pour systèmes énergétiques du futur, est rattaché à l'Ecole supérieure de technologie et d'économie de la Sarre (Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes, HTW). Portant sur l'approvisionnement et les domaines d'application énergétiques de l'avenir, ses activités en couvrent les aspects tant techniques qu'économiques. Ainsi, le domaine d'action d'IZES est la recherche appliquée

et le développement dans le domaine des énergies renouvelables, des économies d'énergie, des marchés de l'énergie et de la gestion des flux de matières.

IZES a apporté sa collaboration sur différents projets européens de la région frontalière Luxembourg, Belgique, France (Programme «Innovation», SEDIS, PROGRASS, ENERGATTERT, SOLLET, ENERBIOM). Il entretient une coopération étroite avec l'université de Metz (ISFATES / DFHI) et du Luxembourg (IST). Enfin IZES a été un des partenaires du Projet INTERREG III-A De-Lor RUBIN (Stratégie régionale d'utilisation durable de la biomasse) et du Projet TRIG (Tri-generation, CHP and cooling, with integrated flue gas-condensation based on solid biomass fuels) - SIXTH FRAMEWORK PROGRAMME.

Université de Liège – Arlon Campus Environnement (BE)

Créé en 1971, le campus d'Arlon est le premier, et le seul campus universitaire, tourné exclusivement vers l'environnement, que ce soit pour la recherche ou pour l'enseignement. Depuis 2004, il fait partie de l'Université de Liège et plus spécifiquement de la Faculté des Sciences et de son Département en Sciences et Gestion de l'Environnement. Non seulement riche d'une expérience de 40 ans, en recherche, enseignement et service à la communauté, sa force réside autant dans ses compétences à dominante sciences exactes et appliquées qu'à celles à dominante sciences humaines. Concrètement, le projet a été mené dans l'unité «Surveillance de l'Environnement» dont l'objectif essentiel est le développement de méthodologies de mesure pour la surveillance des atmosphères polluées. L'équipe pluridisciplinaire exploite un savoir-faire et un laboratoire spécifiquement dédiés à cet objectif original.

UL-ENSAIA, Université de Lorraine - Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires (FR)

UL-ENSAIA fait partie de l'Université de Lorraine depuis le 1er janvier 2012.

L'École Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires de Nancy (ENSAIA) forme chaque année 160 ingénieurs. La recherche s'organise autour de 6 laboratoires couvrant les thématiques suivantes: (I) Agronomie et environnement ; (II) Animal et fonctionnalités des produits animaux ; (III) Sols et environnements ; (IV) Génie des procédés biotechnologiques et alimentaires ; (V) Science et Génie alimentaire ; (VI) Lipides et Neurodégénérescence.

En 2008, l'ENSAIA a mis en place un programme de réflexions sur la ferme durable de demain où la thématique Energie et Territoires prend toute son importance. La ferme de l'ENSAIA développe une plate-forme de compétence en méthanisation avec une unité de méthanisation de 36 kW, un pilote de 2 m^3 et un laboratoire qui sera opérationnel au dernier trimestre 2012.

Laborelec (BE)

Laborelec est le centre européen d'Etudes et Recherches du Groupe Electrabel. C'est un centre de compétence et d'expertise dans la technologie liée à l'énergie électrique. Il a été établi en 1962 dans le but de soutenir les compagnies belges d'électricité avec de la recherche, du développement et des services spécialisés. Les compétences de Laborelec couvrent l'ensemble de la filière électrique commerciale : production, transmission, distribution et consommation finale. Il offre ainsi services et recherches spécialisés dans chacun de ces domaines à des entreprises dans le monde entier.

Ferme du Faascht, Kessler SCRL (BE)

Propriété des frères Kessler, cette ferme est située sur le territoire du Parc naturel de la vallée de l'Attert. Séduits par les nombreuses unités de biométhanisation installées au Grand-Duché de Luxembourg et en Allemagne, les frères Kessler ont manifesté leur souhait de diversifier leur exploitation en devenant également «cultivateurs d'énergie renouvelable». Aujourd'hui, c'est une puissance totale de 750 kW qui est installée à Faascht. La particularité de l'installation est de valoriser la chaleur des moteurs de cogénération via le séchage du digestat, ce qui lui permet de mettre des produits fertilisants sur le marché.

Biorecycle SARL (FR)

En 2000, Francis Claudepierre, son propriétaire, décide la création de la première installation française de biométhanisation au sein d'une exploitation agricole. Elle est située à Migneville en Lorraine. L'installation d'une puissance de 21 kW démarre en 2003. En 2007, la SARL «BioRecycle» est créée. L'installation d'une puissance totale de 280 kW est opérationnelle en décembre 2009. Un réseau de chaleur permet la valorisation de la chaleur. L'exploitation valorise également une partie de la chaleur par une installation de séchage de foin, ce qui en fait une originalité particulière.

Biogas Biekerich

Biogas Biekerich (LU)

La coopérative «Biogas Biekerich» réunit 18 agriculteurs et a été créée en 2003. Comme le nom de la coopérative l'indique, cette installation se trouve sur le territoire de la commune de Beckerich au Grand-Duché de Luxembourg. La particularité de cette installation est d'une part que chaque agriculteur faisant partie de la coopérative vient faire traiter ses effluents d'élevage au sein de l'installation et d'autre part le réseau de chaleur au départ de l'installation. L'installation de biométhanisation de 600 kW ainsi que le raccordement des premiers habitants au réseau de chaleur communal sont opérationnels depuis 2004.

Biogas Rohlingerhof

Biogas Rohlingerhof (DE)

Rohlingerhof Biogas est une installation de biométhanisation agricole se trouvant à Palzem en Rhénanie-Palatinat en Allemagne. Les terres du «Rohlingerhof» sont depuis longtemps en possession de la famille Kohl. Les propriétaires gèrent actuellement environ 170 hectares. En 2001, Matthias Kohl, propriétaire de la ferme, a décidé de construire une installation de production de biogaz. Elle a été la première construite en Rhénanie-Palatinat. Aujourd'hui la puissance installée est de 250 kW. Sa particularité est de valoriser la chaleur produite par le séchage du bois.

BIOMÉTHANISATION : PRINCIPE

Quand l'agriculture contribue au développement durable par la production d'énergie verte.

La biométhanisation ou digestion anaérobie (sans oxygène) est un procédé de décomposition de matière organique à 38°C par des familles de bactéries. Ce phénomène de digestion s'accompagne de production de biogaz, mélange gazeux combustible.

Le biogaz produit au cours de ce processus biologique est constitué majoritairement de méthane (+/- 60 %) et de CO_2 neutre (+/- 40 %) puisque provenant directement ou indirectement de l'activité photosynthétique des plantes. Ce biogaz, source renouvelable d'énergie, peut être converti en électricité et en chaleur au moyen d'une cellule de cogénération. D'autre part, le résidu du processus, la matière organique indigestible encore appelée digestat, est une source renouvelable de fertilisants organiques (NPK, Ca, Mg, et micro éléments) de haute valeur agronomique reflétant la composition idéale pour les plantes.

La biométhanisation permet donc de refermer le cycle de la matière organique tout en fournissant de l'énergie renouvelable qui puise son origine dans l'énergie solaire captée par les plantes.

Quelles quantités d'énergie peut-on produire ?

Source	quantité de matière par an	biogaz produit	équivalent fuel
Une vache	17 m^3 de lisier	425 m^3	260 litres
Déchets organiques d'une famille de 4 personnes	500 kg	60 m^3	37 litres
Tonte d'un terrain de foot	6 .000 kg	1000 m^3	610 litres

Les avantages environnementaux

- **Production d'énergie renouvelable**
- **Diminution des Gaz à Effet de Serre (GES)**
- **Réduction de la Demande Chimique en Oxygène (DCO)**
- **Amélioration du bilan carbone des transports d'effluents**

ACTION 1 :

Suivi de paramètres clés lors de campagnes de suralimentation de digesteurs à l'échelle du laboratoire

Centre de Recherche Public – Gabriel Lippmann

Sébastien LEMAIGRE – Philippe DELFOSSE – Bénédicte DE VOS – Elodie BOLAND
Avec la contribution scientifique de : Anaïs NOO – Xavier GOUX – Frédéric MAYER

Avec la collaboration de l'ensemble du partenariat

1. La biométhanisation : un processus biologique complexe mais fragile

La production de biogaz à partir de la biomasse n'est pas un concept nouveau mais le désir de mieux maîtriser cette voie de production énergétique est devenu un défi international ces dernières années. Les gestionnaires d'installation de biométhanisation sont confrontés à une grande variété de substrats de composition hétéroclite et l'introduction de ces produits dans les digesteurs sans en connaître les caractéristiques peut mener à des dysfonctionnements du processus. Il n'existe actuellement pas de solution technique satisfaisante permettant de détecter ceux-ci de façon précoce. Or leur occasionnement peut aller jusqu'à contraindre le gestionnaire d'installation à vider ses digesteurs pour les réinoculer avec une flore microbienne saine, ce qui représente un important manque à gagner puisque un digesteur nouvellement inoculé nécessite une longue période d'adaptation avant d'atteindre son régime optimal de fonctionnement. Parmi les avancées récentes dans la compréhension du processus de biométhanisation, on compte la prise de conscience de l'étroite interdépendance entre les quatre groupes de micro-organismes régissant les principales phases du processus et l'importance de l'hydrogène comme régulateur principal. Des expériences en laboratoires pour un substrat spécifique (le glucose) ont démontré la possibilité de suivre le processus en ligne grâce à des senseurs électroniques. L'expérience décrite ici tend à valoriser de tels outils afin de mettre en évidence des grandeurs dont le suivi permettrait de détecter les principaux dysfonctionnements rencontrés dans les bio-méthaniseurs.

2. Des digesteurs pilotes à l'échelle du laboratoire

Quatre digesteurs de type C.S.T.R. (continuellement mélangés) ont été développés en collaboration étroite avec un atelier de chaudronnerie. La solution finalement retenue est une cuve de 100 litres construite intégralement en acier inoxydable et munie d'un mélangeur à axe vertical (Figure 1). La cuve possède une double paroi permettant un chauffage par circulation d'eau chaude dans le manteau formé par celle-ci. Le couvercle est boulonné par l'intermédiaire d'une bride et l'étanchéité assurée par un joint en élastomère de type butyle. Le brassage du digestat est assuré par un mélangeur à axe vertical dont le design a été développé spécialement pour le projet. Celui-ci est entraîné par un moteur électrique et une minuterie permet de choisir la durée et le rythme des périodes de mélange. Un dispositif de régulation thermique est fixé sur le flanc de la cuve. Il se compose d'un chauffe-eau et d'un circulateur faisant passer l'eau chaude dans la double-paroi quand les pertes calorifiques du digesteur le nécessitent. L'action du circulateur est régulée par un contrôleur de température dont le signal d'entrée est fourni par une sonde de type pt-100 mesurant la température du digestat.

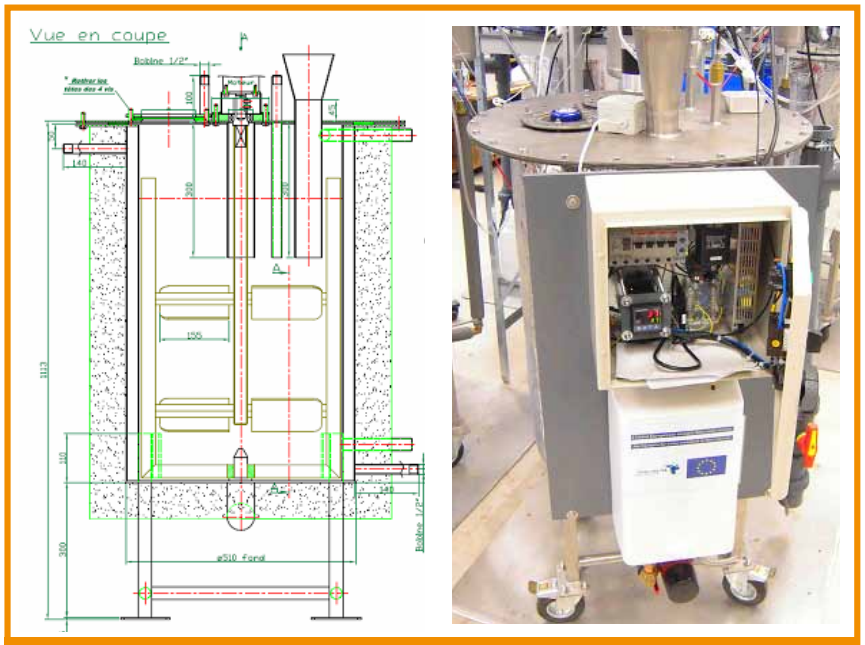


Figure 1 : Les digesteurs pilotes.

3. Des campagnes de suralimentation avec suivi intégré de paramètres clés

Le principe de l'expérience consiste à maintenir l'un des pilotes (le témoin) dans des conditions sécurisées d'alimentation alors que les 3 autres sont progressivement suralimentés. Le protocole, défini à partir de la norme VDI 4630, consiste à maintenir le digesteur témoin à un niveau d'alimentation de 100g de matière fraîche par jour (gMF/j) alors que les 3 digesteurs suralimentés (de manière identique) voient leur alimentation augmentée de 0,5 gMF/j toutes les 2 semaines. La norme préconise de poursuivre ce régime jusqu'à la chute de la production quotidienne de méthane sur les digesteurs suralimentés (Figure 2).

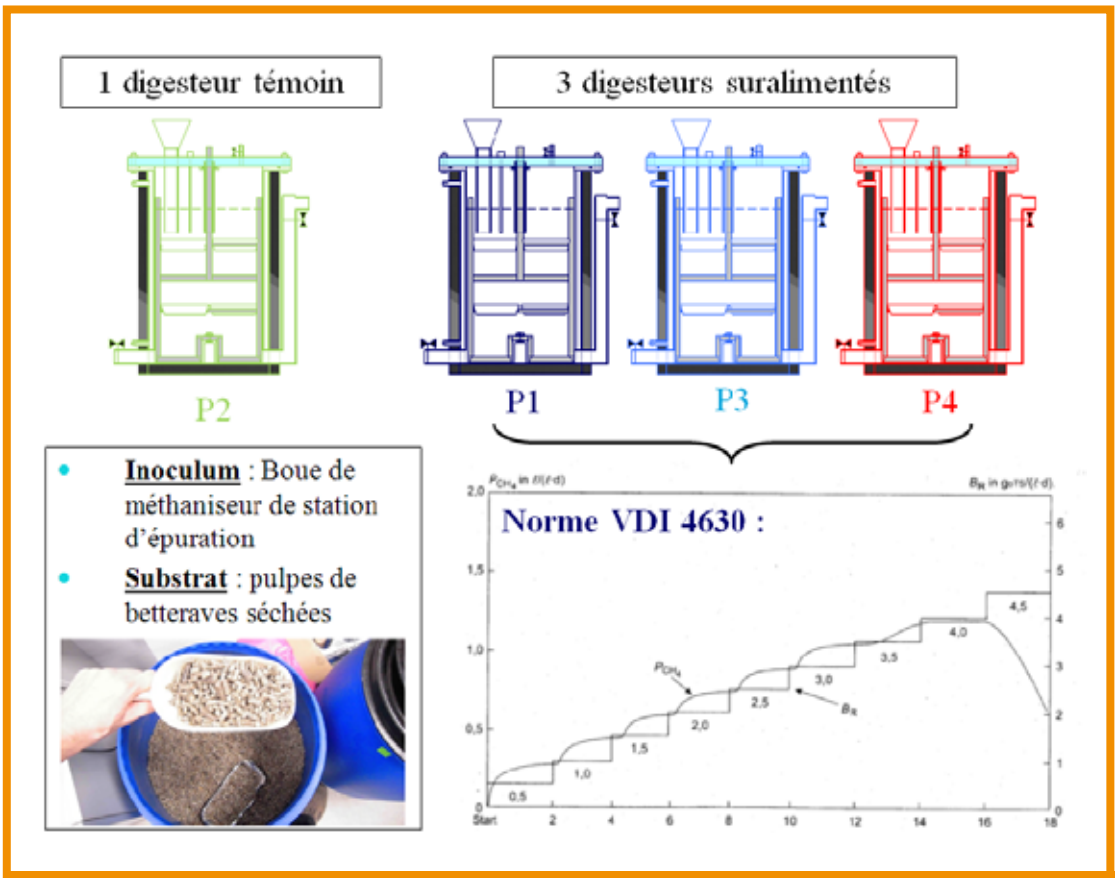


Figure 2 : Principe de l'expérience menée sur les digesteurs pilotes.

Le substrat sélectionné est constitué de pulpes de betteraves séchées sous forme de granulés (Figure 2). Ce substrat, dont le taux de matière sèche est proche de 90 %, permet une manipulation ainsi qu'un stockage aisé. De plus, il s'agit d'une alimentation équilibrée pour le consortium bactérien, ce qui permet d'éviter les carences en éléments essentiels pour celui-ci et de le conserver dans des conditions optimales de renouvellement cellulaire.

En parallèle à la suralimentation, un maximum d'informations sur le processus a été collecté de manière à mieux cerner les facteurs qui peuvent permettre de détecter de la manière la plus précoce possible le phénomène d'acidose. Dans la phase gazeuse, il a été décidé de suivre les grandeurs suivantes :

- ***Production de biogaz des digesteurs :*** la relation entre cette production et le taux d'alimentation donne une information intéressante sur les conditions de fonctionnement du consortium microbien.
- ***Taux de méthane et de dioxyde de carbone :*** il s'agit également d'un élément essentiel à connaître pour interpréter les dysfonctionnements du processus.

- ***Taux d'hydrogène :*** le taux d'hydrogène dans le biogaz est un paramètre clé à suivre car sa brusque augmentation constitue potentiellement l'un des premiers signes mesurables d'un dysfonctionnement de type acidose. Sa concentration dans le biogaz est en effet directement liée aux relations existantes entre certaines catégories microbiennes du réseau trophique qui se trouvent déséquilibrée en situation d'acidose.
- ***Taux de sulfure d'hydrogène :*** l'H_2S est un important facteur de corrosion pour les moteurs de cogénération. De plus, son taux dans le biogaz augmente avec l'acidité du digestat, ce qui en fait un paramètre intéressant à suivre pour la présente application.
- ***Taux d'oxygène :*** la principale utilité d'un tel suivi est la prévention de défauts d'étanchéité dans le circuit du dispositif expérimental. Le biogaz ne contient en principe pas d'oxygène, celui-ci provient uniquement de l'air emprisonné dans les cavités du substrat introduit.

Dans la phase liquide (le digestat), les paramètres suivants ont été mesurés :

- ***Taux de matière sèche :*** son suivi permet de contrôler le taux de matière solide potentiellement digestible dans le digestat ainsi que son éventuelle accumulation, qui peut être signe d'une difficulté du consortium bactérien à dégrader le substrat introduit, ou de sa dégradation effective dans le cas d'un processus fonctionnel.
- ***Taux de matière organique sèche :*** il s'agit de la fraction organique, donc potentiellement digestible de la matière sèche. Sa mesure est complémentaire à celle du taux de matière sèche car elle confirme un dysfonctionnement en cas d'accumulation excessive de matière organique dans le digestat.
- ***Pouvoir tampon :*** un fort pouvoir tampon permet de limiter la chute de pH en cas de brusque accumulation d'acides gras volatils, ce qui permet de conserver l'activité des populations microbiennes de type acétogène et méthanogène. Suivre l'évolution du pouvoir tampon du digestat est dès lors un excellent moyen d'anticiper une situation d'acidose.
- ***Taux d'azote ammoniacal :*** un trop fort taux d'ammoniaque (NH_3) dans le digestat a une action inhibitrice sur les bactéries acidogènes et acétogènes. De plus, son accumulation est l'un des facteurs qui favorisent la formation excessive de mousse.
- ***Taux d'acides gras volatils :*** ces taux et en particulier le rapport entre la concentration entre l'acétate et les acides gras à plus longue chaîne (propionate, butyrate,…) est un facteur clé pour diagnostiquer les déséquilibres au sein du réseau trophique microbien.

Un système complet d'analyse du biogaz a été développé. A sa sortie des digesteurs, le biogaz circule dans un dispositif de séchage par refroidissement. Pour l'analyse régulière de la composition du biogaz, un analyseur a été créé (Figure 3).

Figure 3 : L'analyseur de biogaz créé pour le projet.

Celui-ci intègre la mesure des taux de CH_4, CO_2, O_2, H_2S et H_2. Les capteurs ont été sélectionnés pour leur plage de mesure appropriée ainsi que pour une sélectivité maximale vis-à-vis de leur gaz cible. Dans le but de distribuer successivement le gaz émis par chaque fermenteur vers la centrale de mesure, un gestionnaire d'éléctrovannes contrôlé par ordinateur a été conçu. Le gaz séché est prélevé par une pompe et re-circule devant les éléments sensibles des capteurs jusqu'à stabilisation de leur signal. Un ordinateur déclenche la mise sous tension régulière de l'analyseur et contrôle le rythme d'ouverture des éléctrovannes. L'ensemble est géré par une interface développée pour l'application. Celle-ci se charge de stocker les résultats des mesures dans une base de données. Le volume de biogaz produit est mesurée

Figure 4 : Compteur à gaz de précision à tambour humide.

«on-line» à la sortie de chaque fermenteur. A cette fin, des compteurs à gaz de précision à tambour humide munis de sorties digitales ont été installés (Figure 4).

L'expérience menée avec les digesteurs pilotes et a été réalisée en continu sur la période 2009-2012 et peut se diviser en trois phases (Figure 5).

Les 4 digesteurs pilotes ont été inoculés le 17 décembre 2009 au moyen de boue de digesteur anaérobie. Chaque digesteur a été rempli avec 100 litres d'inoculum uniformisé autant que possible pour rendre homogènes les conditions initiales de digestion. Le taux de matière sèche de l'inoculum était de 1,3g/100gMF.

Les digesteurs ont d'abord fait l'objet d'une phase initiale de stabilisation des conditions de digestion (Figure 5) au cours de laquelle ils ont été alimentés de manière similaire et sécurisée (100 gMF/j ou 200gMF/j). Cette phase initiale a également permis d'amener leur taux de matière sèche à une valeur comparable à celle d'un digestat «de ferme» (~7g/100gMF). Suite à cette période de stabilisation, le pilote 2 a été choisi comme témoin et son alimentation a été maintenue à 100gMF de pulpes par jour. Au cours de cette période, la production de biogaz des 4 pilotes s'est révélée similaire.

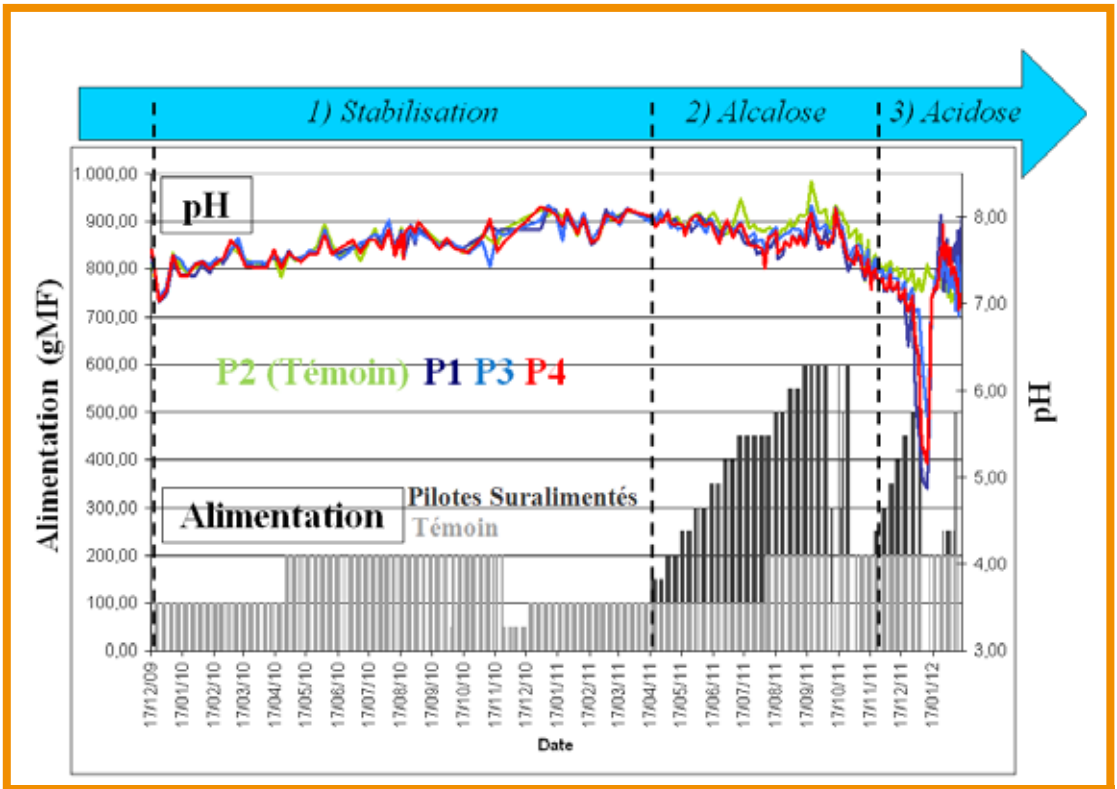


Figure 5 : Les 3 phases de l'expérience.

4. Situation d'alcalose et problèmes de mousse

La première campagne de suralimentation a débuté le 15 avril 2011. Au cours de celle-ci, il a été choisi de conserver le digestat du témoin à un taux de matière sèche stable. Celui-ci a donc reçu une quantité déterminée d'eau en accompagnement des pulpes. Les pilotes suralimentés (P1-P3-P4) ont reçu chaque jour la quantité d'eau nécessaire pour conserver le même rapport pulpes/eau que pour le témoin. Une remise à niveau à 100 litres a été opérée chaque jeudi sur les 4 digesteurs.

Au cours de cette campagne, il est progressivement apparu que le pH des 4 digesteurs pilotes avait tendance à augmenter. Le pH du digesteur témoin a même approché un pH de 8,5 a la fin du mois de septembre 2011. A cette même période, le pH des autres digesteurs suralimentés était également proche de 8,0 alors que leur alimentation en pulpes était alors de 600gMF/j. En parallèle, le pouvoir tampon des digesteurs ne diminuait que peu. Les analyses du taux d'azote ammoniacal ont montré des valeurs supérieures à 3 kg $N\text{-}NH_4/m^3$ de digestat. Bien qu'ayant tendance à diminuer avec l'augmentation du taux d'alimentation, ce taux restait élevé en particulier sur le digesteur témoin (Figure 6).

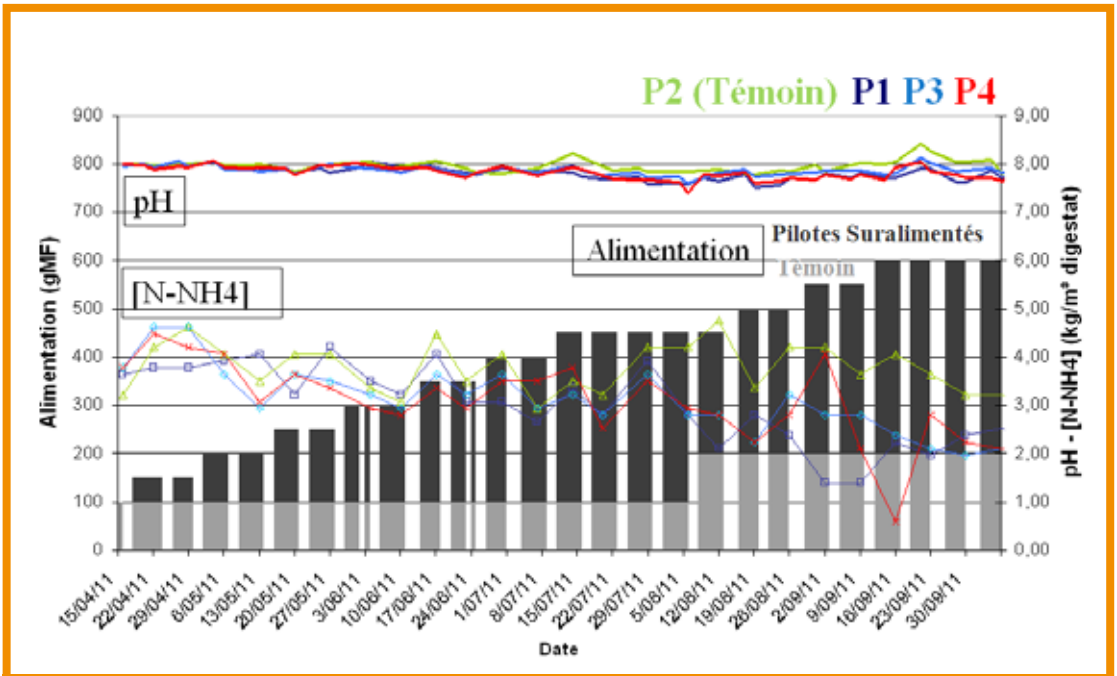


Figure 6 : Taux d'azote ammoniacal et pH pendant l'alcalose.

Un pH élevé (supérieur à 8,0) ainsi qu'un fort taux d'azote ammoniacal dans le digestat (supérieur à 3kg $N\text{-}NH_4/m^3$) sont les signes classiques d'un dysfonctionnement de type «alcalose». L'alcalose est une situation d'inhibition de certaines catégories du réseau trophique qui comme l'acidose, réduit les performances d'un digesteur. Elle est due à une alimentation trop riche en protéines qui conduit à la production d'une concentration élevée d'ammoniac dans le digestat. Cet ammoniac en solution a une action inhibitrice sur les bactéries acidogènes mais surtout sur les populations acétogènes et méthanogènes de type acétotrophe (Figure 7).

Comme l'hydrolyse et l'acidogénèse ne sont pas affectées, il y a accumulation dans le digestat de monomères (acides aminés, alcools,…) et surtout d'AGV de grande taille. Néanmoins le pH ne diminue pas et a même tendance à augmenter en raison de l'alcalinité de l'ammoniac. Concrètement, en situation d'alcalose critique, on observe une diminution de la production de biogaz alors que le taux de méthane dans celui-ci ne diminue pas, la voie méthanogène hydrogénotrophe n'étant pas inhibée.

Il est intéressant de constater que cette situation d'alcalose s'est accompagnée de brusques dégagements d'hydrogène dans le biogaz et ce y compris sur le digesteur témoin lors de nombreuses alimentations (voir Figure 8).

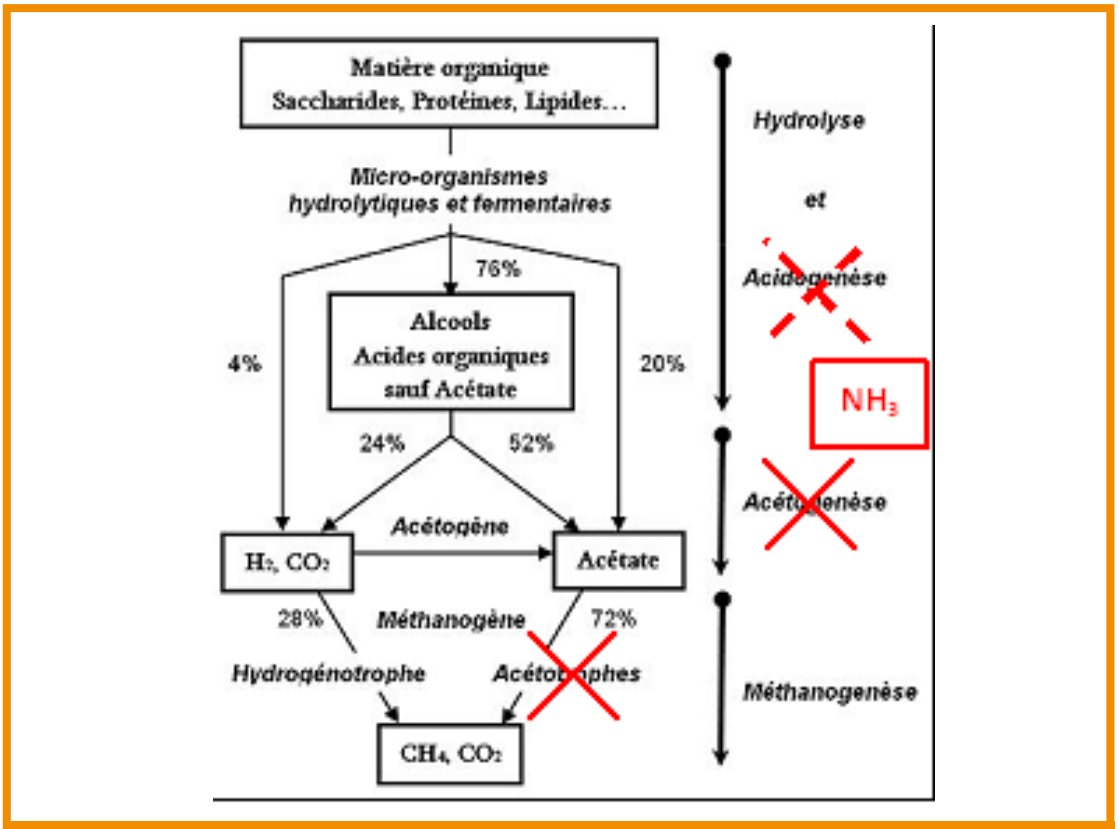


Figure 7 : Effet de l'ammoniac sur le consortium bactérien.

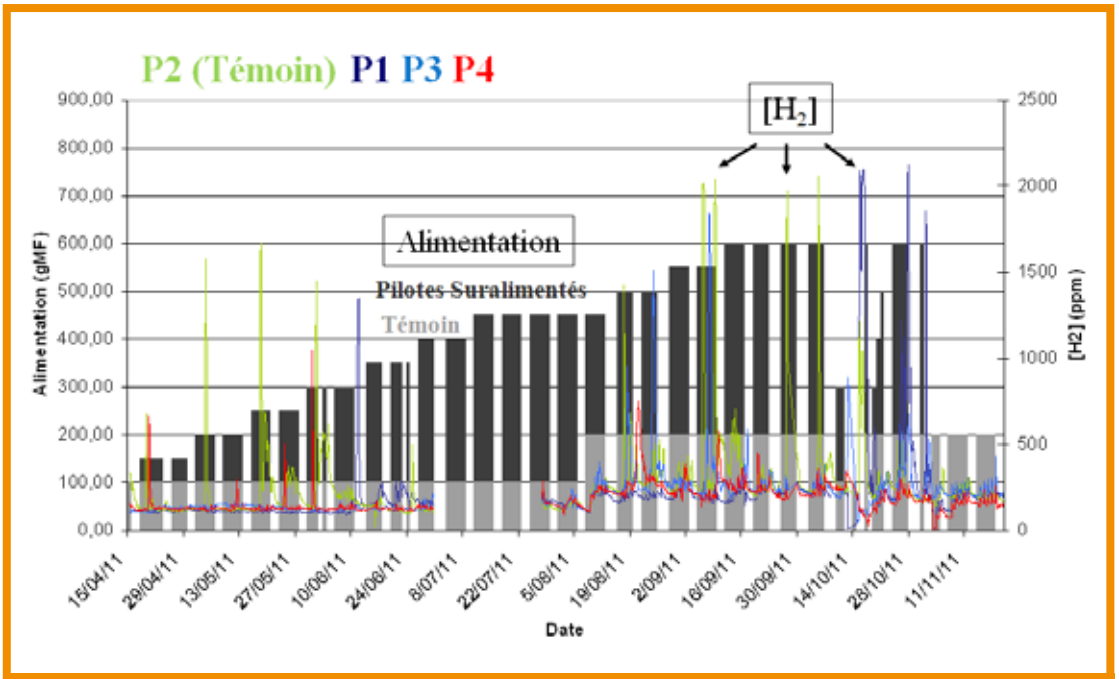


Figure 8 : Taux d'hydrogène dans le biogaz au cours de l'alcalose.

Simultanément à cette situation d'alcalose sont apparus des problèmes de mousse dans les digesteurs. D'importants débordements ont régulièrement eu lieu dès le 30 juin 2011. De fortes concentrations d'ammoniac sont en effet propices au développement de bactéries filamenteuses qui par la création d'un biofilm en surface, sont responsables de ce type de problème. Par ailleurs, les protéines, acides aminés et acides gras volatils présents en grande quantité dans le digestat en cas d'alcalose sont reconnus comme des facteurs de stabilisation pour la mousse.

La mousse étant un corollaire de l'alcalose, des tentatives de résolution communes aux deux problèmes ont été mises en œuvre. Il a d'abord été tenté de relever le rapport C/N du digestat en ajoutant à la ration de l'huile de colza (25 ml en plus des pulpes) puis du sorbitol, un édulcorant utilisé dans l'industrie agro-alimentaire. Dès le 19 octobre 2011, une nouvelle stratégie de gestion des digesteurs a été adoptée. Il a été supposé que les problèmes liés à l'alcalose (dont la mousse) étaient dus à un temps de séjour trop long du substrat dans les digesteurs, ce qui favorisait l'accumulation de quantités d'azote trop importantes dans ceux-ci. Cette fois, au lieu de maintenir un taux de matière sèche le plus stable possible, il a été décidé de réduire le temps de séjour hydraulique du substrat dans les digesteurs à une valeur proche du chiffre communément observé dans les installations réelles (~ 30 jours). Pour ce faire, l'équivalent de 5 litres d'eau a été ajouté quotidiennement à la ration. En négligeant le volume occupé par les pulpes introduites, cet ajout permettait de lessiver le volume total d'un digesteur en 20 jours ouvrables, soit un mois. Cette nouvelle stratégie a eu pour conséquence une diminution importante du taux d'azote ammoniacal, mais également du taux de matière sèche, du pouvoir tampon et du pH. Suite à de nouveaux débordements, la fréquence de ces événements ainsi que le risque d'endommagement du matériel d'analyse ont contraint de revenir à une alimentation de 200gMF de pulpes par jour sur chaque digesteur. A partir du début du mois de novembre, il a enfin été décidé d'incorporer chaque lundi un anti-mousse à raison de 7,5ml par digesteur. Il s'agissait d'un produit à base de silicone, donc en théorie biologiquement neutre et non dégradable par la flore microbienne.

Suite à ces actions combinées, les symptômes de l'alcalose ainsi que les problèmes de mousse ont définitivement été enrayés. Ceci a permis d'entamer une seconde campagne de suralimentation sur les digesteurs pilotes.

5. Seconde campagne de suralimentation : acidose

La suralimentation des pilotes 1, 3 et 4 a pu reprendre le 21 novembre. Suite à la fin imminente du projet, il a été décidé d'accélérer le rythme de suralimentation en augmentant la ration toutes les semaines plutôt que toutes les 2 semaines. Dès le début de cette nouvelle campagne, les pilotes suralimentés ont vu leur pH et leur pouvoir tampon diminuer progressivement. A partir de la semaine du 19 novembre (alimentation : 450gMF/jour), une accélération de ces signes de déséquilibre a été observée (initialement sur le pilote 1) avec en prime une croissance importante du taux de CO_2 dans le biogaz au détriment du méthane. La première semaine de 2012 (alimentation : 550gMF/jour) a finalement vu les trois digesteurs suralimentés entrer successivement en situation d'acidose. La production de biogaz a été fortement ralentie sur les pilotes 1 et 4 pour devenir inférieure à celle du témoin, pourtant plus faiblement alimenté (Figures 9). En parallèle, l'action des micro-organismes de la catégorie méthanogène a été totalement inhibée sur les 3 pilotes suralimentés, ce qui a été la cause d'une production de méthane proche de zéro pour ces 3 pilotes. Concernant les pilotes 1 et 4, le pH a connu une brusque chute au point de passer sous la barre des cinq unités le 6 janvier pour le pilote 1. La difficulté éprouvée par le consortium microbien pour convertir la matière organique en biogaz a été corroborée par l'augmentation du taux de matière sèche ainsi que de la teneur de celle-ci en matière organique.

Il est important de souligner que pendant toute la durée de l'acidose, le digesteur témoin n'a montré aucun des symptômes décrits ci-dessus et a continué à se comporter de façon entièrement satisfaisante.

Une observation importante est la remarquable réponse du taux d'hydrogène à cette situation d'acidose. Le dysfonctionnement s'est en effet accompagné d'un brusque dégagement d'hydrogène par les 3 pilotes suralimentés. Des taux supérieurs à 2000 ppm ont été enregistrés dans le biogaz généré par les digesteurs en acidose alors que la concentration dans le biogaz du digesteur témoin restait proche de 200 ppm (Figure 10).

On peut également noter un niveau de base de plus en plus élevé lors des alimentations précédant directement la chute de pH symptomatique de l'acidose (Figure 11).

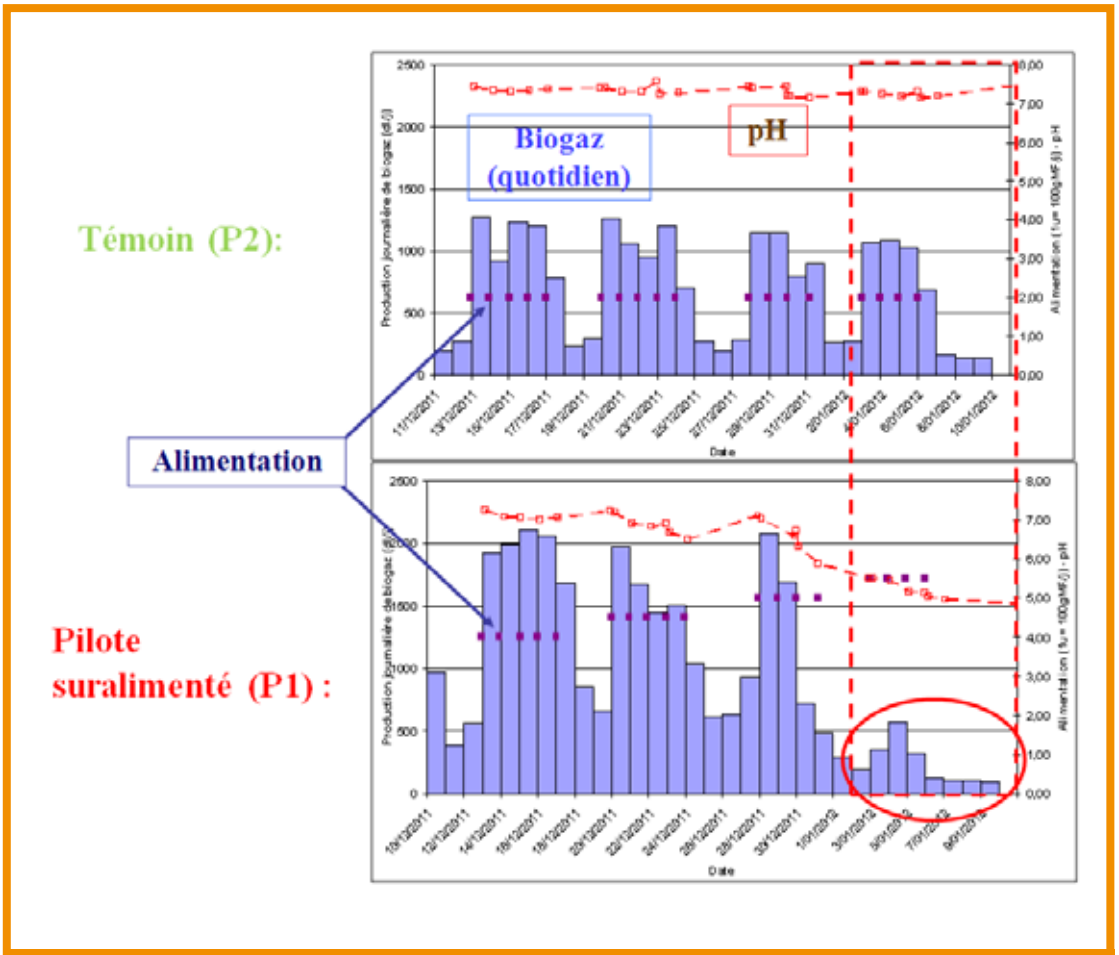


Figure 9 : Chute du pH et de la production de biogaz pendant l'acidose.

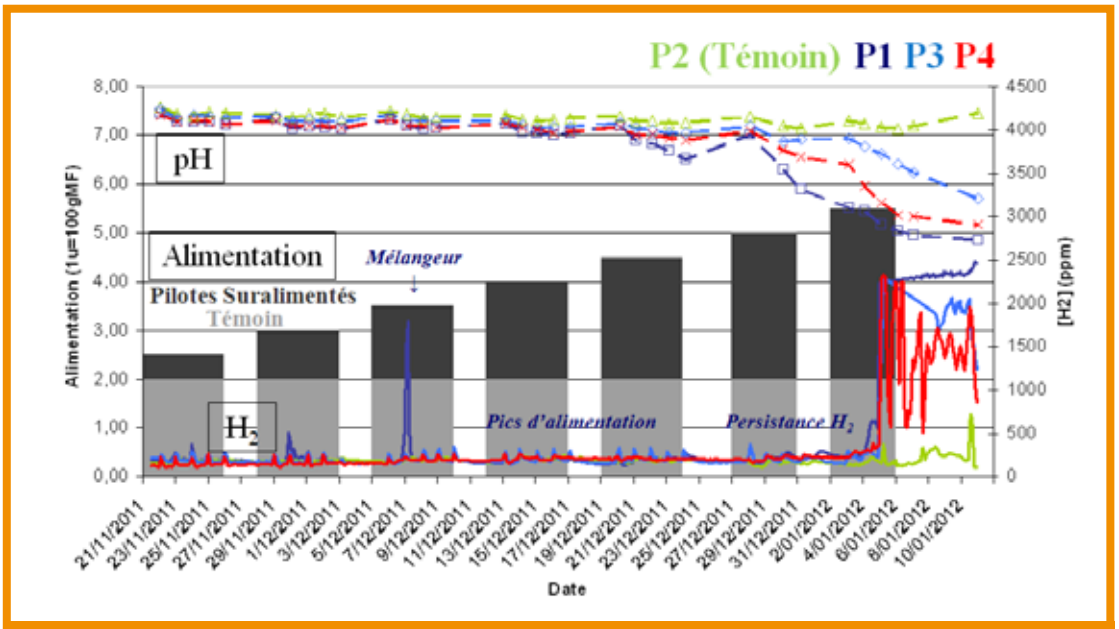


Figure 10 : Taux d'hydrogène dans le biogaz au cours de la seconde campagne de suralimentation.

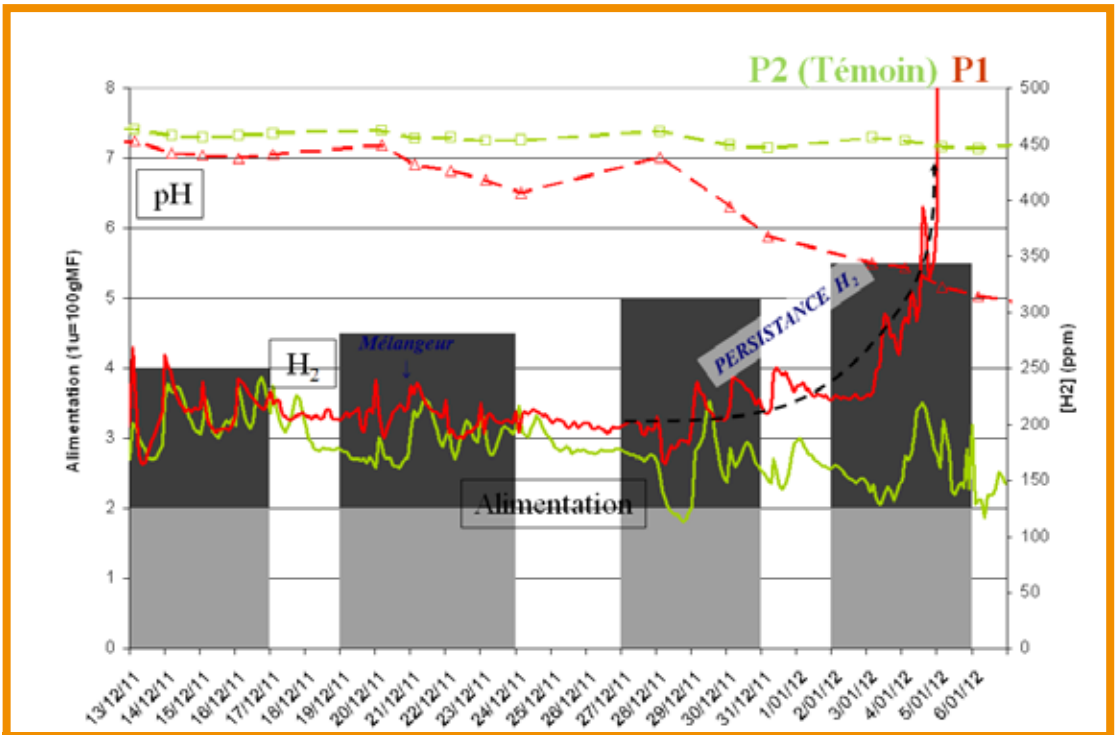


Figure 11 : Persistance de l'hydrogène dans le biogaz lors de la chute de pH.

La chute de pH a également entraîné une importante libération d'H_2S dans le biogaz des pilotes suralimentés. La concentration a dépassé la limite supérieure de détection du capteur (10000 ppm) à tel point que la qualité des mesures s'en est rapidement trouvée dégradée sur les pilotes 3 et 4. Le sulfure d'hydrogène étant un gaz acide, ceci démontre une nouvelle fois le caractère néfaste de ces situations d'acidose sur l'état des installations et en particulier sur celui des moteurs de co-génération.

Il est intéressant de remarquer à quel point des digesteurs traités de façon aussi identique que possible depuis plus de deux ans peuvent montrer une dérive au niveau de leur comportement :

- Le pilote 3 paraît plus résistant à l'acidose que les pilotes 1 et 4. Si son pouvoir tampon diminuait progressivement depuis le début de la seconde campagne de suralimentation, il est resté supérieur à celui des deux autres pilotes au moment le plus critique de l'acidose. Son pH a fortement diminué, mais cette chute est restée relativement limitée et sa production de biogaz n'a pas été altérée.
- Le pilote 4, bien que fortement affecté par l'acidose (au point de subir une chute de sa production de gaz), a conservé dans son biogaz un taux d'hydrogène relativement faible comparé à celui mesuré dans le biogaz des pilotes 1 et 3.

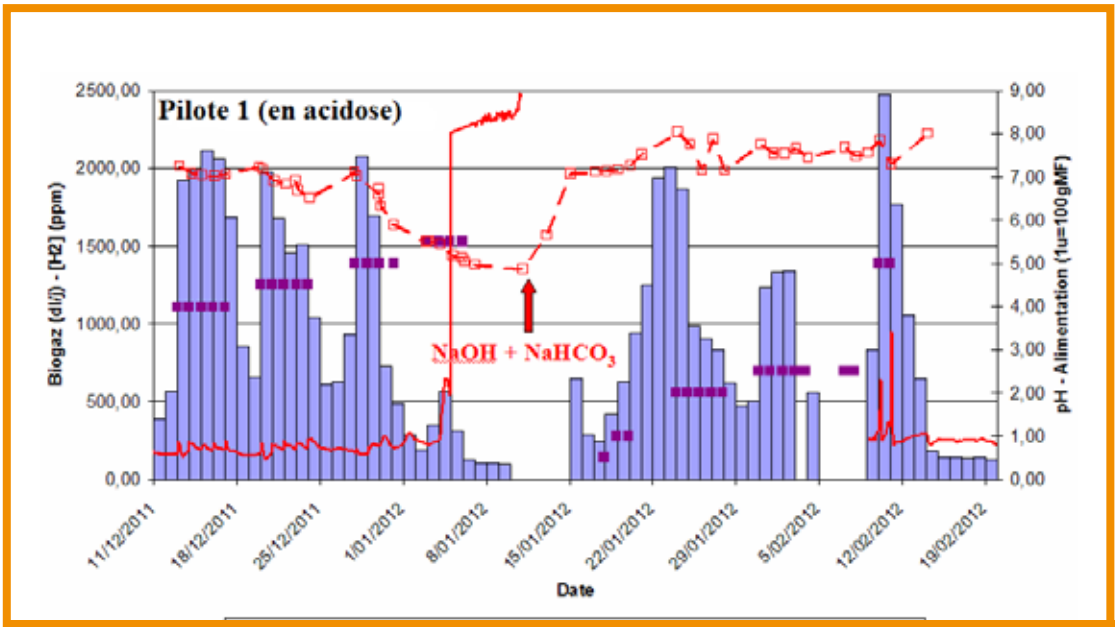


Figure 12 : Rétablissement du pH et de la production de biogaz des pilotes en acidose.

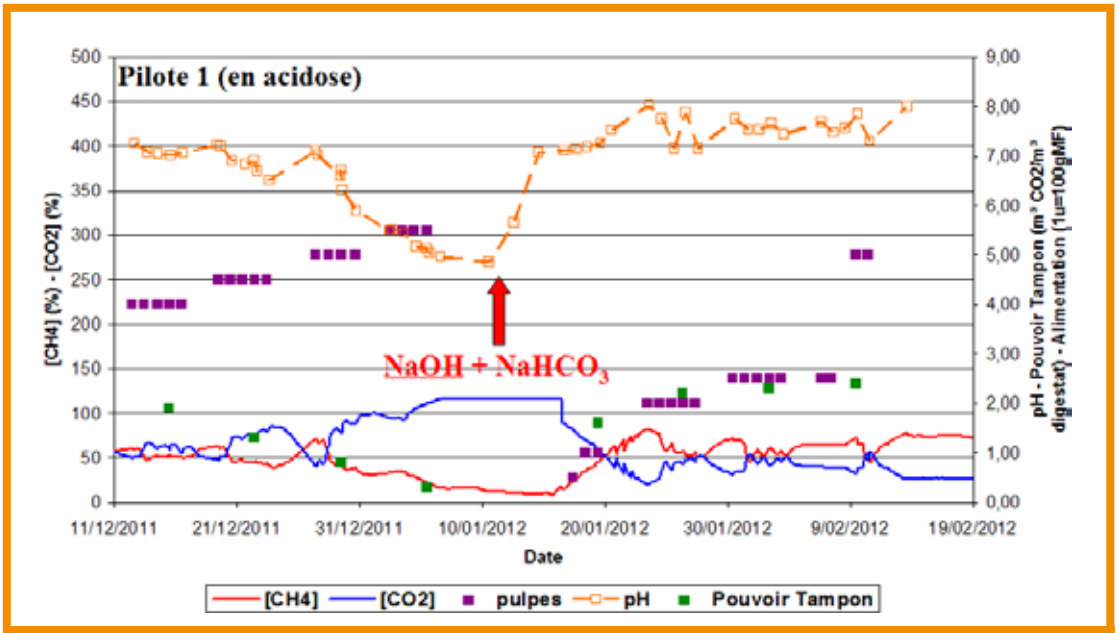


Figure 13 : Rétablissement du pouvoir tampon et de l'activité méthanogène des pilotes en acidose.

6. Rétablissement des digesteurs

Il a été tenté avec succès de «guérir» les digesteurs après l'important épisode d'acidose qu'ils ont subi. L'intervention (du 11 au 14 janvier) a consisté à relever le pH des digesteurs suralimentés via l'introduction progressive par une pompe péristaltique d'une solution de soude (NaOH 1M), puis de renforcer leur pouvoir tampon par l'ajout de bicarbonate de soude (NaHCO3). Le but final était le retour à un pH compris entre 7 et 7,5. Le pilote 1 a nécessité l'ajout d'environ 6 litres de solution de soude puis de 900g de bicarbonate de soude pour ramener son pH de 5,0 à 7,0. Ceci représente l'équivalent de 2,4 kg de NaOH et de 9,0 kg de NaHCO3 par m^3 de digestat.

Immédiatement après l'intervention, la production de biogaz a recommencé sur les pilotes 1 et 4 (Figure 12). Par ailleurs, l'activité méthanogène a également repris puisque les digesteurs ont recommencé à produire du méthane (Figure 13). Environ une semaine après, le méthane était à nouveau largement majoritaire dans le biogaz. Le taux d'hydrogène a également fini par retomber à des valeurs normales d'environ 200ppm (Figure 12).

7. Conclusions et perspectives

Le suivi de ces deux campagnes de suralimentation a montré que la mesure spécifique du taux d'hydrogène est une option intéressante à intégrer à l'analyseur de biogaz d'une installation de biométhanisation, surtout vu le coût relativement démocratique de ce type de matériel. La détection précoce d'un phénomène d'acidose en se basant sur le seul niveau d'hydrogène dans le biogaz semble néanmoins difficile. L'expérience menée a en effet montré que sa brusque augmentation survient alors que la chute de pH consécutive aux situations d'acidose a déjà débuté. Un modèle efficace devrait donc être basé non seulement sur des seuils d'alertes, mais également sur un monitoring de la réponse de la production d'hydrogène du digesteur à un certain nombre d'alimentations successives (sur une semaine, par exemple). Au cours des jours précédant directement l'acidose, l'évolution de la concentration en hydrogène dans le biogaz des pilotes suralimentés a en effet montré un retour à sa ligne de base de plus en plus difficile après chaque pic dû à une alimentation (persistance de l'hydrogène).

Une solution intéressante pourrait également reposer sur le développement d'un modèle multi-varié prenant en compte non seulement le taux d'hydrogène dans le biogaz mais également l'ensemble des autres paramètres clés du suivi d'un digesteur tels que le taux de méthane dans le biogaz ou encore le pouvoir tampon du digestat. Ce modèle pourrait également inclure la réponse de capteurs non spécifiques tels que ceux intégrés aux nez électroniques développés par l'ULg à Arlon.

Plusieurs questions restent à ce stade sans réponse. Sur base des présents résultats, il est par exemple difficile d'expliquer pourquoi des digesteurs inoculés par une même flore microbienne et traités d'une façon rigoureusement identique depuis 2 ans présentent une telle divergence de comportement face à une perturbation comme l'acidose. Il est par ailleurs peu aisé d'expliquer la production importante d'hydrogène en situation d'alcalose. Trouver la réponse à ces questions est difficile actuellement mais passera sans doute par une meilleure compréhension de la digestion anaérobie d'un point de vue micro-biologique.

ACTION 1 :

Dynamique des populations microbiennes au sein de méthaniseurs pilotes en condition d'acidose

ENSAIA

Nicolas BLAISE - Stéphanie PHILIPPOT - Isabelle THOMAS - Stéphane PACAUD - Jean-Louis GOERGEN - Frédéric BORGES

CENTRE DE RECHERCHE PUBLIC – GABRIEL LIPPMANN

Sébastien LEMAIGRE - Philippe DELFOSSE

Avec la collaboration de l'ensemble du partenariat

1. A l'origine, les micro-organismes

Les acteurs centraux de la transformation de la matière organique en biogaz sont les micro-organismes. Sans eux, aucune production de biogaz n'est à attendre d'un digesteur. Dans une exploitation agricole les micro-organismes réalisant cette réaction biologique proviennent principalement des effluents d'élevage. En effet, ces micro-organismes sont présents dans le tractus digestif des animaux et sont nécessaires à son équilibre. L'art de conduire un méthaniseur est le même que celui de définir une ration pour nourrir un animal. L'éleveur doit être vigilant car si ces rations sont inadéquates, l'animal peut entrer en acidose ce qui peut induire des désordres importants. Nous retrouvons la même situation au sein d'un méthaniseur avec pour conséquence une perte de productivité très préjudiciable. Le projet cherchera à comprendre d'un point de vue microbiologique les conséquences d'une acidose et à évaluer une méthode de récupération d'un réacteur productif sans vidange du système.

2. De multiples réactions chimiques réalisées par de multiples micro-organismes

Le processus de méthanisation fait intervenir une suite de réactions chimiques réalisées par les micro-organismes (figure 1). La première étape est l'hydrolyse, laquelle consiste à scinder les macromolécules complexes comme les lipides, les polysaccharides, les acides nucléiques, et les protéines en monomères. Les monomères sont ensuite métabolisés lors des étapes successives d'acidogenèse, d'acétogenèse et de méthanogenèse. L'acidogenèse correspond à la production d'acides gras volatils comme l'acétate ou le propionate, d'alcools comme l'éthanol, d'acides organiques tels que le lactate, ainsi que du dihydrogène (H_2) et du dioxyde de carbone (CO_2). Durant l'acétogenèse, les molécules produites lors de l'étape d'acidogenèse sont transformées en acétate (lequel peut déjà avoir été produit lors de l'étape d'acidogenèse), formate, dihydrogène et gaz carbonique. La dernière étape,

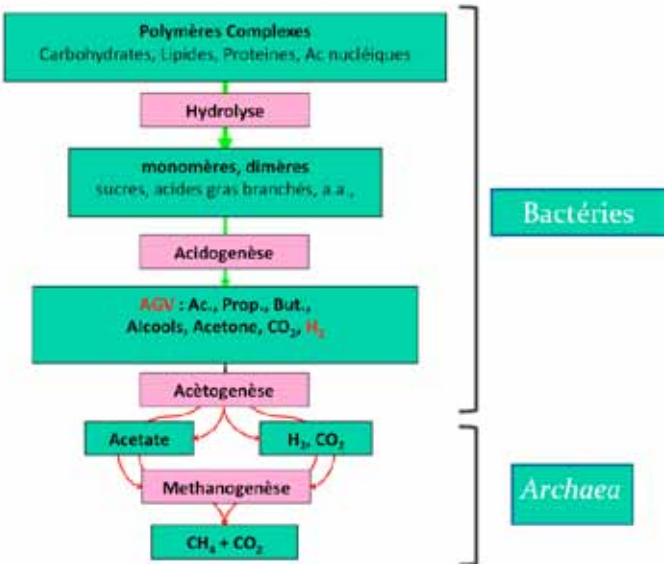


Figure 1 : Les grandes étapes de la digestion anaérobie

la méthanogenèse, permet de produire du méthane (CH_4) à partir des produits de l'acétogenèse. Cette vision simplifiée de la chaîne réactionnelle ne doit pas masquer la très grande diversité des molécules en jeu et notamment la diversité de substrats pouvant être utilisés en intrant. Cette diversité procure une grande souplesse faisant de la méthanisation un outil d'une grande adaptabilité. Or cette souplesse résulte de la grande diversité des micro-organismes capables de réaliser le processus de méthanisation. En effet, ce sont souvent des groupes de micro-organismes, lesquels sont de plus complémentaires, qui réalisent chacune des 4 étapes du processus. Par exemple, l'hydrolyse de la cellulose peut être réalisée par des bactéries des genres *Acetivibrio, Bacteroides, Butyvibrio, Ruminococcus et Clostridium* alors que l'hydrolyse de lipides peut être réalisée par des bactéries des genres *Bacillus, Anaerovibrio et Synthrophomonas*. La diversité microbienne présente dans les digesteurs anaérobies est d'une telle ampleur qu'elle n'a pas, encore aujourd'hui, été complètement élucidée. Des études estiment qu'un digesteur anaérobie peut renfermer plus de 9000 micro-organismes différents. La diversité est encore plus élevée puisque la comparaison des micro-organismes présents dans différents digesteurs anaérobies montre que peu de micro-organismes sont communs à tous les digesteurs.

Les trois premières étapes du processus, l'hydrolyse, l'acidogenèse et l'acétogenèse, sont réalisées par des micro-organismes appartenant au royaume des bactéries. La dernière étape, la méthanogenèse, est quant à elle réalisée par des micro-organismes appartenant à un autre royaume, celui des *Archaea*. Bactéries et *Archaea* sont des organismes microscopiques très ressemblants du point de vue morphologique mais qui sont très dissemblables du point de vue de leur structure moléculaire et de leurs aptitudes métaboliques. Seules les *Archaea* sont capables de réaliser la dernière étape du processus de production du méthane. Elles peuvent produire du méthane de plusieurs façons à partir de substrats différents. L'ensemble de ces réactions sont répertoriées en deux voies : la voie hydrogénotrophe et la voie acétoclaste.

La voie hydrogénotrophe fait intervenir des relations de type syntrophique entre bactéries et *Archaea*. Dans la relation syntrophique, chaque acteur a un effet bénéfique sur la survie de l'autre. La bactérie produit du dioxyde de carbone et du dihydrogène lesquels sont transformés par les *Archaea* en méthane. Les *Archaea* permettent ainsi de diminuer la pression partielle en dihydrogène, lequel est toxique pour les bactéries acétogènes. Cette association se traduit par une proximité physique dans le réacteur des bactéries acétoclastes et des *Archaea* méthanogènes.

Dans la voie acétoclaste, les méthanogènes produisent du méthane à partir d'acétate, de dioxyde de carbone, de dihydrogène, de méthanol et de méthylamine. Bien que la méthanogenèse acétoclaste soit lente, elle serait responsable de entre 30 et 70% du méthane produit selon le type d'exploitation.

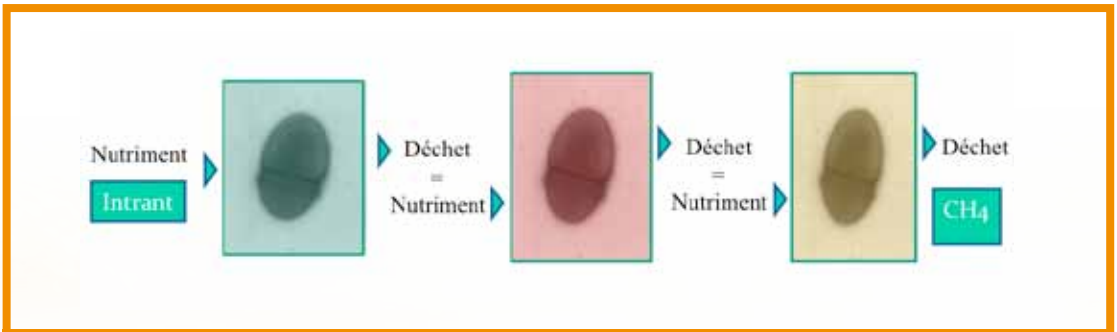


Figure 2 : Micro-organismes - une chaîne trophique

3. De nouvelles méthodes d'investigation pour étudier les incidents de méthanisation

Les scientifiques estiment aujourd'hui que la majorité des micro-organismes présents dans un méthaniseur sont dits non cultivables. Cela signifie que les méthodes classiques mises au point par Louis Pasteur et Robert Koch au XIX siècle et qui sont aujourd'hui encore très utilisées dans de très nombreux domaines auront ici un intérêt réduit. C'est avec l'essor récent de la biologie moléculaire que la discipline de la microbiologie de la méthanisation prend son envol. Elle permet en effet d'étudier un écosystème sans étape intermédiaire d'isolement de micro-organismes. La révolution tient à l'ADN et par extension à l'ARN. La diversité microbienne et son évolution est étudiée en portant notre regard non pas sur le micro-organisme dans son entier, mais sur son ADN qui lui est spécifique. En effet, ces micro-organismes sont étudiés à l'aide de techniques d'empreintes génétiques voisines de celles utilisées pour identifier une personne à partir d'un échantillon de ses tissus biologiques. Concrètement, à partir d'un échantillon de boue de méthanisation, l'ADN total est extrait en laboratoire et est analysé de façon à produire des profils constitués de multiples bandes. Chaque profil est le reflet de la structure d'une population microbienne présent dans le réacteur à un temps donné et en cela est assimilable à un code barre (figure 3). L'utilisation de ces méthodes a permis d'étudier l'impact sur les populations microbiennes de diverses contraintes appliquées aux digesteurs.

4. Statut microbiologique en phase stationnaire, en acidose et après sauvetage

Les quatre réacteurs pilotes conduits au Centre Gabriel Lippmann au cours du projet OPTIBIOGAZ ont permis de tester deux conditions différentes. La première consistait à maintenir les quatre réacteurs en conditions optimales de production de biogaz pendant environ 1 an et demi et évaluer la stabilité des populations microbiennes au sein d'un réacteur ainsi qu'entre réacteurs (figure 4). Les analyses montrent qu'en juillet 2010 les profils bactériens sont très similaires entre les pilotes P1, P2, P3 et P4. Environ 30 bandes sont observables pour chacun des profils, signifiant probablement que sont observées ici les populations majoritaires. La grande ressemblance entre les profils suggère que les espèces bactériennes majoritaires sont très similaires entre ces quatre pilotes. Ces résultats sont cohérents compte tenu que les quatre réacteurs avaient été traités de la même façon en parallèle durant cette période. De plus, les analyses de la production de biogaz ont montré qu'elle était similaire entre les quatre réacteurs.

Les profils obtenus l'année suivante, en avril 2011, révèlent encore de nombreuses similarités entre pilotes mais révèlent aussi de nombreuses différences. En effet, certaines bandes présentes dans un profil sont plus intenses, moins intenses, voire totalement absentes dans d'autres profils. Ces différences indiquent que les populations majoritaires

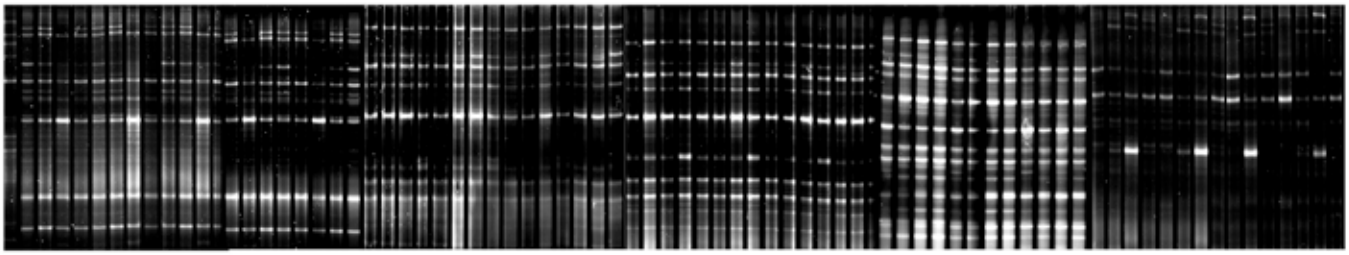


Figure 3 : Exemples d'empreintes génétiques obtenues lors du projet OPTIBIOGAZ

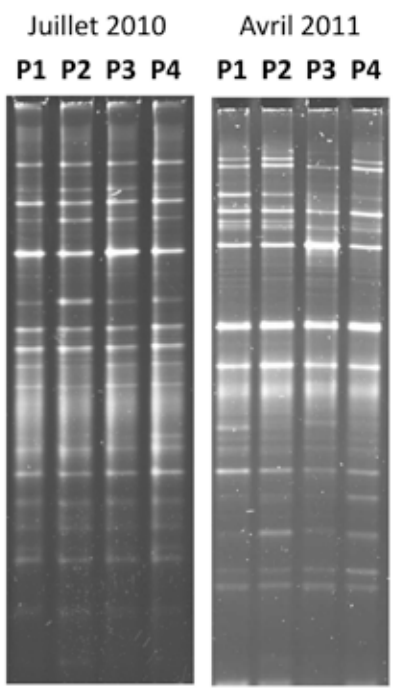


Figure 4 : Evolution des populations bactériennes (hydrolyse, acidogenèse, acétogenèse) au cours du temps en conditions optimales de production de biogaz

sont distinctes d'un réacteur à l'autre. La comparaison des profils d'un même réacteur entre 2010 et 2011 montre aussi des différences. Certaines bandes présentes dans un profil de l'année 2010 sont absentes du profil de l'année 2011 et inversement. Ces résultats indiquent que certaines bactéries sont devenues dominantes au détriment d'autres bactéries. Ainsi, bien que les réacteurs aient été traités de la même façon, les communautés bactériennes ont dérivé au cours du temps. Pourtant la production de biogaz pour cette période n'a pas relevé de différence significative entre les pilotes. Ces résultats montrent que la structuration de la population bactérienne dans un digesteur de méthanisation est un processus dynamique et que l'évolution de ces populations est régie par des paramètres du procédé encore inconnus à ce jour. Ils indiquent également que d'importantes évolutions peuvent se mettre en place au niveau des communautés microbiennes sans que cela ait un impact significatif sur la production de biogaz.

Durant la campagne de suralimentation, les pilotes P1, P3 et P4 ont été suralimentés alors que le réacteur P2 a fait l'objet d'une alimentation constante, similaire à celle des deux années précédentes. Au bout de neuf mois de suralimentation, les pilotes P1 et P4 ont subi une acidose accompagnée d'une baisse drastique de la production de méthane (figure 5). Les pilotes P1 et P4 étaient respectivement à un pH de 5,5 et 6,4. Le pilote témoin était quant à lui à un pH de 7,3. Pour une raison inconnue,

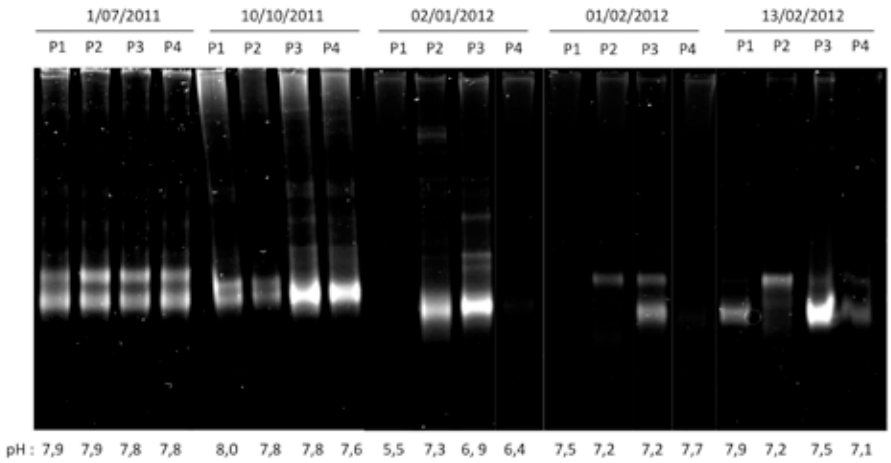


Figure 5: Impact sur les populations Archaea (méthanogenèse) d'une acidose suivie d'une neutralisation du pH par ajout de soude

le pilote P3, lequel était traité de la même façon que les pilotes P1 et P4, conservait un pH proche de 7. Les réacteurs P1 et P4 ont pu être rescapés par ajout de soude, laquelle a permis de faire remonter le pH à des valeurs proches de 7 (voir 01/12/2012 de la figure 5). Cette remontée du pH s'est accompagnée d'un recouvrement de la production de méthane.

L'analyse des populations *Archaea* a révélé que les pilotes en acidose ont produit des profils dans lesquels des bandes de très faibles intensités étaient observables (voir P1 et P4 des échantillons des 02/01/2012 et 01/02/2012, figure 5) alors que les profils des pilotes à pH proche de la neutralité avaient produit des profils similaires à ceux obtenus en conditions normales de production de biogaz (voir P2 et P3 des échantillons des 02/01/2012 et 01/02/2012, figure 5). Ainsi la chute du pH s'est accompagnée par une diminution de la concentration en *Archaea*. Il est connu que les *Archaea* sont très sensibles à des valeurs de pH acides et que cet effet létal se traduit par un arrêt de la production de méthane. Le pH a été remonté afin de savoir si la population résiduelle était capable de se réimplanter dans le digesteur. Après la remontée du pH, il est constaté que des bandes sont à nouveau observables dans les profils des réacteurs P1 et P4 (voir profils du 13/02/2012, figure 5). Ceci indique que l'ajout de soude dans les réacteurs a permis aux populations de se développer à nouveau pour atteindre des niveaux détectables dans nos conditions expérimentales. La population *Archaea* aura mis 15 jours avant de redevenir opérationnelle dans les digesteurs. Ainsi, bien que les *Archaea* soient très sensibles à des chutes de pH, il est possible de favoriser le repeuplement des réacteurs par les *Archaea* en neutralisant le pH et d'ainsi obtenir à nouveau une production de méthane. Toutefois, à ce stade de l'étude, il n'est pas possible de donner les limites de récupération d'un digesteur qui a dérivé en acidose, mais il est montré qu'une détection rapide peut sauver une unité de méthanisation.

5. Conclusions

En conclusion, les résultats obtenus lors du projet OPTIBIOGAZ montrent que les populations microbiennes peuvent fluctuer en condition normale d'alimentation mais que ces fluctuations n'ont pas d'impact significatif sur la production de méthane. Il a également été montré qu'un épisode d'acidose suivi d'une opération de sauvetage par ajout de soude permet de favoriser le repeuplement des réacteurs par les *Archaea* et d'ainsi récupérer une production de biogaz. Un autre résultat particulièrement intéressant est que des réacteurs apparemment traités de la même façon ne présentent pas le même degré de résistance à la suralimentation. Ainsi, alors que certains réacteurs entrent en phase d'acidose d'autres maintiennent un pH neutre et produisent du méthane. Il a été noté durant le projet qu'une dérive microbienne s'était mise en place au cours du temps entre les réacteurs. Une hypothèse séduisante pour expliquer ces différences de comportements entre les réacteurs serait que certaines structures de populations microbiennes peuvent conférer une résistance relativement accrue face à la suralimentation. Comprendre le rôle joué par les micro-organismes dans ce phénomène représenterait un enjeu de taille pour la méthanisation puisque cela laisserait entrevoir la possibilité de concevoir des réacteurs avec une stabilité mieux maîtrisée.

ACTION 1 :

Suivi du processus de biométhanisation par nez électronique

Université de Liège – Arlon Campus Environnement

Jacques NICOLAS – Roland NEYRINCK – Gilles ADAM - Christophe CERISIER – Cédric WACZEK – Laurent COLLARD
Noémie MOLITOR – Anne-Claude ROMAIN

Avec la collaboration de l'ensemble du partenariat

1. Introduction

Une automatisation simple de l'alimentation des digesteurs s'avère souvent inefficace car, en cas de disfonctionnement au cours du processus de digestion, la production en biogaz est faible. Dés lors, l'automate augmente l'introduction de matière en espérant augmenter la production de biogaz… et c'est l'inverse qui se produit avec comme résultat une acidose et l'arrêt complet de l'installation. Ce cas de figure entraîne d'énormes pertes économiques pour l'exploitant (arrêt de la cogénération, vidange des digesteurs) et conduit à devoir traiter des volumes importants (plusieurs milliers de m^3) de biomasse devenue indigestible. Une détection précoce de ce phénomène permettrait d'éviter ces désagréments. Il a dès lors été proposé de développer un système de suivi rapproché et précis du processus de biométhanisation d'abord à l'échelle de mini-digesteurs en laboratoire, puis à celle du pilote pour des substrats agricoles (action recherche) puis d'assurer sa transposition à l'échelle réelle sur des unités en fonctionnement (action développement et transfert de technologie).

Outre le suivi des aspects biologiques au sein même du processus, il a été décidé de réaliser un monitoring de la phase gazeuse par un système de type «nez électronique». L'intérêt de travailler au niveau de la phase gazeuse est de pouvoir anticiper sur la détection des évènements. En effet, l'évolution de l'acidité du substrat présente souvent trop d'inertie à cause du pouvoir tampon des matières et le suivi des acides gras volatils (AGV) est onéreux et n'est pas possible par un monitoring en ligne.

2. Principe du nez électronique

Le nez électronique est basé sur un réseau composé d'un nombre limité de capteurs sensibles aux gaz (6 capteurs dans notre cas). Par définition même du nez électronique, ces capteurs sont non spécifiques, dans le sens où ils ne sont pas conçus pour réagir à un seul composé, mais qu'ils répondent tous à un très grand nombre de substances gazeuses. Par contre, ils possèdent chacun une certaine sélectivité à de grandes familles gazeuses. Pour une atmosphère donnée, par exemple du biogaz produit en conditions normales par le méthaniseur, tous ces capteurs réagiront, mais présenteront chacun une réponse différente. L'ensemble des signaux fournis par le réseau de capteurs produira donc un motif caractéristique, véritable signature ou «empreinte digitale» du biogaz. Chaque fois que ce type d'atmosphère sera présenté au réseau de capteurs, les valeurs relatives des signaux, formant la signature caractéristique, seront toujours à peu près les mêmes.

Par contre, si le même réseau de capteurs est soumis à un autre type d'atmosphère gazeuse, par exemple le biogaz produit lors d'une acidose résultant d'une suralimentation du réacteur, la signature globale sera différente et pourra être identifiée comme celle d'une autre source.

Une phase d'apprentissage préalable doit permettre de calibrer un modèle de reconnaissance qualitative des différentes sources potentiellement présentes sur un site. Il s'agit de présenter ces atmosphères au réseau de capteurs, le plus grand nombre de fois possible, puis d'introduire les signaux dans une procédure mathématique ou statistique de reconnaissance de formes, en fournissant chaque fois en parallèle l'identification du type de source (biogaz «normal», biogaz en acidose, biogaz en alcalose, …). En finale, le système calibrera un modèle capable de prédire le type d'atmosphère en fonction des valeurs des signaux du nez électronique. Ce modèle devrait permettre par la suite d'identifier une des sources apprises, sans aide extérieure, rien que par la connaissance des signaux des capteurs. Remarquons que l'appellation «nez électronique» est justifiée par l'analogie de ce principe avec le fonctionnement de l'appareil olfactif humain. Cependant, un tel système peut être appliqué à des atmosphères non odorantes. Contrairement aux instruments de chimie analytique, un nez électronique interprète donc une réponse globale, comme le fait le nez humain, sans analyser de manière détaillée la composition chimique du mélange gazeux.

Un tel appareil n'a aucun intérêt sans le traitement mathématique qui l'accompagne. Pour illustrer la capacité du nez électronique à identifier les différents types d'observations, c'est l'analyse en composantes principales (ACP) qui sera utilisée dans le cadre de ce projet. En simplifiant, il s'agit d'une méthode qui permet de visualiser

les observations des signaux des 6 capteurs dans un espace à 2 dimensions (le plan des scores) sans perdre trop d'information.

Une autre particularité du système proposé est qu'il doit permettre d'identifier des «évènements», tels qu'une acidose. Il s'agit donc de détecter une émergence significative des signaux par rapport à un fonctionnement «normal» et, le cas échéant, de prendre la décision de la considérer comme un disfonctionnement, puis éventuellement d'en identifier la raison et le niveau. Ensuite, il faudra détecter le retour des signaux à des valeurs «normales» et, donc, la fin de l'évènement. La méthode préconisée est de mesurer une «distance» par rapport au centroïde du groupe d'observations de référence «sous contrôle» et de l'utiliser comme indicateur de disfonctionnement du réacteur anaérobie. Un test statistique sur cette distance (T^2 de Hotelling) permet de définir l'étendue de la zone sous contrôle en dehors de laquelle une alarme sera donnée.

3. Choix réalisés

Les 6 capteurs utilisés dans le cadre de ce projet sont des composants commerciaux vendus par la firme japonaise Figaro, il s'agit du TGS821, réagissant à tous les composés, mais davantage sensible à l'hydrogène, du TGS822 et du TGS2620, préconisés pour la détection de solvants, du TGS825, du TGS826 et du TGS842, un peu plus sensibles respectivement au sulfure d'hydrogène, à l'ammoniac et au méthane. Pour les appareils placés dans les fermes, un 7e capteur a été utilisé, il s'agit du TGS2442, réagissant particulièrement au CO.

Ces capteurs sont placés dans une enceinte thermostatisée de 200 ml. Une pompe est placée en aval de manière à assurer une aspiration du gaz à un débit de 250 ml/minute. La température, l'humidité ainsi que le contenu en méthane et CO_2 sont en général également mesurés. En amont du réseau de capteurs, il est essentiel de diluer le biogaz dans l'air, de manière à assurer un fonctionnement correct des capteurs, tout en évitant de franchir le seuil d'explosivité du méthane. Un étalonnage régulier du système (à l'éthanol à 12.5 ppm) assure le contrôle de la dérive des capteurs.

4. Démarche de développement du système

Une démarche progressive a été adoptée pour tester et développer le système de «nez électronique» : d'abord sur des mini-digesteurs en laboratoire, puis sur les pilotes du CRP-Gabriel Lippmann et enfin sur les digesteurs à taille réelle à Faascht et à Beckerich.

Les 12 mini-digesteurs consistent en des récipients de 2 litres maintenus à 38°C. Ils sont inoculés avec de la boue de station d'épuration, puis alimentés en sucrose, en huile, en un mélange sucrose+huile et en pulpes de betterave. Quatre d'entre eux ont reçu un régime d'alimentation contrôlé, quatre autres ont été suralimentés progressivement jusqu'à provoquer une acidose et les quatre derniers ont été alimentés normalement, avant de recevoir un pulse de suralimentation.

Les 4 pilotes du CRP-GL sont des cuves de 100 litres inoculées avec de la boue de station d'épuration et nourries à la pulpe de betterave. Le pilote 2 reçoit une alimentation sous contrôle, alors que les trois autres sont soumis à une suralimentation progressive, dans le but de provoquer une acidose. Le 12 octobre 2011, cependant, c'est une alcalose qui a été constatée, contraignant les opérateurs à alimenter uniquement à l'eau pendant un mois pour récupérer un fonctionnement normal. C'est seulement aux environs du 27 décembre 2011 qu'une acidose a pu être provoquée dans les 3 pilotes suralimentés.

Enfin, en ce qui concerne le suivi des digesteurs à taille réelle, comme aucun évènement particulier n'a été observé, il a consisté essentiellement à enregistrer l'évolution des capteurs en fonction de l'alimentation des réacteurs.

Avant les tests systématiques avec le nez électronique, plusieurs échantillons de biogaz ont été analysés au laboratoire par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse. Ces analyses n'étaient qu'exploratoires, mais n'ont pas permis de mettre en évidence de composés spécifiques d'un évènement comme une acidose. La composition du biogaz est fort variable d'une installation à l'autre et dépend essentiellement du type de substrat et d'alimentation des digesteurs.

5. Mini-digesteurs en laboratoire

Le biogaz était récolté en sacs TECOBAG® et présenté «hors-ligne» à un nez électronique, après dilution 1:25 avec de l'air humide. Le nez électronique était soumis à un fonctionnement en cycles : d'abord un air de référence pur humide, puis le biogaz dilué, avant de revenir à l'air de référence.

Une analyse en composantes principales sur toutes les observations montre que les quatre types de substrat (sucrose, huile, mélange sucrose-huile ou pulpes de betterave) n'ont pas beaucoup d'influence sur la réponse du réseau de capteurs : les points d'observations correspondant aux différents substrats restent relativement mélangés dans le plan des scores.

Lorsqu'on analyse les variables auxiliaires, comme le pH et le contenu en CH_4, H_2S ou CO, il s'avère impossible de distinguer une variation significative des valeurs des paramètres entre un fonctionnement sous contrôle et une suralimentation. Seuls l'H_2S et le CO augmentent significativement lors de la suralimentation, mais leur grande variabilité à travers les différentes mesures n'autorise pas à les considérer comme des indicateurs fiables de suralimentation.

Par contre, lorsqu'on identifie les observations dans le plan des scores de l'ACP en fonction de la quantité d'alimentation, il est constaté un éloignement très net des points correspondant à une suralimentation par rapport au groupe de l'alimentation contrôlée (figure 1).

Les observations relatives à l'alimentation contrôlée forment un groupe homogène et compact, indépendant du type de substrat, alors que les observations relatives à une suralimentation s'en écartent significativement, vers la gauche pour une suralimentation progressive et vers le haut pour une suralimentation en pulse.

Partant de cette constatation encourageante, dans la perspective du monitoring continu dans les fermes, il est utile de déterminer un indicateur quantitatif de disfonctionnement que l'on pourrait suivre en continu et pour lequel un dépassement de seuil pourrait servir de signal d'alarme.

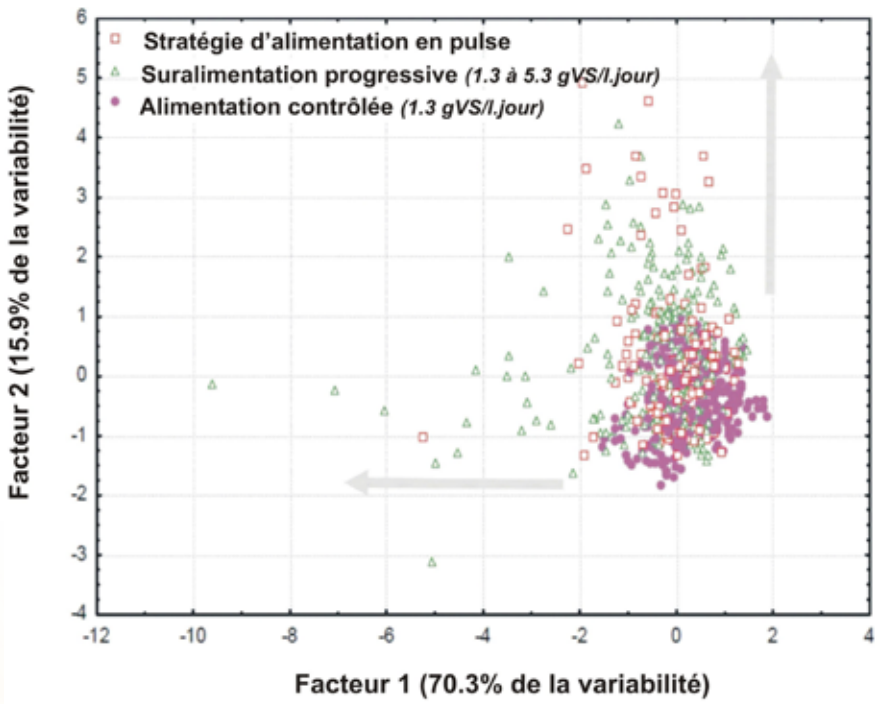


Figure 1 : Diagramme des scores d'une analyse en composantes principales réalisée sur les observations des mini-digesteurs.

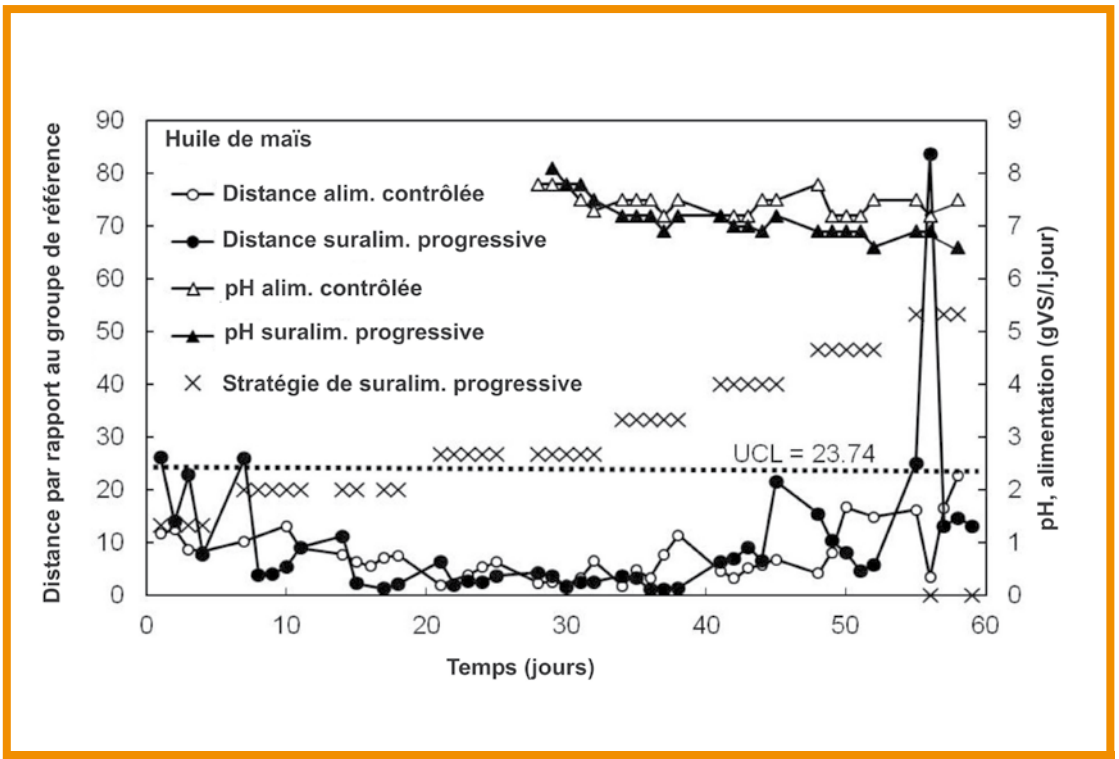


Figure 2 : Evolution temporelle de l'indicateur «distance» et du pH pour des mini-digesteurs alimentés avec de l'huile de maïs.

Un groupe reprenant l'ensemble des observations, tous types de substrat confondus, a été construit pour servir de référence d'une situation contrôlée. La distance par rapport au centroïde de ce groupe, dans l'espace des 6 signaux de capteurs, a alors été suivie au cours du temps. La figure 2 montre un exemple d'évolution de cette distance pour deux digesteurs alimentés avec de l'huile, l'un sous contrôle et l'autre avec une suralimentation progressive. Sont également dessinées sur cette figure les évolutions de la charge organique et du pH.

La valeur limite de contrôle (UCL) de 23.74 est déterminée par le test statistique T^2 de Hotelling et délimite la valeur de la distance sous laquelle le processus peut être considéré comme stable. Elle est nettement dépassée pour le digesteur en suralimentation en fin d'essai. Le pH par contre varie relativement peu. Pour une alimentation par de la pulpe de betterave, il reste même constant à cause d'un pouvoir tampon assez élevé. La distance par rapport au groupe de référence représente donc un très bon indicateur, très réactif, permettant d'identifier rapidement des épisodes de suralimentation.

6. Pilotes du CRP Gabriel Lippmann

Un appareil spécifique a été développé pour le suivi des pilotes du CRP-GL, qui impose de nouvelles contraintes par rapport à l'expérience menée sur les mini-digesteurs de laboratoire.

La première contrainte est de réaliser le suivi sur 4 digesteurs en temps réel. Si l'expérience précédente imposait déjà le suivi parallèle de 6 paires de mini-digesteurs, elle ne nécessitait pas un suivi continu et le nez électronique pouvait être utilisé seul pour réaliser les mesures «off-line», avec suffisamment de temps entre chaque mesure. Ici, il s'agit de suivre les 4 pilotes en temps réel et de la même manière, en assurant une homogénéité entre les 4 monitorings et en permettant leur comparaison temporelle.

Etant donné la grande variabilité possible entre les réponses des capteurs TGS d'un même modèle, il a semblé inadéquat de fabriquer 4 nez électroniques similaires pour suivre chacun des 4 pilotes. Il aurait été difficile d'identifier réellement les causes de différences entre les signatures : soit une différence réelle entre les pilotes, soit la variabilité entre les appareils. Dès lors, il a été décidé de travailler

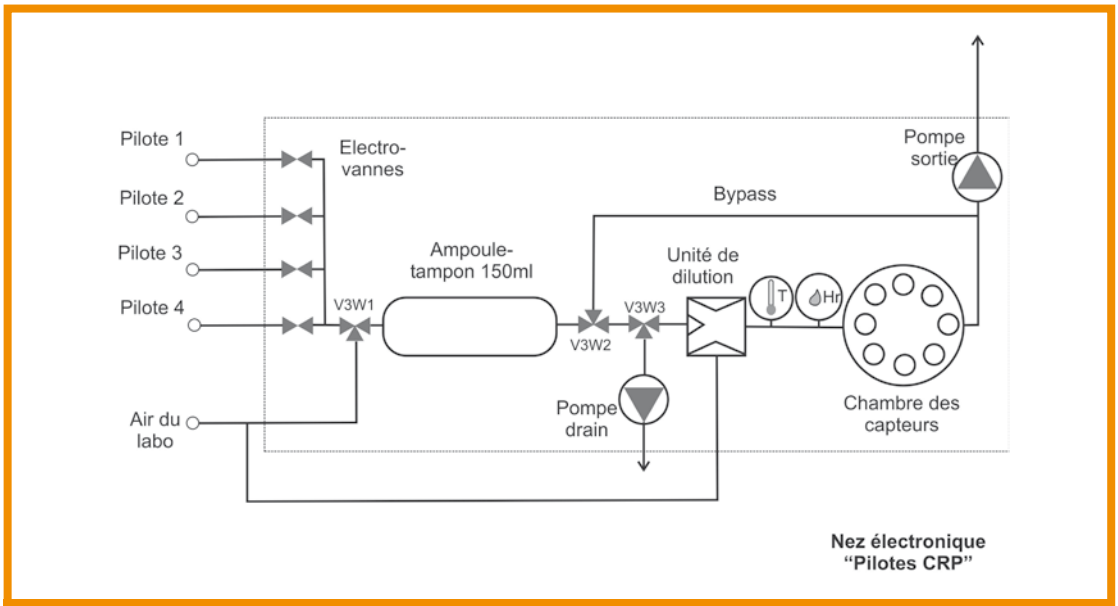


Figure 3 : Schéma du nez électronique utilisé pour le monitoring des pilotes du CRP-Gabriel Lippmann.

avec un seul nez électronique dont l'entrée est commutée successivement sur chaque pilote. Le temps de réponse d'un évènement dans les digesteurs anaérobies étant rarement inférieur à deux heures, il est en effet tout à fait imaginable de «switcher» d'un pilote à l'autre en considérant leurs mesures comme quasi-simultanées, tout en assurant un cycle de rinçage à l'air après chaque passage du biogaz sur les capteurs.

Une deuxième contrainte vient des transitoires générés par la mesure d'hydrogène et de H_2S, réalisée en ligne par le CRP-GL et qui perturbent les mesures par le nez électronique. La solution a consisté à prévoir un volume tampon de 150 ml sous la forme d'une ampoule en verre que l'on remplit avant l'analyse par le réseau de capteurs. La mesure par le nez électronique peut ainsi être réalisée sur le biogaz stocké dans l'ampoule et non directement en ligne sur les digesteurs-pilotes (figure 3).

Un cycle de mesure complet sur les 4 pilotes dure environ 2 heures, il comprend les étapes de remplissage de l'ampoule, de mesure par le réseau de capteurs et de rinçage du dispositif pour chacun des 4 pilotes considérés tour à tour. Compte tenu des étapes de rinçage complet durant la nuit, cela représente 9 mesures par jour pour chacun des digesteurs.

L'ensemble est piloté par un ordinateur intégré à l'appareil et muni d'un écran tactile, rendant le système très facilement contrôlable (figure 4). Le système est en outre connecté à Internet via un réseau 3G, ce qui permet un contrôle des paramètres et un chargement à distance des résultats.

En plus des mesures avec le nez électronique, le biogaz et la phase liquide dans les pilotes font l'objet d'une caractérisation au sein du CRP ou par l'ENSAIA de Nancy. Divers paramètres sont évalués dans la phase liquide, comme la matière sèche et la matière organique sèche, le pH, le pouvoir tampon ou les AGV et dans la phase gazeuse,

Figure 4 : Photographie du nez électronique de suivi des pilotes du CRP-GL.

comme la production de biogaz, le contenu en méthane et CO_2, l'hydrogène ou l'H_2S.

Un premier travail a consisté à extraire de l'enregistrement continu des signaux des capteurs les valeurs stabilisées considérées comme représentatives d'une mesure du biogaz dans chaque pilote.

L'influence sur la mesure de la qualité de l'air du laboratoire, utilisé comme air de dilution, a ensuite été étudiée, et s'avère négligeable par rapport aux variations des signaux lors d'un évènement de suralimentation. La dérive des capteurs a également été analysée par un étalonnage régulier à l'éthanol, afin de pouvoir en tenir compte dans le traitement des données.

Ces influences parasites se sont donc avérées gérables, voire négligeables. Cependant un comportement inquiétant des capteurs a été remarqué en fin de campagne, au moment de l'acidose. En comparant les évolutions du signal d'un même capteur pour le pilote 1 et pour le pilote 2, un problème de fonctionnement dans la commutation entre les deux pilotes a été diagnostiqué, rendant impossible l'exploitation des données du nez électronique pour le pilote 2 comme références d'une alimentation sous contrôle. Toutes les autres observations se sont par contre révélées pertinentes.

Le suivi du pH de la phase liquide dans les 4 pilotes (figure 5) montre clairement l'apparition de l'acidose en fin de campagne et même de l'alcalose en octobre 2011. En considérant un niveau d'alerte en dessous d'un pH 7, ce serait déjà à partir du 20/12/2011, et tout à fait certainement à partir du 25/12/2011, qu'on aurait pu détecter l'acidose. Dans l'autre sens, en considérant un seuil d'inquiétude au pH 8, l'alcalose du 12/10/2011 est légèrement marquée également, et on identifie même un évènement prémonitoire vers la mi-septembre, lorsqu'une apparition de mousse avait déjà été observée dans les digesteurs. Dans le cas présent donc, les variations de pH, surtout lors de l'acidose, sont très nettement marquées et identifient de manière certaine le disfonctionnement du système. Il en est de même pour le rapport CH_4/CO_2 qui diminue de manière significative. Ceci est notamment

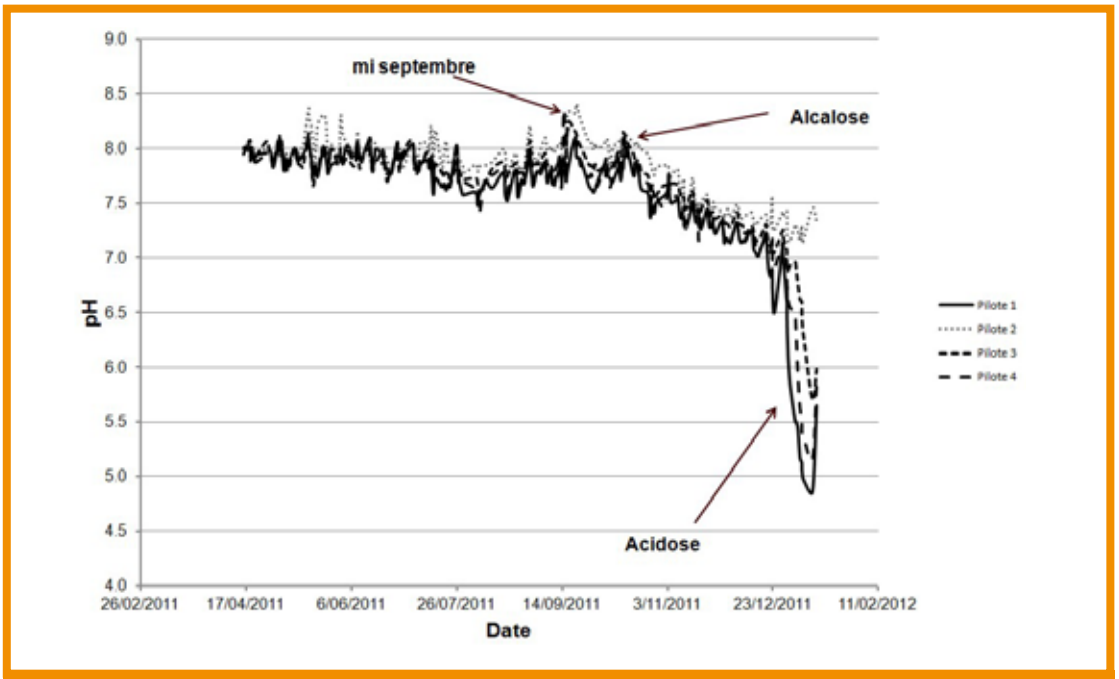


Figure 5 : Evolution du pH.

dû au fait que les pouvoirs tampon des pilotes du CRP-GL sont particulièrement faibles et chutent déjà à partir du 19/10/2011 (après l'alcalose), y compris dans le pilote 2 (figure 6). Suite à l'alcalose, beaucoup d'eau a en effet été ajoutée à tous les pilotes, ce qui a diminué leur pouvoir tampon. Il est probable que dans un réacteur en vraie grandeur, la matière première employée (lisier notamment) lui confère un pouvoir tampon plus élevé et que le pH, comme indicateur d'alcalose, ne présente plus une telle élasticité.

Avec les signaux du nez électronique, l'acidose est très clairement mise en évidence pour les observations du 4/01/2012 qui se détachent nettement du groupe des autres (figure 7).

L'acidose avérée est donc bien détectée par cette analyse sur le nez électronique, mais assez tard par rapport aux indicateurs pH ou par rapport CH_4/ CO_2. Cette acidose est probablement tellement violente qu'elle masque et écrase les éventuelles petites différences que l'on aurait pu détecter plus tôt par rapport au groupe de référence. Notons que tous les capteurs réagissent nettement à l'acidose, par un saut brusque de leur signal le 4/01/2012. Une autre ACP a donc été réalisée en reprenant les observations du pilote 4, qui a réagi de façon nettement moins marquée à l'acidose de fin 2011. On pourrait éventuellement le considérer davantage comme un réacteur en fonctionnement «normal» soumis à de légères dérives, et donc probablement plus représentatif d'un biodigesteur à taille réelle.

La figure 8 montre le diagramme des scores dans le plan des deux premiers facteurs d'une analyse en composantes principales pour les observations du pilote 4.

La tendance à l'alcalose, surtout observable le 2 octobre 2011, est clairement visible sur cette figure : les observations correspondantes s'écartent nettement du groupe compact des autres observations. L'acidose, quoique moins visible, est également marquée, et par une direction différente dans le diagramme des scores.

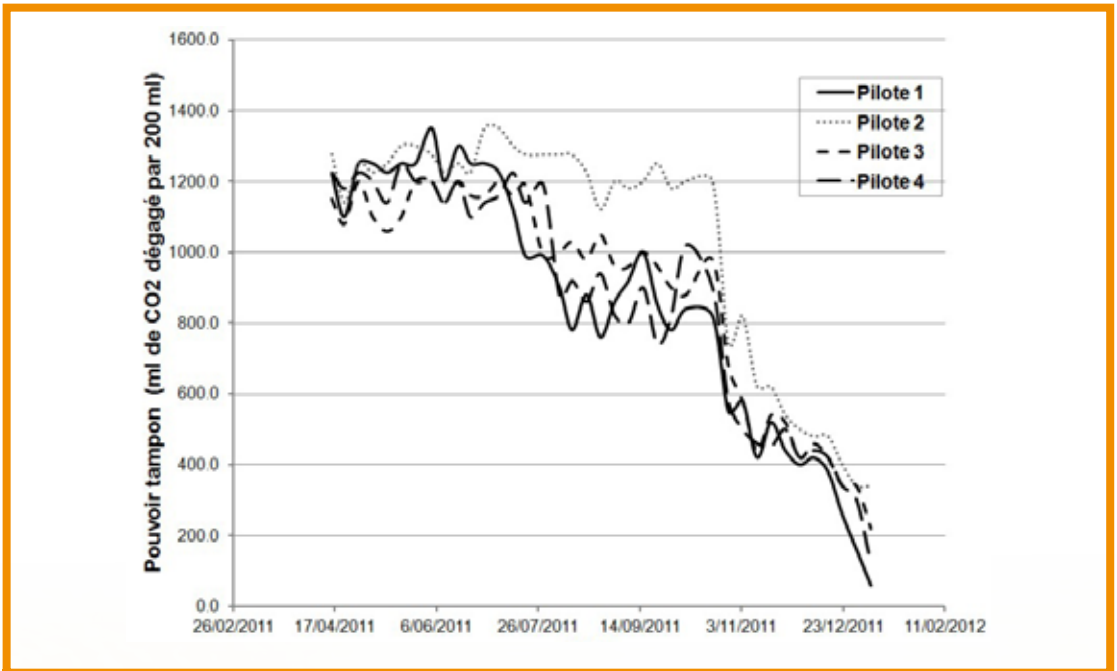


Figure 6 : Evolution du pouvoir tampon dans les 4 pilotes du CRP-GL.

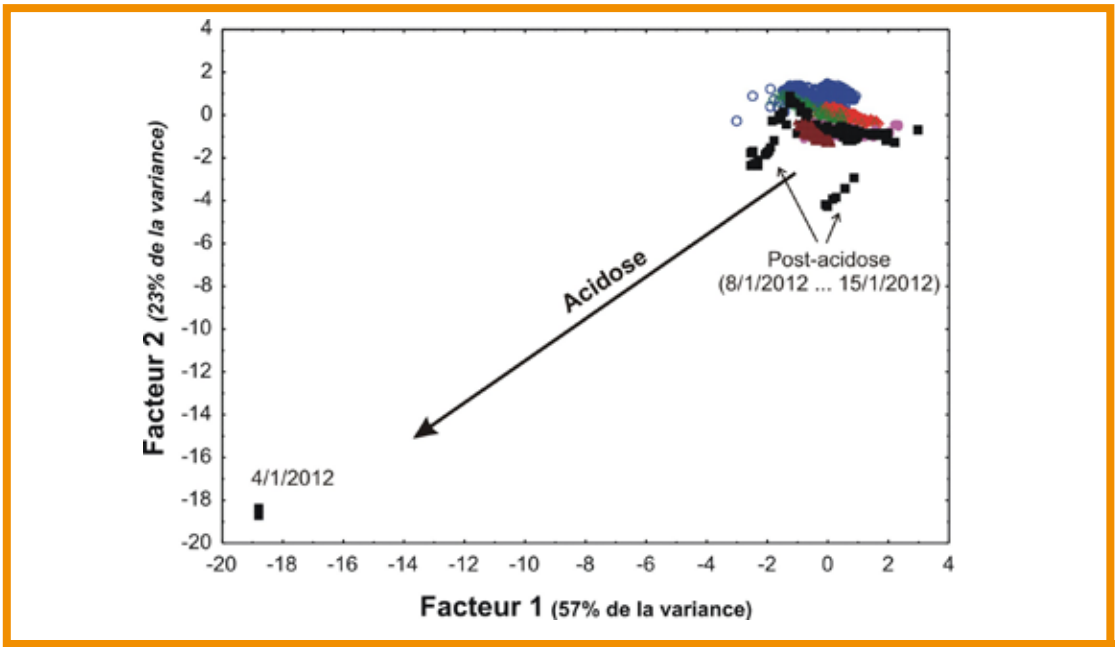


Figure 7 : Diagramme des scores dans le plan des deux premiers facteurs d'une analyse en composantes principales pour le pilote 1 du CRP-GL.

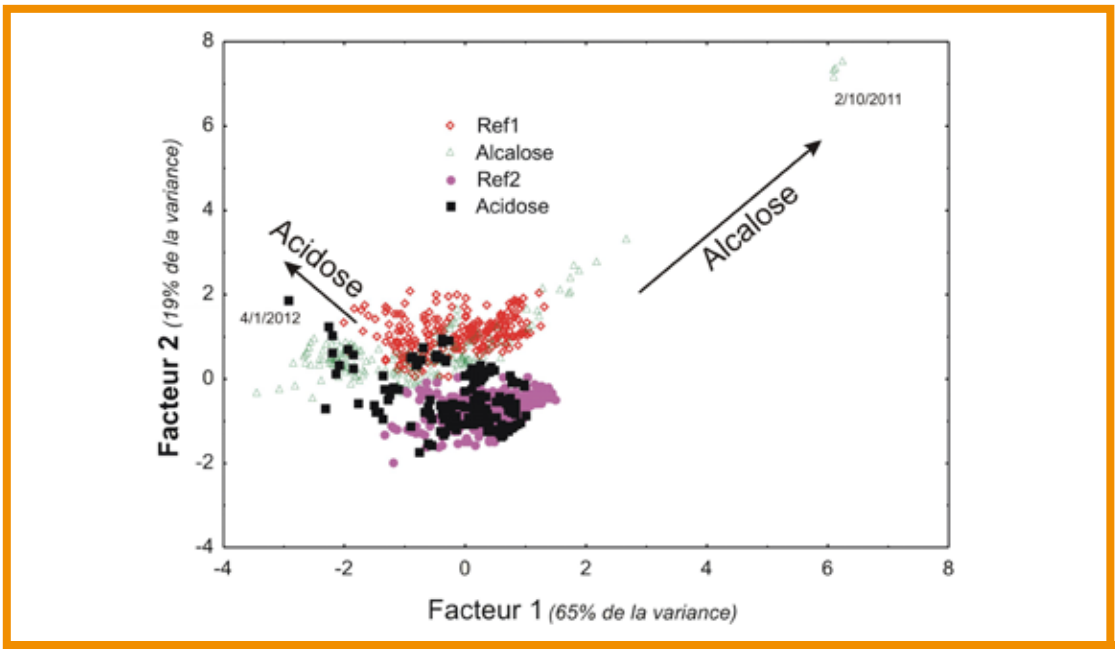


Figure 8 : Diagramme des scores dans le plan des deux premiers facteurs d'une analyse en composantes principales pour le pilote 4 du CRP-GL et pour la période août-décembre 2011.

Ce résultat montre que l'on peut, sur base de ce modèle, créer deux indicateurs de disfonctionnement du réacteur, à partir du même réseau de capteurs, l'un identifiant la signature de l'alcalose vers le haut et la droite du diagramme et l'autre identifiant la signature de l'acidose vers le haut et la gauche du même diagramme, par rapport au centre de gravité du groupe des observations «sous contrôle». De tels indicateurs ont été calculés ainsi d'ailleurs que des indicateurs de distance tels que ceux illustrés sur la figure 2 pour les mini-digesteurs. Ils se sont avérés efficaces pour identifier des évènements de suralimentation et même de façon très précoce pour l'alcalose.

La conclusion de ces analyses est que le «nez électronique» (réseau de capteurs + traitement des données adéquat) placé sur les pilotes du CRP-GL constitue un outil approprié pour créer et suivre en continu des indicateurs de disfonctionnement du processus de digestion anaérobie, que ce soit pour détecter une alcalose ou une acidose. Afin d'identifier de façon fiable une situation hors-contrôle, il est cependant essentiel de choisir judicieusement la période de référence représentative d'un fonctionnement normal.

7. Installations dans les fermes

Le dernier semestre du projet a consisté à transposer le concept du laboratoire vers l'échelle réelle à Faascht et à Beckerich. Par rapport aux deux étapes précédentes, le nez électronique devait satisfaire de nouvelles exigences, notamment en termes de suivi continu, d'absence d'air de référence suffisamment pur, d'aléas de fonctionnement liés à la présence d'impuretés ou d'humidité, de risque de réaction imprévisible du système, de suivi à distance, …

Aucun évènement notable de suralimentation n'ayant été identifié, les enregistrements ont surtout servi à noter l'évolution des signaux des capteurs en parallèle avec le rythme d'alimentation.

A Faascht par exemple, l'analyse a porté sur la période du 27/01/2012 au 16/05/2012. A partir du 10 mars et surtout à partir du 29 mars et au moins jusqu'à la mi-avril, le nez électronique a détecté un épisode hors contrôle par rapport au fonctionnement des jours précédents. Or, une analyse d'AGV effectuée le 19 avril démontre en effet une concentration 5 fois supérieure à la normale, ce qui confirme un problème potentiel. Par la suite, la concentration redevient normale et les signaux de l'instrument également.

8. Conclusion

Les résultats des essais utilisant le concept de nez électronique pour détecter des anomalies dans le processus de biométhanisation sont globalement concluants. Il s'avère possible de construire, à partir des signaux des capteurs, des indicateurs de suralimentation, identifiant séparément des épisodes d'alcalose et des épisodes d'acidose, sans trop être influencés par le type de substrat.

Il ne permet pas de générer une alerte plus précoce que d'autres indicateurs, comme le pH de la phase liquide ou le rapport méthane/dioxyde de carbone lorsque le pouvoir tampon de la matière est bas. Cependant, dans un réacteur réel, les matières utilisées ont une tendance générale à stabiliser le pouvoir tampon et les indicateurs classiques ne sont plus assez réactifs pour prévenir l'exploitant de façon précoce. Le nez électronique peut alors se justifier comme un outil complémentaire aux méthodes classiques dans l'esprit d'une aide à la décision.

Pour l'utiliser de manière judicieuse et efficace, en évitant les faux négatifs et les faux positifs, il est nécessaire de bien définir la zone «sous contrôle» en dehors de laquelle l'exploitant est prévenu d'une anomalie. L'apprentissage du système demeure donc une étape importante et indispensable.

En tout état de cause, l'instrument est facile à mettre en œuvre, souple et nettement moins onéreux que les analyseurs de gaz commerciaux.

ACTION 2 :

Valorisation des sous-produits, chaleur et digestats

Centre de Recherche Public – Gabriel Lippmann, Ferme du Faascht Kessler SCRL et ASBL «Au Pays de l'Attert»

Philippe DELFOSSE – Sébastien LEMAIGRE – Jean KESSLER – Nicolas KESSLER – Nicolas PIROTTE – Emmanuel GLAUDE
Jean-Philippe SKA – Joachim ANSIAS – Benoît TOUSSAINT – Marcel NICKERS

Avec la collaboration de l'ensemble du partenariat

1. Introduction

Au cours de la biométhanisation, la matière organique entrante n'est pas totalement transformée en biogaz. Le produit résiduel sortant des digesteurs est appelé digestat. Il contient tous les éléments constitutifs des plantes et effluents dont il est issu. Ces digestats sont donc riches en éléments fertilisants comme l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K) et en microéléments indispensables aux cultures. Cependant ces éléments fertilisants sont dilués dans de grand volume d'eau qui constitue plus de 90% des digestats. Des essais agronomiques ont démontré la valeur fertilisante des digestats. Ils montrent même un avantage comparatif par rapport aux lisiers traditionnels (moins odorants, hygiénisation partielle, conservation des éléments structurant pour le sol, azote partiellement minéralisé limitant ainsi les pertes vers les nappes phréatiques). Lorsqu'ils sont épandus sur pâtures, l'appétence de l'herbe par les bovins s'en trouve accrue (Projet Methan I, Agra-Ost). En vue d'une commercialisation de ces engrais à haute valeur agronomique, les volumes à transporter et à épandre doivent être réduits. D'autre part, l'énergie calorifique produite par les groupes de cogénération est pour une faible part utilisée pour le chauffage des digesteurs (15-20%). La majeure partie de cette énergie peut être valorisée pour le chauffage de bâtiments publics ou privés, pour le séchage de bois, de fourrage etc. si ces utilisateurs sont situés à proximité de la source de chaleur. Cette utilisation reste malheureusement saisonnière et liée au besoin de chauffage. De ce constat est née l'idée de valoriser la chaleur pour la transformation des digestats liquides en engrais organiques solides. Une première approche antérieure au projet a été réalisée à l'aide d'un séchoir à bande (tapis de séchage) mais dans ce cas de figure seul 25% de la phase liquide des digestats peuvent être traités avec la chaleur résiduelle disponible. Le séchage par évaporation sous vide est énergétiquement plus efficient (ébullition de l'eau à une température inférieure à 100°C lorsque soumise à une pression inférieure à la pression atmosphérique). Une telle approche réduira les dépenses énergétiques de la ferme.

2. La stratégie retenue

Une séparation de phase produit une fraction fibreuse pouvant être valorisée comme engrais organique solide, litière ou combustible, et une fraction liquide qui sera soumise à l'évaporation sous vide. Les produits de l'évaporation seront d'une part un engrais organique fluide propre à l'épandage agricole et d'autre part un engrais azoté minéral (économie d'énergie au niveau de la production industrielle des engrais minéraux). Le digestat concentré peut encore subir un séchage plus poussé sur le séchoir à bande afin de produire un engrais solide et sec adapté aux épandeurs agricoles traditionnels.

3. Les contraintes

La présence de CO_2 et d'autres gaz en solution constitue un frein au développement d'un processus d'évaporation visant à réduire les volumes de digestats. Lors du processus d'évaporation sous vide, le dégazage du CO_2 provoque la formation d'une mousse compacte et ferme. Lors du processus de biométhanisation, il y a production de CO_2 et de CH_4. Le CH_4 est faiblement soluble dans l'eau et presque la totalité s'échappe des digestats sous forme gazeuse. Le CO_2 est partiellement piégé dans la phase liquide car il montre une forte solubilité de l'ordre de 90 ml/100 ml d'eau, et probablement encore bien plus dans les digestats (jusqu'à 600 ml/100 ml de digestat).

4. Les tests en laboratoire

Le produit testé est la phase liquide résultant d'une extraction à l'aide d'une presse séparatrice. Le taux de matière sèche du produit est de 7%, et son pH est de 7.6.

5. Le protocole proposé tient en deux étapes

5.1. Dégazage

Pour réaliser une évaporation sous vide dans de bonne condition, sans formation de mousse compacte, un dégazage sous vide est effectué par dix cycles successifs de mise sous vide (-800 mbar, 23°C) alternant avec une mise à pression atmosphérique. Dans nos conditions, 500 ml de digestats ont été dégazés en moins de 10 minutes. Il est possible que des digestats frais, plus riches en CO_2, nécessitent un laps de temps plus long. Des vides moins poussés de –400 mbar et de –600 mbar ont aussi été testés avec respectivement un effet négligeable et peu performant. Il faut noter que l'ajout d'un anti-mousse à ce stade n'a aucun effet.

Une automatisation de ce processus peut être envisagée en plaçant un détecteur de présence de mousse dans le haut de la cuve de pré-traitement. Par exemple deux aiguilles en acier inoxydable détecteront la montée de mousse jusqu'à leur niveau (variation de résistance électrique) et pourront via un asservissement, déclencher une vanne de mise à pression atmosphérique. Cette vanne se refermera automatiquement lorsque la mousse ne sera plus en contact avec les aiguilles et que la résistance électrique entre les aiguilles sera proche de l'infini.

Une autre alternative, testée ultérieurement, est de favoriser un grand volume d'évaporateur de l'ordre de 5 à 6 fois le volume de digestat à évaporer. Cette solution est assez simple à mettre en œuvre et est privilégiée pour le passage à l'échelle réelle.

5.2. Evaporation

Après dégazage, les digestats sont évaporés sous vide (-800 mbar) pendant une heure à la température de 80°C maintenue dans un bain-marie. Un vide moins poussé ralentit fortement le processus. Pour 1l de digestat, la quantité d'eau évaporée atteint environ 200-300 ml soit une évaporation de l'ordre de 25 %. Les digestats concentrés se présentent sous la forme d'un liquide visqueux mais probablement suffisamment fluide pour le pompage. Il peut être envisagé de sécher d'avantage ce concentrat sur un séchoir à bande sans risque de perdre l'ammoniac puisque ce gaz a déjà été piégé au niveau du condensat.

Le condensat recueilli est un liquide limpide et jaunâtre montrant un pH alcalin de 9.4. La teneur en NH_3 déterminée par colorimétrie atteint 10g/l de condensat. Une rapide recherche bibliographique indique la possibilité de précipiter le NH_3 sous forme de struvite. Il serait alors nécessaire de recueillir le sel formé par centrifugation / filtration / décantation. Une autre approche envisagée et la fixation de l'azote par des algues nitrophiles dont la récolte permettrait la récupération de l'azote à des fins agronomiques.

Pilote d'évaporation sous vide réalisé à l'échelle du laboratoire au CRP-Gabriel Lippmann : à gauche l'unité de pompe à vide (-800 mbar), au centre le réservoir de condensat avec son arrivée et retour d'eau froide (4°C, tubes bleu et rouge), à droite le bain-marie thermostatisé à 80°C avec la bouteille servant de cuve d'évaporation.

Remerciements : Les auteurs remercient chaleureusement Monsieur Pierre Cherry pour ses conseils avisés.

ACTION 2 :

Installation Biogas Biekerich soc. coop.

1. Biogas Biekerich soc. coop. : Biogaz et réseau de chaleur

Début des années 2000, plusieurs agriculteurs s'intéressent à la biométhanisation. La commune de Beckerich souhaite chauffer les bâtiments collectifs et une partie de la commune en énergie verte. En 2002, une étude de faisabilité positive donne le feu vert pour une installation de biométhanisation couplée avec un réseau de chaleur.

La coopérative «Biogas Biekerich» réunissant 18 agriculteurs a été créée en 2003. L'installation de biométhanisation de 600 kW ainsi que le raccordement des premiers habitants au réseau de chaleur communal sont opérationnels depuis 2004.

Ces agriculteurs sont installés dans un rayon de 6 km au sein de la commune de Beckerich. 12 cuves de stockage remplies de digestat sont réparties à moins de 500 m des champs à fertiliser permettant aux agriculteurs de faire des trajets plus courts et moins polluants.

Le biogaz alimente un module de cogénération qui produit de l'électricité rachetée par la société nationale d'électricité et de la chaleur rachetée par la commune pour l'équivalent de 120 foyers. Chez le particulier, plus de chaudière à mazout ni de cuve. A la place, un échangeur de chaleur alimentant l'eau sanitaire et l'eau de chauffage.

Le réseau de chaleur de 14 km aller/retour est alimenté conjointement par le biogaz, par une chaudière à copeaux de bois de 2 MW fonctionnelle d'octobre à avril, par une chaudière à mazout utilisée en cas de panne, d'entretien et lors des pics de consommation.

En juin 2011, 138 maisons privées, 6 entreprises et 14 bâtiments communaux sont raccordés au réseau de chaleur.

En 2012, le remplacement de la co-génératrice Jenbacher par un nouveau module Liebherr de 500 kW a été effectué.

2. Installation Biogas Biekerich soc. coop. : Situation 2012

Coopérative	18 agriculteurs
Date Installation	2004
Localisation	Meimerich L-8538 Hovelange
Superficie exploitée	1.430 hectares
Animaux	2.164 UGB
Substrats	Lisier/fumier (77 %), maïs et céréales (14 %), déchets verts et agro-alimentaires (9 %) Total : 32.000 t/an
Unités de cogénérations	Liebherr (500 kW), Schnell (100 kW) Total de 600 kW
Chaudière	Buderus 1.785 kW
Digesteurs	2 digesteurs de 1.270 m^3 2 Post digesteurs de 1.270 m^3 3 cuves de stockage de 1.500 m^3
Production	4.600 $MWh_{él}$; équivalent de 1000 ménages 5.600 MW_{th}
Valorisation de la chaleur	Réseau de chaleur vers la commune pour +/- 3.600 MW_{th}/an
CO_2 économisé	**1.515 t/an** Ce qui représente **12.120.000 km** parcouru par une voiture à 125 gr CO_2/km soit **303 tours de la terre**

Infos techniques

Biogas Biekerich soc.coop
Meimerich
L-8538 Hovelange

Constant Kieffer - Responsable technique
Tél : +352 26 62 31 21
biogas.biekerich@email.lu

Contacts visites

Asbl d'Millen
103, Huewelerstrooss
L-8521 Beckerich

Isabelle Bernard
Tél : +352 691 510 372
info@dmillen.lu – www.dmillen.lu

ACTION 2 :

Installation BioRecycle 100 % BIO (Francis Claudepierre)

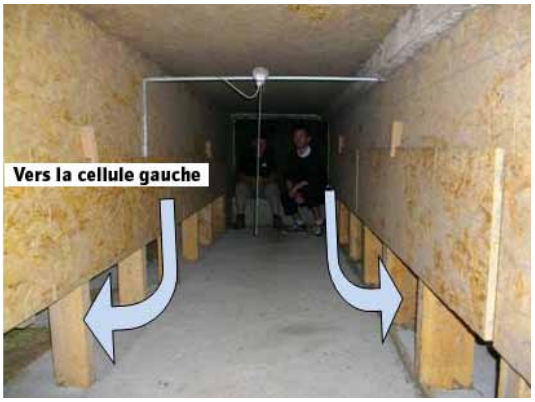
1. Installation BioRecycle : Biogaz, réseau de chaleur et séchage foin

En 2000, Francis Claudepierre innove en décidant la création de la première installation française de biométhanisation au sein d'une exploitation agricole. Le démarrage de l'installation d'une puissance de 21 kW débute en 2003.

En 2007, la SARL BioRecycle est créée et l'étude de l'agrandissement de l'installation en intégrant digesteur et post digesteur (système tank in tank) est lancée. L'installation d'une puissance totale installée de 280 kW est opérationnelle en décembre 2009.

Le partenariat d'OPTIBIOGAZ a soutenu la valorisation de la chaleur par le développement du réseau de chaleur et a également contribué au développement du suivi des intrants par l'installation d'un pont à bascule. L'exploitation a également valorisé une partie de la chaleur par une installation de séchage de foin.

Le séchage permet de récolter en toute saison des fourrages d'une très haute qualité nutritive; ce qui rend l'exploitation plus indépendante du marché des compléments nutritionnels.



2. Installation BioRecycle : Situation 2012

Cellule de séchage de foin

Propriétaire:	Francis Claudepierre
Date Installation	déc-09
Localisation	La Borde FR-54540 Mignéville
Superficie de la ferme	115 hectares 20 hectares en cultures 95 hectares en herbe
Animaux	70 vaches laitières (400.000 litres par an) 110 UGB
Substrats	Lisier/fumier (38%), maïs (25%), déchets verts et agro-alimentaires (36%) total: 5.500 t/an
Unités de cogénérations	255 kW installés
Production	1.700 $MWh_{él}$ 1.850 MW_{th}
Valorisation de la chaleur	Séchage de foin : 700 MW_{th} Réseau urbain : 200 MW_{th}
CO_2 **économisé**	**219 t/an** Ce qui représente **1.752.000 km** parcouru par une voiture à 125 gr CO_2/km soit **44 tours de la terre**

Contact

Bio Recycle SARL
La Borde,
F-54540 Mignéville

Francis Claudeppierre
Tél : + 33 383 72 20 06

francis.claudepierre@wanadoo.fr

ACTION 2 :

Installation Kessler SCRL (Jean et Nicolas Kessler)

1. Installation Kessler SCRL : Biogaz et séchage du digestat

La ferme du Faascht a été construite en 1855 mais c'est en 1948 que la famille Kessler en devient propriétaire. Située dans le Parc naturel de la Vallée de l'Attert, la ferme du Faascht développe une agriculture respectueuse des meilleurs équilibres écologiques, notamment dans un premier temps par le compostage des fumiers. Séduits par les nombreuses unités de biométhanisation installées au Grand-Duché de Luxembourg et en Allemagne, les frères Kessler ont manifesté leur souhait de diversifier leur exploitation en devenant également «cultivateurs d'énergie renouvelable». Relais de cet engouement, l'asbl «Au Pays de l'Attert» a été la cheville ouvrière du projet Energattert (janvier 2002-décembre 2004) ; 5e programme-cadre, soutenu par la commission européenne, la Région Wallonne et la Province du Luxembourg. Début 2003, l'installation démarre avec deux moteurs dual-fuel pour une puissance totale de 160 kW, deux digesteurs de 750 m^3 et une cuve du stockage final de 2500 m^3.

En fonction de l'évolution des marchés et des aides en Région wallonne (les certificats verts), il devenait incontournable de renforcer l'installation par le placement d'un moteur 100 % biogaz afin d'atteindre une taille économiquement viable (2005). Afin de valoriser au mieux la chaleur et de réduire le volume d'épandage, un tapis de séchage permettant de traiter 4000 tonnes de digestat a été installé en 2007. Cet investissement permet d'obtenir +/- 380 tonnes de granulés fertilisants à 93 % de matière sèche avec des valeurs NPK= +/-25-45-35. La collaboration et les recherches du partenariat d'OPTIBIOGAZ ont permis de démontrer le potentiel méthanogène encore disponible dans les différentes installations pilotes. Pour Faascht, ces recherches ont conduit à la couverture de la fosse de stockage afin d'augmenter le temps de séjour des matières de 30 à 60 jours. En 2008, un moteur 100 % biogaz a remplacé un moteur dual fuel pour arriver à une puissance installée de 750 kW. Le partenariat d'OPTIBIOGAZ a également suivi et soutenu l'automation de l'alimentation des digesteurs et a permis de mettre en place un broyeur des intrants ce qui a amélioré la digestion et diminué les contraintes techniques du flux de la matière. Le partenariat a installé un nez électronique fin 2011 afin de suivre l'évolution du biogaz en fonction du processus de biométhanisation et dans le but de poursuivre l'automation de l'installation.

La ferme du Faascht fut également active dans le projet Rife2 qui avait pour objectif de faire émerger des bonnes pratiques en matière d'environnement. Cette démarche a permis à la ferme d'obtenir la certification **ISO 14001** fin 2011 dans le cadre d'un management environnemental incluant la sécurité des personnes et des biens, la gestion des déchets et les bonnes pratiques environnementales.

En 2012, la commune d'Attert a participé au championnat des énergies renouvelables. Elle s'est classée troisième et a été nommée «CAPITALE 2012 DE LA BIOMASSE». La ferme du Faascht fournit plus de 50 % de l'électricité consommée sur la commune.

Digestat séché

2. Installation Kessler – Situation 2012

Propriétaires :	Jean et Nicolas Kessler
Date Installation	janv-03
Localisation	Ferme du Faascht, 131 6717 Attert
Superficie de la ferme	230 hectares
Animaux	100 vaches laitières 100 vaches allaitantes : 50 % Limousin et 50 % Blanc Bleu 300 animaux d'élevage et d'engraissement +/- 380 UGB
Substrats	Lisier/fumier (33 %), maïs (8 %), déchets verts et agro alimentaires (54 %) total : 18.000 t/an
Unités de cogénérations	Dual fuel (1x80 kW), Deutz (1x310 kW), Man (1x360 kW) total de 750 kW
Digesteurs	2 digesteurs de 750 m^3 1 digesteur de 2.400 m^3 1 post digesteur de 4.000 m^3 1 cuve de stockage de 4.500 m^3
Production	5.800 $MWh_{él}$ 7.200 MW_{th}
Valorisation de la chaleur	Séchage de 4.000 t/an du digestat avec +/- 5.000 MW_{th}/an Production d'engrais sec en granulés : 380 t/an
CO_2 **économisé**	**3.211 t/an** Ce qui représente **25.688.000 km** parcouru par une voiture à 125 gr CO_2/km soit **642 tours de la terre**

Contact

Kessler SCRL
Ferme du Faascht, 131 - 6717 Attert

Jean et Nicolas Kessler
Tél : +32 63 22 77 65
Jean.kessler@scarlet.be

ACTION 2 :

Installation Biogas Rohlingerhof (Matthias Kohl)

1. Installation Biogas Rohlingerhof : Biogaz et séchage de bois

Depuis plusieurs générations, la ferme de Rohlinger appartient à la famille Kohl. Les revenus de la ferme étaient principalement générés par la production de lait jusqu'en 2001.

Dans le courant 2001, c'est à Rohlingerhof qu'a vu le jour une des premières unités de biométhanisation de Rhénanie-Palatinat d'une puissance de 55 kW. Cette installation utilisait principalement le lisier et fumier de l'exploitation agricole.

En 2006, la puissance installée est passée à 250 kW. L'installation utilise des matières organiques majoritairement cultivées sur les terres de l'exploitation de 170 hectares.

Le projet OPTIBIOGAZ a permis à l'exploitant de l'installation, Matthias Kohl, de se concentrer sur la production rentable de biogaz, d'échanger les expériences et d'améliorer la technique de l'installation. Ces collaborations entre partenaires ont conduit à la transformation d'une cuve ouverte en post digesteur étanche pour la récupération du méthane résiduel avec le raccordement des conduites de biogaz vers la conduite existante.

L'installation se compose actuellement d'une préfosse de 460 m^3, d'un digesteur chauffé de 900 m^3 et d'un post digesteur de 1.600 m^3.

Ces investissements ont permis de réduire considérablement les émissions de CO_2. La production supplémentaire de biogaz a engendré une augmentation de la production de chaleur. En l'absence d'utilisateur à proximité, la chaleur est valorisée pour le chauffage de la ferme et alimente un séchoir à bois.

L'acquisition d'un semoir a permis d'adopter une nouvelle culture de maïs sans labour ce qui réduit fortement les émissions de GES de l'exploitation.

2. Installation Biogas Rohlingerhof : Situation 2012

Propriétaire :	Matthias Kohl
Date Installation	2001
Localisation	Biogas Rohlingerhof D-54439 Palzem
Superficie de la ferme	170 hectares
Animaux	140 têtes
Substrats	Lisier/fumier (34 %), maïs (62 %), foin ensilé(4%) total : 5.400 t/an
Unités de cogénérations	Dual fuel (1x250 kW)
Digesteurs	1 pré fosse de 460 m^3 1 digesteur de 900 m^3 1 Post digesteur 1.600 m^3
Production	1.800 $MWh_{él}$ 1.800 MW_{th}
Valorisation de la chaleur	Séchage de bois 250 - 500 t/an
CO_2 économisé	**367 t/an** Ce qui représente **2.936.000 km** parcouru par une voiture à 125 gr CO_2/km soit **74 tours de la terre**

Contact

Biogas Rohlingerhof
D- 54439 Palzem

Matthias Kohl
Tél : +49 65 83 17 91
matthiaskohl@t-online.de
biogas@rohlingerhof.de

ACTION 3 :

Impacts environnementaux des unités de biométhanisation

Université de Liège – Arlon Campus Environnement

Jacques NICOLAS – Roland NEYRINCK – Christophe CERISIER – Yolanda ÚBEDA SANCHEZ – Cédric WACZEK
Noémie MOLITOR – Anne-Claude ROMAIN

Avec la collaboration de l'ensemble du partenariat

1. Introduction

L'action 3 du projet OPTIBIOGAZ consiste à évaluer l'impact environnemental de la biométhanisation. Ce travail aborde donc les différents impacts environnementaux en insistant plus particulièrement sur l'impact olfactif des unités de biométhanisation en milieu rural. L'objectif plus particulier poursuivi ici est de montrer de manière la plus objective possible si les unités de biométhanisation ont une incidence positive ou négative sur l'émission d'odeur par rapport aux installations agricoles classiques sans unité de biométhanisation.

2. Mesure des odeurs

Plusieurs méthodes d'évaluation des émissions odorantes et de leur impact sur l'environnement ont été appliquées dans le cadre du projet. En ce qui concerne plus spécifiquement l'émission odorante, deux méthodes ont essentiellement été utilisées. Il s'agit de l'olfactométrie dynamique et de l'olfactométrie déambulatoire.

La première méthode consiste à prélever un échantillon d'odeur de 60 à 80 litres dans l'ambiance ou à proximité de la source dans un sac en plastique chimiquement neutre. De retour au laboratoire, l'échantillon est alors soumis à une olfactométrie dynamique, respectant la norme européenne EN13725. Il s'agit de faire flairer à un panel de 6 personnes des dilutions variables de l'odeur dans de l'air pur inodore. Le nombre de fois qu'il a fallu diluer l'échantillon pour arriver, en moyenne pour le panel, au seuil de perception olfactive, est, par définition, la concentration de l'odeur prélevée, exprimée en unités-odeur par mètre cube (uo/m^3).

A partir de cette concentration, mesurée par exemple dans une cheminée d'extraction de l'air vicié ou en un endroit représentatif du local où sont produites les odeurs, on peut déduire le débit d'odeur, c'est-à-dire le flux d'odeur sortant vers l'extérieur de l'entreprise et pouvant gêner les riverains. Pour cela, il faut, en plus, mesurer le débit de l'effluent, en m^3/s. En multipliant alors la concentration d'odeur (uo/m^3) par ce débit d'effluent, on obtient le débit d'odeur (en uo/s).

Or, le débit d'un effluent odorant ne peut être mesuré que si l'évacuation est canalisée, ce qui n'est pas le cas d'une source diffuse comme un tas de fumier, un entreposage de lisier ou une prairie après épandage. Lorsque la source est surfacique, on utilise alors une chambre de flux, dont le côté inférieur est ouvert et est posé sur la surface odorante. Un gaz porteur neutre (azote ou air pur) pousse le flux vers le sac de prélèvement. La mesure de la concentration de l'odeur dans le sac, ajoutée aux données de prélèvement (surface au sol et débit du gaz porteur) permet d'évaluer le flux de l'odeur provenant du sol, en uo/m^{2}s. En multipliant ce flux par la surface totale d'émission, on obtient le débit d'odeur de la source surfacique (uo/s).

Dans le cas d'une source diffuse et fugitive, comme une ferme émettant des odeurs à divers endroits et en plein air, y compris par exemple des engins transportant du fumier ou déversant du lisier, la méthode préconisée est celle du traçage d'odeur sur le terrain qui peut être considérée comme une sorte d'olfactométrie déambulatoire.

Un panel d'observateurs parcourt à différentes périodes la région affectée par la pollution olfactive. Pour chaque période, il définit sur le terrain la courbe limite de perception de l'odeur étudiée, en notant tous les points de transition entre «odeur» et «non odeur». Durant la même période (environ 40…60 minutes), les données météorologiques sont enregistrées (vitesse et direction du vent, température et radiation solaire). Ces données sont ensuite introduites dans un modèle de dispersion atmosphérique. La simulation vise alors, par «rétro-calcul», à ajuster le débit d'émission d'odeur qui produirait, avec les conditions météorologiques du moment, la courbe limite réellement observée sur le terrain.

Ceci permet donc d'évaluer le débit d'émission propre à cette période de mesure. En considérant plusieurs périodes d'investigation, étalées dans le temps et si possible avec différentes conditions de climat et d'exploitation, la méthode permettra donc d'évaluer plusieurs débits d'odeurs dont la moyenne peut être considérée comme débit d'odeur typique du site.

Ce débit typique peut ensuite être introduit dans le modèle de dispersion pour calculer, sur base de données météorologiques annuelles, une zone de nuisance potentielle, qui tient compte non seulement du niveau de l'odeur dans l'environnement, mais également du temps de sa perception (percentile 98).

Enfin, un questionnaire a été proposé aux exploitants visant l'évaluation du potentiel odorant de leur installation (type et quantité de matière, manipulation, épandage, . . .).

3. Sites étudiés

Pour la **ferme de Faascht** à Attert (Belgique), les principales sources odorantes potentielles sont les étables, les stockages de matières entrantes, de déchets ou de digestats solides ou liquides, l'évacuation d'air du sécheur de digestat et éventuellement les gaz brûlés émis par le moteur. L'épandage du digestat peut également générer une odeur. Remarquons que, parmi les 4 installations étudiées, celle de la ferme de Faascht est la seule qui mette en œuvre une séparation des deux phases du digestat. La partie liquide déshydratée est commercialisée sous forme de granulés séchés et le reste est épandu sur les prairies.

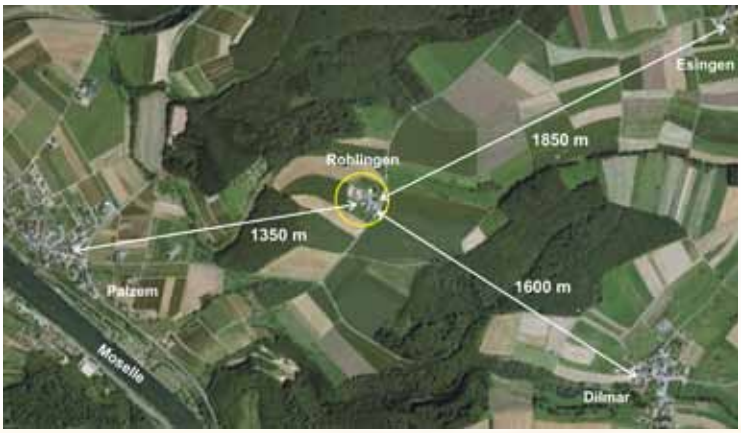
Dans les environs de la ferme, le plus proche riverain est une autre ferme, située à 400 mètres au sud du site. Les autres riverains sont les habitants des villages d'Attert, à 2 km vers l'ouest, de Grendel, à 1 km vers le nord-nord-ouest et de Colpach-Bas, au Grand Duché de Luxembourg, à environ 1.5 km au nord-est.

Quant à **Biogas Beckerich** (Grand Duché de Luxembourg), sa particularité est qu'elle n'est pas directement liée à une exploitation agricole, mais émane d'une coopérative de 18 exploitations agricoles situées dans la région. Chaque agriculteur vient y déposer ses lisiers et ses fumiers et s'approvisionne en échange de digestat. Les odeurs ne peuvent être émises que par les zones de stockage des matières entrantes, essentiellement les matières solides ou lors de l'arrivage et du déversement des lisiers dans la préfosse ainsi que par l'épandage du digestat. Il s'agit d'une installation intéressante, dans la mesure où il n'y a pas addition des odeurs générées par l'activité agricole (les étables) avec celles émises par l'activité de biométhanisation. Le débit d'odeur mesuré à Beckerich n'est dû qu'à la biométhanisation.

Dans le voisinage de l'entreprise, on relève quelques riverains isolés à environ 500 mètres à l'ouest et au sud du biométhaniseur et quelques agglomérations plus importantes entre 750 mètres et 1400 mètres.

Biogas Rohlingerhof à Palzem (Allemagne) stocke son digestat dans une cuve couverte et son lisier dans une cuve enterrée, directement connectée au digesteur. Le digesteur est lui-même en sous-sol. Hormis les fientes de poules et l'ensilage de maïs, il n'y a donc pas de stockage aérien des matières.

Dans les environs, le village de Palzem est situé à environ 1350 m à l'ouest, avec les riverains les plus proches à environ 1150 m. Esingen est à 1850 m au nord-est et Dilmar à 1600 m au sud-est. Il n'y a donc aucune habitation dans les environs immédiats du site de biométhanisation.



L'installation **BioRecycle à Mignéville** (France) a subi de profonds changements au cours du projet OPTIBIOGAZ et fut un peu moins étudiée que les autres. Hormis les ensilages, il n'y a pas de stockage aérien des matières entrantes. Les effluents liquides sont stockés dans une cuve en sous-sol. Le dégagement d'odeur devrait être très réduit, car les installations sont essentiellement fermées.

Dans l'environnement, outre les exploitants, les premiers riverains du site sont ceux du petit village de Mignéville (170 habitants), à environ 400 mètres vers l'ouest. Les autres riverains sont beaucoup plus éloignés et ne risquent pas d'être atteints par les odeurs éventuelles de BioRecycle.

4. Démarche d'évaluation des odeurs

Plusieurs démarches ont été appliquées pour évaluer l'impact olfactif spécifique de la biométhanisation dans les fermes.

- Une analyse-matière permet
  - d'une part, de mettre en évidence la relation entre l'odeur et les caractéristiques chimiques des gaz émis au dessus des matières présentes dans les exploitations,
  - d'autre part, d'analyser les différences entre les émissions d'odeur en provenance des différentes matières.
- Une analyse d'ambiance permet de se faire une idée de la concentration d'odeur dans l'ambiance de divers postes rencontrés dans les installations.
- Une analyse de l'environnement a comme but d'évaluer la propagation et la dispersion de l'odeur dans le voisinage des exploitations.
- Une étude particulière de l'émission d'odeur générée par l'épandage de lisier, fumier ou digestat permet d'apprécier l'impact olfactif spécifique de l'épandage de chaque matière.

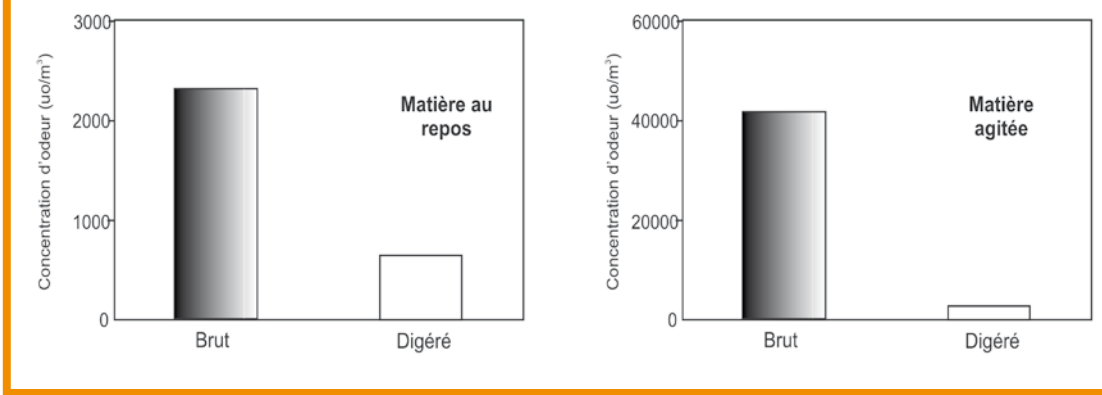


Figure 1 : Moyennes des concentrations d'odeur (uo/m3) dans l'air échantillonné au dessus des matières brutes ou digérées.

5. Analyse matière

Une première approche a consisté à évaluer l'effet de la digestion anaérobie sur la concentration et la composition de l'odeur. Ainsi, l'analyse des acides gras volatils (AGV) de l'effluent digéré (digestat) a été comparée à celle de l'effluent brut (lisier). Il en résulte que la réduction est significative (de 77 à 96%) pour la plupart des acides gras mesurés.

Une forte corrélation a été mesurée dans le lisier brut entre la concentration en AGV et la concentration de l'odeur qu'il dégageait (coefficient de corrélation en moyenne autour de 0.9, très proche de 1, qui traduirait une liaison idéale entre les deux variables). Par contre, pratiquement aucune relation entre AGV et odeur n'est observée dans le digestat.

Cette diminution des composés susceptibles de participer à l'odeur est confirmée par l'analyse olfactométrique. La concentration de l'odeur dans les échantillons d'air prélevés au-dessus de la matière est significativement plus faible après digestion, que ce soit pour la matière au repos ou pour la matière après agitation (figure 1).

En dépit de cette différence d'odeur, il a également été démontré que la digestion anaérobie n'avait que peu d'effet sur la composition de l'effluent d'élevage et donc sur sa qualité fertilisante.

Quelques flux d'odeurs ont ensuite été déterminés pour différentes matières, sur base d'échantillons prélevés via une chambre de flux (figure 2).

De manière générale, il est constaté :

- un flux d'odeur peu variable et relativement faible pour le digestat liquide en cuve, aux alentours de 1 uo/m^{2}s;
- des flux d'odeur assez variables mais assez faibles également pour les matières solides habituellement rencontrées dans les fermes (fumier, aire paillée dans une étable, . . ., de 0.7 à 3 uo/m^{2}s);
- des flux plus importants pour le lisier (jusqu'à 70 uo/m^{2}s);
- des flux extrêmement variables pour les matières premières stockées avant digestion, pouvant aller jusqu'à 515 uo/m^{2}s pour le co-produit liquide issu de l'industrie alimentaire.

6. Analyse d'ambiance

Lors d'une deuxième approche, la concentration d'odeur a été mesurée dans l'ambiance à proximité de différentes matières ou dans des locaux de stockage, de manipulation ou de traitement des matières. Ces concentrations dépendent fortement de l'endroit précis où le prélèvement a été effectué, mais leur variabilité et leur comparaison relative peut apporter un éclairage intéressant.

Il est observé des odeurs assez fortes dans les fosses à lisier (jusqu'à pratiquement 300 000 uo/m^3), mais également très variables au cours du temps (dès qu'une croûte se forme sur le lisier, l'odeur est moins forte). Par ailleurs, cette odeur est rarement transmise vers l'extérieur du site, car les fosses sont couvertes. Seules l'arrivée de la matière et sa manipulation peuvent éventuellement générer une nuisance olfactive dans l'environnement.

L'odeur reste raisonnablement faible dans les cuves de stockage du digestat (entre 83 et 8500 uo/m^3) et même au-dessus du tapis de séchage, à Faascht (entre 600 et 1400 uo/m^3).

Par contre les co-produits solides ou liquides de l'industrie agro-alimentaire peuvent s'avérer extrêmement odorants en fonction de leur origine et de leur état de fermentation (plus de 500 000 uo/m^3).

Ces mesures d'ambiance confirment une tendance générale d'une odeur plus faible pour la matière digérée par rapport à la matière brute. Cette dernière odeur est cependant extrêmement variable selon le type de matière et son évolution temporelle.

Figure 2 : Echantillonnage d'air odorant au-dessus de lisier prélevé dans une cuve à Faascht.

7. Analyse dans l'environnement

Une troisième étape a consisté à réaliser un certain nombre de «tours odeurs» dans l'environnement, suivis de rétro-calculs afin d'estimer le débit d'odeur global des installations.

Dans le cadre du présent projet, la campagne d'olfactométrie déambulatoire a consisté en 3 mesures à Faascht, (19/06, 28/08 et 10/09/2009), 3 mesures à Beckerich (05/05, 06/07 et 13/07/2009) et 2 mesures à Palzem (22/06 et 07/07/2009).

Le tableau 1 résume les résultats obtenus, exprimés en débit d'odeur global et en distance maximale de perception dans le sens du vent.

En synthèse, l'odeur perçue dans l'environnement des installations est surtout due aux stockages et à la manipulation des matières premières à biométhaniser. Dans le cas de Faascht, la cheminée du sécheur de digestat contribue pour une bonne part à l'odeur globale.

Le débit d'odeur moyen pour toutes les mesures réalisées est de 20 500 uo/s, avec une distance de perception de l'ordre de 400 mètres. Un tel débit reste faible par rapport à des installations de compostage ou à des décharges d'ordure (de l'ordre de 60 000 … 120 000 uo/s). Il peut plus ou moins être comparé à un élevage de 1000 porcs ou encore de 1400 vaches laitières.

Tableau 1 : Résultats des mesures d'odeur sur le terrain

Lieu	Date	Débit d'odeur (uo/s)	Distance max de perception (m)
Faascht	19/06/2009	79 384 uo/s	600 m
	28/08/2009	10 725 uo/s	250 m
	10/09/2009	23 553 uo/s	430 m
Beckerich	05/05/2009	7 306 uo/s	300 m
	06/07/2009	43 752 uo/s	500 m
	13/07/2009	10 942 uo/s	300 m
Palzem	23/06/2009	24 197 uo/s	300 m
	07/07/2009	18 593 uo/s	500 m

La zone de nuisance olfactive (déterminée par le percentile 98 pour 1 uo/m^3) s'étendrait ainsi jusqu'à une distance maximale dans la direction du vent de l'ordre de 450 mètres, qui, pour les sites étudiés, n'inclurait pratiquement aucun riverain.

8. Odeur après épandage

Plusieurs mesures olfactométriques ont été réalisées directement après épandage et quelques heures après épandage dans les fermes d'Attert et de Palzem, en été 2009, au printemps 2011 et au printemps 2012. Un échantillon d'odeur en sac Tedlar a été prélevé via une chambre de flux placée sur la surface du sol. Le sac a ensuite fait l'objet d'une analyse par olfactométrie dynamique, afin de déterminer le flux d'odeur en ou/m^{2}s.

Les mesures à la ferme de Faascht à Attert sont relativement cohérentes entre elles. Le flux d'odeur émis à partir du sol juste après l'épandage vaut 0.223, 0.216, 0.202 et 0.253 uo/m^{2}s pour des mesures réalisées à différents moments avec du digestat concentré ou dilué. A Palzem, les valeurs sont plus élevées: 0.93, 1.6 et 2.6 uo/m^{2}s pour les 3 mesures réalisées. La différence des flux d'émission d'odeur entre Faascht et Palzem viennent probablement plus de la méthode d'épandage (déposé à Faascht et projeté à Palzem) que de la matière épandue.

Une mesure intéressante a été réalisée début juin 2011 à Attert, à la fois sur des surfaces ayant reçu du lisier (projeté) et du digestat (déposé). La figure 3a montre l'évolution du flux d'odeur en fonction du temps pour les deux matières. Il semblerait que le niveau d'odeur du lisier immédiatement après épandage soit plus élevé et qu'en outre, il décroisse

plus lentement que celui du digestat. Cependant, comme les techniques d'épandage étaient différentes, il est possible que cette impression d'odeur moins importante du digestat ne soit due qu'au fait qu'il était déposé et non projeté.

La figure 3b montre l'évolution du flux d'odeur après une mesure réalisée en mars 2012, en utilisant cette fois la même technique (le dépôt par pendillards) pour les deux types de matière.

Lorsque l'incertitude de la mesure est prise en compte (barres d'erreur verticales), il devient délicat de conclure, sur base de cet ajustement, que l'odeur du lisier est plus persistante que celle du digestat, même s'il y a une légère tendance dans ce sens.

En toute objectivité, la mesure de mars 2012 semblerait montrer qu'à techniques d'épandage équivalentes (pendillards), les flux d'odeur et leur décroissance temporelle sont pratiquement identiques pour les deux matières déposées. Il reste cependant indéniable que tous les observateurs de terrain ont l'impression d'une plus forte odeur de lisier, même quelques jours après épandage. Cela peut être imputable au caractère hédonique de l'odeur, celle du lisier étant beaucoup plus désagréable que celle du digestat.

9. Conclusion

Le présent rapport s'attarde surtout sur les nuisances olfactives. Quelques autres impacts environnementaux ont également été brièvement abordés, comme le paysage (éventuellement impact des zones de stockage et des bâches colorées), les eaux usées (percolation à travers des volumes de stockage importants, mais hygiénisation de la matière après digestion et donc moins de problèmes sanitaires), le bruit (essentiellement les moteurs ou les installations de séchage de digestat, mais situés dans des locaux fermés) et le charroi (augmentation du nombre de véhicules transportant les matières).

En conclusion, il est difficile, sur base des différentes observations, d'affirmer qu'une ferme avec biométhanisation induit plus ou moins de nuisances environnementales qu'une ferme sans biométhanisation. La variabilité au sein des installations d'un même type peut être du même ordre de grandeur que les différences entre les deux types de fermes.

Les impacts environnementaux dans les installations de biométhanisation proviennent essentiellement des plus grandes quantités de matières entrantes ou sortantes transportées, stockées et manipulées, avec des conséquences sur les odeurs, le bruit, la qualité de l'air et de l'eau.

L'hygiénisation de la matière est par contre un des avantages du processus, à la fois au niveau sanitaire et lors de l'épandage du digestat. Ce dernier semble provoquer moins d'odeur que l'épandage du lisier ou du fumier bruts, tout en restant aussi efficace pour la fertilisation des sols.

Les éventuelles pollutions restent relativement locales et l'exploitant peut aisément atténuer les nuisances dans le voisinage par un confinement adéquat des effluents et émissions au niveau des principales sources.

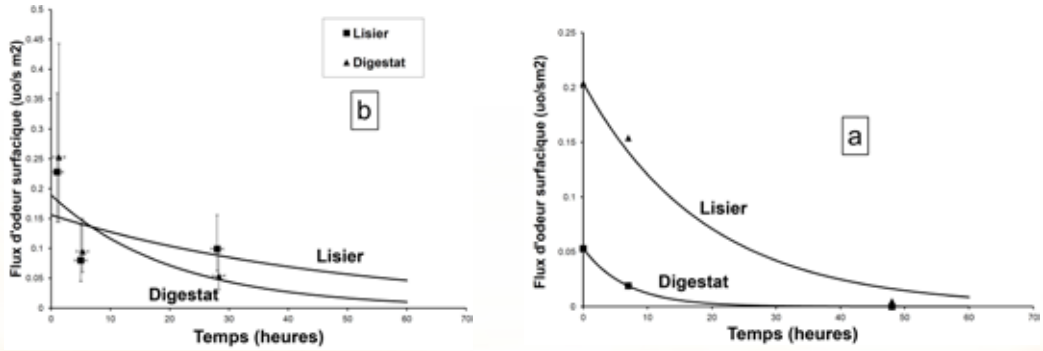


Figure 3 : Décroissance temporelle des flux d'odeur après épandage pour les mesures de juin 2011 (a) et de mars 2012 (b) à Attert.

ACTION 4 :

Réalisation d'un état des lieux / analyse des flux de matière et de l'efficacité globale d'unités de méthanisation modèles dans la Grande Région

IZES (Institut für ZukunftsEnergieSysteme)

Frank BAUR – Claudia ZIEGLER – Mikael SPRINGER – Manuel TRAPP – Katja WEILER – Beate FASSBENDER

Avec la collaboration de l'ensemble du partenariat

1. Établissement du bilan écologique

La production d'électricité issue du biogaz n'est pas par définition une technologie respectueuse de l'environnement. Dans le cadre des projets concernant le biogaz, beaucoup d'erreurs et d'omissions peuvent être commises pouvant conduire pour certaines catégories d'émissions à une performance environnementale plus mauvaise que les autres formes conventionnelles de production d'électricité. Dans le cadre des études présentement menées sur des projets biogaz, il a été montré de manière très nette que la production d'énergie à partir de biogaz présente beaucoup de possibilités d'optimisation qui peuvent mener à une performance écologique sensiblement meilleure comparée aux autres formes conventionnelles de production d'électricité (en particulier dans le domaine de la lutte contre le réchauffement climatique et de la consommation des ressources naturelles).

Les avantages et inconvénients sont résumés dans les points suivants.

Avantages de la production de biogaz et de sa conversion en électricité par rapport à la production électrique conventionnelle.

1. Dans le domaine des émissions de GES, la production d'électricité issue du biogaz présente des avantages comparés aux autres modes de production dans le cas de l'Allemagne, la Belgique et du Luxembourg. En France par contre, le mix électrique issu du nucléaire, mis à part ses autres inconvénients connus, présente dans ce cas précis des avantages comparés à la production d'électricité issue du biogaz (figure 1 : Émissions de GES pour les centrales respectives en comparaison avec les mix électriques spécifiques aux pays). Cependant, lorsque toutes les possibilités d'optimisation sont prises en compte, toutes les installations de biométhanisation considérées sont bien meilleures que ce mix électrique national. Les possibilités d'optimisation pour l'amélioration du bilan climatique peuvent ici s'effectuer sur plusieurs plans. Concernant les flux entrants, les centrales à combustibles lourds ont tendance à délivrer de meilleurs résultats que les centrales s'orientant vers les matières premières renouvelables

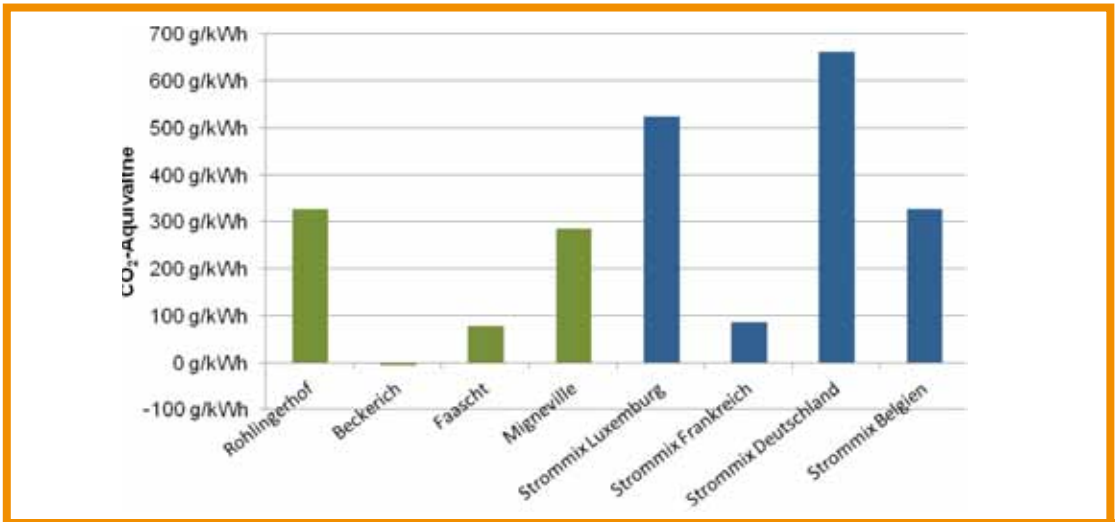


Figure 1 : Émissions de GES pour les centrales respectives en comparaison avec les mix électriques spécifiques aux pays

naturelles. L'utilisation du lisier a des conséquences particulièrement positives dans cette catégorie. D'autres possibilités d'amélioration découlent aussi des cultures énergétiques, du confinement des centrales (fosses de stockage), du rendement du moteur, de l'efficacité d'exploitation de la chaleur résiduelle (effet de substitution) tout comme de la gestion efficace du digestat et des fertilisants.

2. Potentiel de destruction de la couche d'ozone : de même dans cette catégorie, la production d'électricité issue du biogaz se dessine comme étant avantageuse par rapport à la production conventionnelle d'électricité. L'installation de Rohlingerhof enregistre, en tant que centrale à biogaz, le plus fort potentiel de formation d'ozone. Cela s'explique d'une part par le type de culture et d'autre part par les longs trajets nécessaires pour le transport. Vis-à-vis de cette installation, le mix électrique français possède un léger avantage sur ce point.
3. Utilisation des ressources : dans cette catégorie, un avantage certain est à enregistrer en faveur de l'utilisation du biogaz comme source d'énergie vis-à-vis de la forme de production électrique conventionnelle.

Inconvénients de la production de biogaz et de sa conversion en électricité par rapport à la production électrique conventionnelle.

1. Potentiel d'acidification : dans ce domaine, toutes les installation de biométhanisation obtiennent de mauvais résultats comparées aux autres formes conventionnelles de production d'électricité, indépendamment de la technique et des matériaux d'entrée. D'importantes émissions sont en effet libérées pendant toutes les étapes de la production. Mise à part la culture, les émissions de NH_3 provenant de la fermentation jouent avant tout un rôle. Leurs taux dépendent aussi bien des installations techniques (confinement de la zone de stockage du digestat) que des substrats utilisés. Le séchage du digestat est à surveiller pour éviter les pertes en azote (par ex. pour l'adaptation du pH).
2. Potentiel d'eutrophisation : dans ce domaine tout comme dans celui de l'acidification, toutes les installations de biométhanisation obtiennent distinctement de mauvais résultats par rapport aux autres formes conventionnelles de production électrique. Une utilisation intensive du lisier a des conséquences négatives en raison de l'augmentation des émissions d'ammoniac.
3. Smog d'été : dans cette catégorie, aucune affirmation ne peut être faite. En prenant en considération les données utilisées dans cette étude sur les rejets de NOx par les moteurs fonctionnant au biogaz, la production électrique issue du biogaz affiche un bilan légèrement inférieur comparée aux autres méthodes conventionnelles de production électrique. Il faut veiller à régler de manière appropriée le moteur. Ces émissions peuvent être réduites en utilisant un système permettant la diminution des gaz polluants (par ex. pot catalytique).
4. Utilisation des ressources : en raison non seulement d'une plus faible densité d'énergie pour la biomasse comparée aux énergies fossiles/nucléaires mais aussi de la mise à disposition des terrains, la consommation en termes de surfaces utilisées pour la culture de la biomasse, est sensiblement plus élevée pour les installations de biométhanisation que pour les autres installations courantes de production électrique. La production d'électricité par la biomasse ou le biogaz doit entraîner obligatoirement des mesures de sensibilisation concernant l'utilisation des surfaces, pour faire face de manière durable à l'inéluctable consommation de celles-ci dans le contexte régional actuel.

La production électrique issue du biogaz représente une alternative judicieuse aux formes conventionnelles de production d'électricité, en particulier dans une perspective de lutte contre le changement climatique. Cependant, un équipement technique approprié et de qualité des installations tout comme une gestion durable des terres et des flux de matières sont à surveiller.

Ci-dessous, voici les approches importantes à considérer pour l'optimisation:

- du côté des flux entrants, les installations utilisant de préférence comme matière première des résidus organiques ont tendance à avoir de meilleurs effets en faveur d'une limitation du changement climatique que les installations qui utilisent de la biomasse issue de l'agriculture. L'introduction de fumier solide et du lisier a également un effet positif.

- afin de réduire les fuites de méthane, des installations totalement fermées hermétiquement devront être utilisées (ici : en particulier la fosse de stockage couverte).
- une surveillance régulière des moteurs est à réaliser pour arriver à une valeur d'émission et à une efficacité d'utilisation optimales.
- dans le domaine de l'utilisation de la chaleur résiduelle, il faut prêter une attention particulière sur les effets réels de la substitution (remplacement des combustibles fossiles).
- une gestion durable des substrats organiques et du digestat contribuent à la réduction des GES.

Les distances de transport et les infrastructures jouent généralement un rôle pour les répercutions écologiques des installations.

Les digestats épandus en agriculture sont un moyen de substitution aux engrais minéraux mais cela engendre ici une augmentation des émissions de NH_3. Pour éviter les émissions autant que possible, une technique appropriée d'épandage (rampe à pendillard) devrait être mise en application.

Dans l'ensemble, que ce soit pour les installations utilisant les cultures énergétiques ou celles utilisant des matières résiduelles, aucune préférence globale ne peut être faite. En principe, les installations utilisant des matières résiduelles sont ici considérées comme les systèmes de référence. Dans le cas d'une installation utilisant des cultures énergétiques, une bonne pratique professionnelle est à respecter. Les doses d'engrais élevées devraient être aussi absolument réduites voire évitées en raison des émissions d'oxydes nitreux.

Finalement, de manière générale, le plus haut rendement des installations est atteint : avec la production de cultures énergétiques ; puis par le placement et le stockage appropriés de l'ensilage (éviter les pertes d'ensilage) ; avec une installation sans fuite de biogaz ; et enfin par des moteurs optimisés jusqu'à l'utilisation la plus complète et la plus raisonnable des deux produits associés que sont la chaleur et le digestat.

Les recherches effectuées ne peuvent être que partiellement transposées dans un modèle existant en raison naturellement de l'indisponibilité de certaines données et de l'incertitude concernant la définition des limites du système. Néanmoins, dans le cadre des discussions menées et grâce à la transparence des hypothèses de travail choisies, elles représentent une base solide pour l'évaluation des projets de biogaz à l'échelle d'une région.

En raison de leur complexité, certains aspects de l'écocompatibilité, comme la biodiversité ainsi que les changements potentiels directs et indirects de la modification de l'occupation des sols, pourraient être seulement en partie abordés (biodiversité) ou doivent faire l'objet d'une étude séparée (changement de l'occupation des sols).

Dans un deuxième temps, les résultats de l'étude de potentiel en biomasse ont été combinés aux études environnementales effectuées pour les unités pilotes afin d'aboutir à une extrapolation pour la Grande Région. Celle-ci a permis de calculer les répercussions environnementales de l'utilisation de toutes les biomasses disponibles à l'échelle de la Grande Région en termes d'économies d'énergies et d'émissions de CO_2. Il a été déterminé que la filière biogaz pouvait éviter (en fonction de la proportion de cultures énergétiques) jusqu'à 6 million de tonnes de CO_2 comparativement au mix électrique européen actuel.

2. État des lieux et potentiels en biomasse pour la méthanisation

Le projet OPTIBIOGAZ avait également pour but de générer des données sur l'état actuel de l'expansion du biogaz dans la Grande Région en vue d'une meilleure connaissance interrégionale. Les surfaces cultivables actuelles, les installations de biométhanisation, la puissance électrique installée, les principaux matériaux d'entrée et la situation dans le domaine de l'exploitation de la chaleur sont résumés dans le Tableau 1.

Tableau 1 - Surfaces cultivables et état des lieux des centrales biogaz dans la zone du projet

	RLP	SL	BE	LO	LUX
Ensemble des surfaces cultivables	313.460	77.639	744.733	1.134.630	130.762
Ensemble des surfaces cultivées	138.390	37.903	402.741	693.726	61.765
Prairie permanente	146.054	39.394	339.565	438.400	67.362
Nbre de centrales	62	10 1*	17	2	26 3*
Puissance électr. installée	22,6 MW	3 MW	14,2 MW	1,8 MW	6,53 MW 3,7 MW*
Puissance électr. spécifique / ha de surface cultivable	0,07 kWhe/ha	0,04 kWhe/ha 0,03 kWhe/ha	0,02 kWhe/ha	0 kWhe/ha	0,05 kWhe/ha 0,03 kWhe/ha
Principaux matériaux d'entrée	Ensilage de maïs, d'herbe et de plantes entières, lisier	Ensilage de maïs et d'herbe, lisier	Déchet, lisier, fumier	Déchet, lisier	Lisier, cultures dédiées, déchets
Utilisation de la chaleur	Déficitaire	Déficitaire	Presque entièrement	Chauffage local	53 %

* Approvisionnement en gaz

Le développement de l'énergie verte dans la Grande Région n'est pour l'instant pas très satisfaisant, surtout en Belgique et en Lorraine. Cette situation peut s'expliquer par le nombre insuffisant d'objectifs politiques ambitieux, qui aboutissent à des instruments peu attractifs pour soutenir la filière.

Outre l'état actuel de l'exploitation du biogaz, les potentiels existants concernant l'expansion ont été déterminés, les résultats sont résumés dans le Tableau 2 et Tableau 3.

Tableau 2 - Potentiel de performance issue du biogaz dans les régions respectives – MIN Scénario

MIN	Lisier/fumier	Prairie	Culture énergétique	Déchets verts	Puissance déjà inst.
Wallonie	76 MWhe	0 MWhe	72 MWhe	14 MWhe	**4** MWhe
Sarre	4 MWhe	17 MWhe	6 MWhe	4 MWhe	**3** MWhe
Zones cibles RLP	15 MWhe	25 MWhe	25 MWhe	5 MWhe	**20** MWhe
Lorraine	69 MWhe	118 MWhe	123 MWhe	10 MWhe	**2** MWhe
Luxembourg	13 MWhe	0 MWhe	11 MWhe	2 MWhe	**6** MWhe
Zones cibles Grande Région	**177 MWhe**	**161 MWhe**	**237 MWhe**	**34 MWhe**	**34 MWhe**

Tableau 3 Potentiel de performance issue du biogaz dans les régions respectives – MAX Scénario

MAX	Lisier/fumier	Prairie	Culture énergétique	Déchets verts	Puissance déjà inst.
Wallonie	86 MWhe	0 MWhe	172 MWhe	14 MWhe	4 MWhe
Saare	5 MWhe	25 MWhe	17 MWhe	4 MWhe	3 MWhe
Zones cibles RLP	19 MWhe	52 MWhe	62 MWhe	5 MWhe	20 MWhe
Lorraine	69 MWhe	130 MWhe	300 MWhe	10 MWhe	2 MWhe
Luxembourg	14 MWhe	0 MWhe	27 MWhe	2 MWhe	6 MWhe
Zones cibles Grande Région	193 MWhe	207 MWhe	578 MWhe	34 MWhe	34 MWhe

Force est de constater que la Grande Région, en particulier dans les zones agricoles, offre de très bonnes conditions voire excellentes pour la poursuite de l'exploitation et l'accroissement de la filière Biogaz.

Les énormes potentiels mis à disposition, non seulement dans le domaine de l'élevage mais aussi concernant la production des matières premières renouvelables grâce aux surfaces fourragères et des terres cultivées, permettraient d'atteindre une puissance supplémentaire allant de 500 à 1.000 MWhe, en fonction du développement futur de la structure agricole. Ce qui pourraient substituer, par exemple, jusqu'à 10% des besoins en électricité de la Grande Région. Comparée aux autres régions, si l'on considère que la Grande Région est un espace ayant de grands besoins en énergie, la part possible de l'énergie issue du biogaz par rapport à l'ensemble des besoins en énergie peut encore être relativisée. En outre, pour l'avenir, une mobilisation à long terme de ce potentiel est aussi à prévoir en fonction des mesures pour l'économie d'énergie, ce qui peut faire augmenter massivement le rapport biogaz/mix d'énergie. Si le biogaz est combiné avec d'autres formes de bioénergies respectivement avec d'autres sources d'énergies renouvelables, les composants régénératifs de l'approvisionnement en énergie à l'intérieur de la Grande Région pourraient atteindre un niveau considérable.

3. Valorisation de la chaleur

Dans cette partie du rapport, les différentes possibilités d'exploitation de la chaleur ont été brièvement décrites (chauffage de locaux, séchage, chauffage de serres de culture, aquaculture, système de cycle organique de Rankine (ORC), réfrigération, séchage des boues d'épuration, traitement thermique du digestat). Ensuite, une description des différentes possibilités de transport du gaz et de la chaleur a été réalisée (réseau de chauffage urbain, stockage de la chaleur latente, microréseau de gaz, alimentation dans le réseau de gaz naturel). Pour finir, cette description est suivie d'une recherche concernant les puits de chaleur potentiels proches des centrales à biogaz existantes dans la zone du projet.

Alors que les options de séchage, les zones du processus ORC et de construction d'aquaculture sont de préférence déplacées sur le site d'implantation de la centrale à biogaz, le transport de la chaleur ou du gaz vers le puits de chaleur est courant pour le chauffage des locaux ou de serres de culture. Dans ce contexte, dans la zone du projet, les consommateurs de chaleur potentiels ont été recherchés autour des centrales à biogaz installées.

Étant donné que le transport de chaleur utilisant le stockage de la chaleur latente ne représente actuellement aucune option économique et que les rayons de transport dépendent ici fortement de la situation des sites et des infrastructures, cette option n'a pas été étudiée ici.

[1] Besoin en électricité ~ 79.511 GWh pour l'année 2007,
Source: *http://www.granderegion.lu/eportal/pages/StatTemplate.aspx?view=stat&id=351 (Facteur: 1MWh=0,086 tep)*

En raison du volume de données manquantes concernant la situation exacte des gazoducs et de la taille nécessaire des installations pour que la fourniture au réseau de gaz naturel soit rentable, cette option n'a donc pas étudiée.

Une étude a été menée pour déterminer quels consommateurs de chaleur se situent dans le rayon de l'installation à biogaz, ce qui permettrait le transport en chaleur, respectivement en gaz, par le réseau de chauffage local, respectivement de micro gaz.

Ici, les rayons de :

- 2 km pour des installations < 200 kWhe,
- 3 km pour des installations 200 – 499 kWhe et
- 5 km pour des installations > 500 kWhe

ont été établis autour des centrales à biogaz existantes.

De plus gros puits de chaleur ont été recherchés. Une évaluation des possibilités de connexion à une zone habitable proche de la centrale au biogaz a été abandonnée. Dans chacun des pays, la situation se présente de la manière suivante :

Belgique/Wallonie

En Belgique, la majorité des installations exploitent bien la chaleur. Certaines installations qui ont un bon taux de valorisation de la chaleur, ne conduisent pas à une substitution directes d'énergies fossiles. Pour la plupart, cette situation s'explique par une absence de gros consommateurs de chaleur dans un périmètre acceptable.

France/Lorraine

Dans la zone géographique déterminée par le projet, il n'existe jusque là qu'une seule installation, autour de laquelle il n'existe aucun gros consommateur de chaleur. L'installation valorise cependant une partie de sa chaleur via un réseau de chauffage à proximité et a installé un système de séchage de foin.

Allemagne / Rhénanie-Palatinat

Dans la zone géographique du projet en Rhénanie-Palatinat, il existe 62 centrales à biogaz. Seule une petite partie de la chaleur générée est utilisée. Dans l'ensemble en Rhénanie-Palatinat, 152 habitations et 25 étables sont desservies en chaleur issue d'une centrale à biogaz. 24 installations utilisent en grande partie la chaleur générée [Source : DLR]. Dans le cadre du projet, différentes approches pourraient être trouvées en vue de l'exploitation de la chaleur.

Allemagne / Land de Sarre

Dans le Land de Sarre, il existe 10 centrales à biogaz. 3 d'entre elles utilisent une grande partie de la chaleur générée. Pour certaines, le mode de valorisation de la chaleur peut cependant être considéré comme déficitaire puisqu'il ne conduit pas à une substitution directe d'énergie fossile. Pour deux installations, des pistes d'exploitation de la chaleur ont été trouvées.

Grand-Duché de Luxembourg

Au Grand-Duché de Luxembourg, il existe 26 centrales à biogaz. Celles-ci utilisent 24,30 GWh en chaleur, ce qui mathématiquement représente une moyenne de 53% de l'excédent de chaleur disponible. Pour une installation, des consommateurs de chaleur possibles ont été identifiés. L'installation utilise à l'heure actuelle déjà une grande partie de la chaleur, cependant un système de séchage du bois de chauffage est exploité, ce qui n'apporte en fait aucun effet réel de substitution aux énergies fossiles.

Ensemble

En particulier dans les deux régions allemandes de la zone géographique du projet, on constate d'importants déficits en ce qui concerne la valorisation efficace de la chaleur résiduelle. Chacun des points d'approche pour améliorer cette situation pourraient être étoffés. Des discussions concrètes sur les sites et respectivement des études de faisabilités devraient suivre

4. Qualité et utilisation des digestats provenant de la fermentation des plantes issues de cultures énergétiques, du lisier et des déchets.

En cas de cultures dédiées à la production de biogaz, les éléments fertilisants se retrouvent dans le digestat après la fermentation et retournent au sol ce qui ferme le cycle de la matière organique (ce qui vient du sol retourne au sol). À l'opposé, il y a les cultures vivrières, récoltes des produits dédiés à l'alimentation humaine et animale qui sont exportés et leur composants ne sont pas ou peu retournés à la terre.

La situation est différente en ce qui concerne le carbone. Dans le cas des cultures énergétiques, toute la partie supérieure de la plante est récoltée et après la fermentation, la plus grande proportion du carbone se retrouve dans le biogaz. Seule une petite partie du carbone est restituée aux champs lors de l'épandage des digestats.

5. Cadres législatifs pour la mise en place et l'exploitation des centrales à biogaz incluant les structures de financement

Le compte-rendu met la lumière sur les stratégies de mise en œuvre par les régions visées d'Allemagne, de Belgique, de France et du Luxembourg pour promouvoir l'électricité verte provenant des installations de biométhanisation. Ce qui est montré ici, ce sont les différences au niveau des stratégies nationales/régionales de financement sur les mesures de rendement, comme par exemple la création de mesures pour inciter au découplage de la production thermique.

Tableau 4 - Comparaison des systèmes de bonification pour l'électricité provenant du biogaz

	Belgique	Allemagne	France	Luxembourg
Régulation des prix	Modèle de certificat	Tarif fixe de rachat	Tarif fixe de rachat	Tarif fixe de rachat
Plafond de bonification	0 ct/kWh$_{él}$ jusqu'à 20 ct/kWh$_{él}$	6 ct/kWh$_{él}$ jusqu'à 25 ct/kWh$_{él}$	11,19 ct/kWh$_{él}$ à 19,97 ct/kWh$_{él}$	12 ct/kWh$_{él}$ jusqu'à 18 ct/kWh$_{él}$
Durée de la bonification	10-15 ans	20 ans	15 ans	15 ans
Coût d'accès au réseau	Exploitant de la centrale	Exploitant de la centrale	Exploitant de la centrale	Exploitant de la centrale
Coût d'amélioration du réseau	Exploitant du réseau	Exploitant du réseau	Exploitant de la centrale	Exploitant de la centrale
Priorité aux ER* pour la connexion au réseau	Oui	Oui	Non	Non

* ER : Énergies Renouvelables

Individuellement, les systèmes de bonification se distinguent de par leur structure, la hauteur de la bonification et par conséquent aussi sur l'impact significatif sur le renforcement des installations biogaz.

Dans la région considérée, les systèmes d'Allemagne, France et Luxembourg sont établis sur une bonification à tarifs fixes. En revanche la Belgique a instauré un système de quotas ou de certificats.

L'Allemagne est le seul État qui présente une différenciation monétaire pour les différents types de biomasse dans la production d'électricité issue du biogaz. La plus haute bonification est accordée lorsque les installations fonctionnent grâce aux matières premières renouvelables, avec un apport en lisier et en déchets issus de l'entretien paysager. Les grandes installations utilisant les déchets sans exploiter la chaleur résiduelle obtiennent la plus faible bonification.

Dans toutes les régions de l'enquête, l'efficacité du rendement énergétique est primée. En Belgique, le rendement de l'ensemble de l'installation est ici au premier plan, de telle manière que sont pris en compte la part des énergies fossiles tout comme l'exploitation de la chaleur. Dans les autres pays, le rendement global[2] et l'exploitation de la chaleur sont au premier plan. À noter qu'en Allemagne, aucune installation d'allumage ou de combustion auxiliaire n'est autorisée.

En Allemagne seulement, des primes supplémentaires sont encore accordées sur les bonifications de base, qui sont ajoutées lorsqu'il y a par exemple apport de plantes issues de cultures dédiées. La durée pour laquelle la bonification est attribuée se situe entre 10 ans min (Belgique) et 20 ans max (Allemagne).

Les coûts de raccordement au réseau sont toujours à la charge des exploitants de la centrale. Par opposition, en Allemagne et en Belgique, l'extension du réseau est à la charge du gestionnaire du réseau. En Allemagne et en Belgique seulement, l'exploitation des énergies renouvelables est une priorité pour autant que l'expansion du réseau soit économiquement acceptable pour son exploitant. Le raccordement s'effectue en France et au Luxembourg selon des critères non discriminatoires.

Concernant l'injection du biogaz dans les réseaux de gaz naturel, l'Allemagne, le Luxembourg et la France disposent de leur propre dispositif. Tandis qu'en Allemagne l'injection est régie parallèlement à la distribution électrique d'après la loi EEG, la France et le Luxembourg ont opté pour un modèle de tarifs de rachats séparés. La régulation des bonifications n'est pour le moment pas encore prévue en Belgique. Cependant, toutes les régions observées possèdent un cadre réglementaire, qui rend possible la distribution de gaz issu des énergies renouvelables dans le réseau de gaz naturel et juge en priorité les énergies fossiles, sous des conditions spéciales.

Tableau 5 - Comparaison de l'alimentation en biogaz dans le réseau de gaz naturel

	Belgique	Allemagne	France	Luxembourg
Régulation des prix	Aucune subvention	Éviter les frais de réseau, couplés à EEG	Tarif de rachat	Tarif de rachat
Plafond de subvention	Aucune jusqu'à présent	Couplé à EEG (bonus biométhane 0-3 ct/kWh)	6,4-12,5 ct/kWh PCS	6,5 ct/kWh Dégressif
Coûts de fourniture du réseau	Pas réglé actuellement	Coûts de réalisation d'accès au réseau: 75% gestionnaire du réseau Frais d'exploitation Réseau de distribution du gaz 100% exploitant du réseau	Dépend entièrement des distances de raccordement	Coûts de réalisation d'accès au réseau: 100% Alimentation en gaz Frais d'exploitation Réseau de distribution de gaz: 100% gestionnaire du réseau
Raccordement au réseau	Obligation d'achat, sans discrimination	Obligation d'achat, sans discrimination	Obligation d'achat, sans discrimination	Obligation d'achat, sans discrimination

[2] France

La construction et l'exploitation des installations de biométhanisation exigent, dans toutes les régions étudiées, de suivre une procédure pour solliciter les autorisations de construction et de contrôle des émissions, lesquelles sont effectuées de manière parallèle en France et au Luxembourg. En Allemagne et en Belgique, les permis de construire sont validés en même temps que la procédure de contrôle des émissions. En France, en Belgique et en Allemagne, toutes les vérifications techniques, concentrées dans la procédure d'autorisation pour le contrôle des émissions/procédure d'approbation environnementale, sont évaluées ensemble.

Au Luxembourg, toutes les requêtes techniques et les autorisations doivent être déposées séparément. La durée de la procédure d'autorisation se situe entre 5 et 18 mois et peut être rallongée suivant les tests ou les vérifications à effectuer. La durée de la procédure pour la Belgique, l'Allemagne et la France est donnée par la loi suivant les délais administratifs pour le temps de traitement. Au Grand-Duché de Luxembourg, il n'y a aucune donnée légale concernant les délais, ceux mentionnés ici sont basés sur des valeurs par expérience.

Tableau 6 - Comparaison des procédures d'autorisation

	Belgique	Allemagne	France	Luxembourg
Procédure d'autorisation concentrée	Permis de construire tout comme d'autres autorisations techniques dans un permis environnemental concentré (permis unique)	Permis de construire tout comme d'autres autorisations techniques dans le permis environnemental concentré	Permis de construire séparé du permis environnemental concentré avec d'autres autorisations techniques	Permis de construire séparé du permis environnemental concentré avec d'autres autorisations
Participation du public	Oui – Soulever les objections	Oui – Soulever les objections	Oui – Soulever les objections	Oui – Soulever les objections
Durée	Min. 9 mois	Min. 9 mois	Min 5 resp. 15 mois	Environ 12-18 mois
Classifications	Suivant la taille de la centrale	Suivant la taille de la centrale	Suivant la taille de la centrale	Suivant le niveau de danger

6. Acceptation

Pour le projet « OPTIBIOGAZ », deux enquêtes standards sous forme de questionnaires ont été lancées à Ottweiler (Land de Sarre) et à Tintigny (Belgique). Le champ d'enquête portait sur l'acceptation par les habitants des installations de biométhanisation. Les résultats dans les communes montraient vraiment que les personnes interrogées n'ont encore aucune expérience voir une expérience relativement faible avec les installations de biométhanisation. Dans ce contexte, les résultats de la recherche sont à interpréter avant tout comme une tendance et comme une manifestation d'un besoin à être informé.

L'état des connaissances concernant les centrales à biogaz est relativement faible, mais par contre, il existe un intérêt pour le thème des « Energies renouvelables» et particulièrement dans le domaine de la biomasse.

Malgré la faible expérience, on constate qu'une perception très positive se met en place vis-à-vis des énergies renouvelables notamment en faveur de la biomasse – la majorité des personnes interrogées sont favorables à l'utilisation des énergies renouvelables dans la production d'énergie future. D'un autre côté, il a été montré assez nettement qu'il était difficile pour les personnes

interrogées d'estimer concrètement les risques concernant les installations, par ex. concernant la rentabilité ou d'autres dangers liés à ces installations. On relève ainsi dans beaucoup d'évaluations une grande part de réponses « ne sais pas » et « indécis » pour les questions relatives aux risques. Les effets économiques positifs ainsi que la production d'énergie propre et renouvelable sont avant tout en tête de liste dans l'évaluation des avantages liés aux installations de biométhanisation. Les inconvénients attendus, c'est-à-dire les éléments rapportés dans l'enquête comme « craints » par les habitants, sont l'accroissement des monocultures, les accidents éventuels ainsi que les émissions d'odeurs liées à exploitation de la centrale.

Par conséquent au niveau des comportements, c'est-à-dire des activités/manifestations pour/contre les installations de biométhanisation, très peu en ont été observées car les opportunités et/ou les nécessités n'existaient pas. Dans ce contexte, l'important est d'offrir, avant toutes choses, des informations précoces et complètes. Il est très important pour les personnes interrogées de pouvoir réagir sur d'éventuels changements de leur cadre de vie, comme ce que représenterait par exemple la construction d'une installation de biométhanisation. À cette fin, les informations adéquates sur l'installation pendant le processus de planification représentent une base nécessaire.

7. Bilan général et mesures nécessaires

7.1. Résumé

Chacun des pays de la Grande Région propose des contextes très différents pour l'expansion des composants des installations de biométhanisation. Comme il a été dit dans la partie du rapport « Cadre législatif », les gouvernements allemand et luxembourgeois encouragent fortement le renforcement de la production électrique issue de l'énergie du biogaz, ce qu'on trouve plus loin dans les résultats de ces évaluations.

En Allemagne, l'incorporation des plantes énergétiques est particulièrement subventionnée. Par ce biais,un important potentiel supplémentaire est mobilisé pour la production de biogaz (voir tableau 2 et tableau 3). D'un autre côté, cet essor pour les matières premières renouvelables déclenche aussi des discussions comme par exemple sur la concurrence pour l'occupation des sols concernant les monocultures, qui peuvent être en partie évités grâce à de bonnes pratiques agricoles. La dominance des cultures de maïs pour les centrales à biogaz est prise en compte dans l'EEG actuelle. Ce domaine de la concurrence indirecte des sols est de plus en plus critiqué et examiné de manière scientifique.

Sur ce thème, un mémoire est actuellement en cours de réalisation, dont les résultats contribueront à la pérennité d'Optibiogaz. Du point de vue du bilan écologique, rien ne permet de conclure que l'utilisation des plantes énergétiques est à proscrire comparativement à l'utilisation de résidus organiques. Ce type de facteur intègre le type des cultures, les voies de transport, le type de résidus, l'alternative pour la valorisation des résidus etc. dans le bilan écologique, qui sont rencontrés au cas par cas.

En Belgique, les émissions de CO_2 liées à l'utilisation de cultures énergétiques et d'intrants externes sont prises en compte dans le calcul des certificats verts à attribuer. Comme aucune autre utilisation des déchets n'a été évaluée, cette approche est à reconsidérer. La plupart des installations de biométhanisation ont valorisé la chaleur résiduelle produite en raison des faibles taux de bonification et des courtes périodes des bonifications afin d'augmenter le nombre de certificats verts. Cependant, le séchage du digestat est discutable ici du point de vue des avantages environnementaux, puisqu'aucun combustible fossile n'est remplacé (cela vaut aussi pour l'Allemagne).

Surtout en Allemagne, en comparaison aussi avec les autres régions observées, un faible tarif de distribution est payé aux grandes installations de biométhanisation qui utilisent les déchets. Cela pourrait créer des incitations supplémentaires.

De toute évidence l'incorporation du lisier dans les installations de biométhanisation doit être favorisée afin d'éviter les émissions associées au stockage du lisier. Surtout au Grand-Duché de Luxembourg, on a réussi à introduire une grande part de lisier dans les centrales à biogaz, grâce à la combinaison des tarifs de rachats et au développement des frais d'investissement. En particulier dans le domaine de la valorisation de la chaleur résiduelle dans les régions étudiées en Allemagne, les déficits sont existants. Les anciens mécanismes de régulation et d'incitation pour le rendement des installations ne suffisent pas ici à amener à un niveau satisfaisant. Dans le cadre de l'actuelle régularisation de l'EEG, des renforcements sont prévus. Concernant le soutien pour les investissements pour chacune des mesures, les réseaux de chaleur résiduelle… devraient être considérés.

Dans les parties françaises et allemandes du projet, des énormes potentiels sont détectés dans le domaine de l'utilisation des prairies. Le déclin de cheptel signifie que les prairies seront libres à d'autres fins. La réaffectation des prairies devrait être évitée pour la protection de la biodiversité et du climat. En effet les prairies servent de puits de carbone (60g de carbone par m^2/a) pendant que les terres cultivées représentent des sources de carbone (70g de carbone par m^2/a). De là, 130 g de carbone par m^2/a supplémentaires sont libérés en cas de réaffectation des prairies.[3]

En France, de par la structure actuelle des bonifications, il n'y a aucun grand attrait à la construction d'installations de biométhanisation dans le secteur agricole. Les contraintes et les structures des processus d'autorisation en compliquent encore la construction.

Du point de vue du bilan écologique, et ici avant tout en prenant en considération les émissions de gaz à effet de serre, une utilisation efficace du biogaz est à surveiller. À coté des moyens de valorisation de la chaleur (qui ont déjà été évoqués), le confinement du lieu de stockage du lisier et la maintenance et le contrôle des propriétés du moteur sont à préconiser.

Les possibilités de stockage du biogaz et la production d'électricité basée sur la demande sont jusqu'à présent inexploitées.

7.2. Mesures :

- **Exigences pour les cultures énergétiques**

  Dans le cas des installations utilisant des plantes énergétiques, une bonne pratique professionnelle est à respecter. Des doses d'engrais accrues devraient être évitées avant tout en raison des émissions du protoxyde d'azote. De même, l'ensilage professionnel et le stockage des matières premières énergétiques méritent d'être considérés.

- **Utilisation des prairies**

  En Allemagne et en France, pour éviter la réaffectation des prairies, on devrait inciter à une utilisation des restes d'herbes coupés à des fins énergétiques.

- **Optimiser les installations :**

  > **Utilisation de la chaleur**
  > Dans le domaine de la construction des nouvelles installations, on doit veiller à un haut rendement global. Concernant les installations déjà implantées, des études de valorisation de la chaleur pour l'utilisation de la chaleur pourraient être menées. Des mesures de financement concrètes, par ex. dans le domaine du chauffage local des communes sont à retenir. Les plus grosses centrales ne devraient être installées qu'à proximité de consommateurs de chaleur ou dans une zone disposant d'un réseau de gaz naturel.

  > **Réglage du moteur**
  > La maintenance et les réglages du moteur ont une influence décisive sur les émissions libérées et de ce fait, un contrôle et une maintenance régulière devraient être effectués.

  > **Lieu de stockage couvert pour le digestat**
  > Recouvrir le dépôt final évite le rejet résiduel de méthane qui peut être récupéré pour la cogénération. La bonification devrait ici donner une bonne marge de manœuvre au niveau de la valeur absolue de la rémunération et de sa durée, pour mettre en place un équipement de qualité.

[3] Thrän, D. et al; Identifizierung strategischer Hemmnisse und Entwicklungen von Lösungsansätzen zur Reduzierung der Nutzungskonkurrenzen beim weiten Ausbau der energetischen Biomassenutzung; DBFZ; Leipzig; 2009

> **Amélioration de l'épandage du digestat**
Dans le domaine de l'épandage du digestat, un déficit est encore observé. L'établissement d'un système de gestion centralisé et organisé pour l'épandage du digestat avec une technologie appropriée (rampe d'épandage) devrait être considéré, afin d'éviter les émissions de NH_3 et pour éviter la pollution à l'azote.

- **Mobiliser les potentiels des déchets**

  Surtout en Belgique et au Luxembourg, il a été possible dans une importante mesure d'amener les déchets et les résidus en vue d'une valorisation énergétique dans les centrales à biogaz. Dans les régions observées en Allemagne, des mesures d'urgence sont encore étudiées.

- **Améliorer l'échange transfrontalier**

  Quatre installations agricoles, quatre centres de recherche, un coordinateur, répartis dans les cinq régions ont collaboré pendant quatre années en toute confiance.

  Des liens durables se sont créés dans les échanges d'expériences, les soutiens réciproques, les conseils, recherches et préventions.

  Le projet a énormément contribué à l'abaissement des frontières et à l'émergence de l'esprit Grande Région.

  La pérennité du projet est là, même si le travail doit se poursuivre pour faire de la biométhanisation agricole une source crédible et importante de production d'énergies alternatives (électrique, chaleur, engrais vert...) et ainsi lui donner toutes ses chances pour l'avenir.

ACTION 5 :

Création d'un réseau d'expertises et de diffusion dans le domaine de la biométhanisation au niveau de la Grande Région

Partenariat OPTIBIOGAZ

Dans le but de pérenniser les résultats obtenus et de maximiser les échanges de compétences, d'expériences, et de connaissances, le projet OPTIBIOGAZ s'est articulé autour d'un réseau d'expertises. Ce réseau a été concrétisé par :

1. le développement d'un site Internet bilingue décrivant le projet, ses objectifs, ses actions, ses principaux résultats et les adresses de contact. Des liens réciproques sont créés entre ce site et les sites officiels des partenaires du projet.

www.optibiogaz.eu

2. la participation à des séminaires et foires, parfois en collaboration avec d'autres projets INTERREG IV A comme : Enerbiom "Approche agro-écologique de la production agricole de biomasse énergie en zone à fortes contraintes environnementales : quelles alternatives pour quelles filières ?"; Rife 2 qui associe divers partenaires (services aux entreprises, chambres de commerce et d'Industrie, centres de recherche et universités) ayant comme objectif à travers la mise en oeuvre de ce projet, de faire émerger des bonnes pratiques en matière d'environnement dans un panel de PME et de les promouvoir à l'ensemble des entreprises de la région transfrontalière; et PôlEnergie «Création d'un pôle de référence en utilisation

rationnelle de l'énergie et en énergies renouvelables dans la zone transfrontalière de la Vallée de l'Attert belgo-luxembourgeoise».

L'ensemble du partenariat a également présenté le projet lors de différentes organisations telles que les journées d'échanges d'expériences à Offenburg, Stuttgart, Nancy, Libramont, Luxembourg, Ettelbruck, Attert, Arlon, Malmedy ou Liège.

3. des visites d'installations modèles : le partenariat a organisé et participé à de nombreuses visites d'installations des partenaires et d'autres installations situées en Grande Région afin de partager les diverses expériences sur la filière.

4. plusieurs journées portes ouvertes organisées dans nos fermes pilotes qui ont touché un grand nombre de professionnels et le grand public avec l'organisation d'activités ludiques sur les actions menées. Des journées de visites transfrontalières ont également été organisées pour les étudiants de l'université de Nancy.

5. la création de panneaux pour les 4 sites pilotes qui reprennent la description de chaque installation.

6. la fabrication d'une maquette qui représente une installation de biométhanisation avec un jeu de questions/réponses sur le thème de la biométhanisation. Cette maquette est installée dans la Maison de l'Energie à Attert mais est utilisée comme outil pédagogique lors de colloques, fermes ouvertes,… Elle est à la disposition du partenariat mais également des organismes souhaitant faire découvrir la biométhanisation, comme les écoles, les associations d'agriculteurs,…

7. - la rédaction d'articles grand public et de publications scientifiques

- la participation à des émissions télévisées
- l'organisation d'une conférence de presse présentant les résultats du projet
- l'organisation d'une journée d'étude sur la fertilisation azotée et d'un colloque de clôture

8. l'adhésion à la plate forme «Biogaz» présidée par EDORA.

Objectifs:

- Fédérer les acteurs du secteur et promouvoir le développement des différentes filières de production et de valorisation du biogaz ;
- Proposer des mesures et modifications réglementaires ;
- Suivre les développements à l'échelle européenne et dans les pays limitrophes ;
- Centraliser toutes les publications utiles à la filière ;
- Assurer un flux médiatique sur la filière biogaz ;
- Faire des propositions sur les recherches ;
- Favoriser la mise en commun d'expériences.

Coopération territoriale européenne 2007-2013 «Grande Région»
Entité géographique «Grande Région»

Zone de coopération

Zone adjacentes
(art. 21 du règlement FEDER)

Sources de cofinancement

L'Union européenne investit dans votre avenir
Die europäische Union investiert in Ihre Zukunft

Projet cofinancé par l'Union Européenne via le FEDER dans le cadre du programme INTERREG IV A

Wallonie

Saarland
Ministerium für Umwelt, Energie und Verkehr

Représentants du projet OPTIBIOGAZ

PORTEUR DU PROJET : Asbl «Au pays de l'Attert» (B)

- **Marcel NICKERS :** Président
- **Sylvie HUBERT :** Secrétaire générale
- **Benoît TOUSSAINT :** Responsable projet
- **Joachim ANSIAS :** Chargé de mission
- **Nathalie DRUART :** Secrétaire

Tel. : +32 (0)63/22.78.55
www.aupaysdelattert.be
asbl.apda@attert.be

LARDOGRAPHIC

4 exploitations pilotes

1. Kessler Frères (B) :
- Jean et Nicolas KESSLER
  Ferme de Faascht
  jean.kessler@scarlet.be

2. Biogas Biekerich (L) :
- Constant KIEFFER
  biogas.biekerich@email.lu

3. Bio Recycle (F) :
- Francis CLAUDEPIERRE
  francis.claudepierre@wanadoo.fr

4. Biogas Rohlingerhof (D) :
- Matthias KOHL
  biogas@rohlingerhof.de

5 partenaires scientifiques

1. CRP-GL : Centre de Recherche Public Gabriel Lippmann (L)
- Philippe DELFOSSE : chef de projet - *delfosse@lippmann.lu*
- Sébastien LEMAIGRE : chercheur - *lemaigre@lippmann.lu*
- Bénédicte DE VOS : technicienne - *de-vos@lippmann.lu*

2. UL- Ensaia : Université de Lorraine- Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires (F)
- Stéphane PACAUD : chargé de mision - *stephane.pacaud@ensaia.inpl-nancy.fr*
- Frédéric BORGES : chercheur - *frederic.borges@univ-lorraine.fr*

3. ULg-campus d'Arlon : Université de Liège (B)
- Jacques NICOLAS : Département des sciences et gestion de l'environnement chargé de cours - *j.nicolas@ulg.ac.be*
- Christophe CERISIER : chercheur - *ccerisier@ulg.ac.be*
- Noémie MOLITOR : technicienne - *noemie.molitor@ulg.ac.be*

4. IZES : Institut de recherche des systèmes énergétiques du futur (D)
- Mikael SPRINGER : ingénieur - *springer@izes.de*
- Claudia ZIEGLER : chercheur - *ziegler@izes.de*

5. LABORELEC : Centre de recherche automation (B)
- Chrystelle VERHOEST : coordinatrice - *chrystelle.verhoest@laborelec.com*

Editeur responsable : Asbl «Au pays de l'Attert» Marcel NICKERS.