



GUIDE DE SUIVI DE LA BIOLOGIE SUR UNE UNITE DE METHANISATION AGRICOLE



- La biologie de la méthanisation
- La phase de démarrage d'un digesteur
- Le suivi de la biologie en régime nominal
- Les équipements de mesure disponibles
- Liste de fournisseurs

Juin 2011

Aile
Association
d'Initiatives
Locales
pour l'Énergie
et l'Environnement

La biologie de la méthanisation

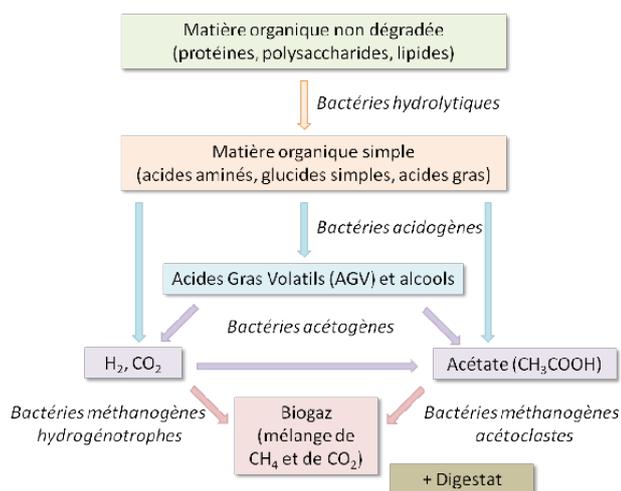


Figure 1 : Etapes biologiques de la méthanisation

La méthanisation est un procédé naturel de dégradation de la matière organique en milieu anaérobie par l'action de plusieurs types de microorganismes. La formation du biogaz (composé principalement de méthane et de dioxyde de carbone) et du digestat (matière non fermentescible et produits de dégradation) fait intervenir une suite de réactions biologiques (figure 1) nécessitant une coopération entre les différentes bactéries. Pour permettre à l'activité bactérienne de se développer correctement, il faut que les paramètres du milieu de réaction soient compatibles avec les caractéristiques de toutes les bactéries entrant en jeu.

Différentes technologies de méthanisation existent (voie sèche, voie humide, infiniment mélangé, réacteur à lit fixe...), mais la technique la plus développée en méthanisation agricole est la méthanisation infiniment mélangée en voie humide (adapté au traitement des lisiers et des co-substrats). Ainsi dans ce guide les conseils apportés s'appliquent en priorité à ces exploitations, mais ils peuvent être transposés pour les autres types de méthaniseur.

La phase de démarrage d'un digesteur

La bonne réalisation de la phase de démarrage du digesteur est très importante, pour garantir une production durable de biogaz. La méthanisation faisant intervenir des bactéries, il est indispensable de réfléchir à la stratégie de démarrage du digesteur de manière à optimiser le développement de celles-ci. Les constructeurs proposent en général un protocole de démarrage. La concertation avec le constructeur est importante pour définir le protocole le mieux adapté à l'exploitation. On peut distinguer deux phases de démarrage : l'inoculation et la montée en charge du digesteur.

Quels substrats introduire ?

Il est fondamental d'introduire un substrat contenant naturellement des bactéries participant à la méthanisation, pour inoculer le digesteur. Les lisiers bovins et porcins semblent être des substrats adaptés pour le démarrage des digesteurs. Les conditions dans le digesteur (température, brassage, anoxie et absence de lumière) favorisent le développement des bactéries introduites par les lisiers, mais il faut leur laisser le temps de s'adapter à ce milieu et éviter tout changement brusque. L'incorporation des autres substrats se fera progressivement lorsque le volume souhaité de lisier aura été introduit et que la température dans le

digesteur aura atteint la valeur souhaitée (aux alentours de $38^{\circ}C$). Du digestat d'une unité de méthanisation en service peut également être utilisé lors de la phase de démarrage pour inoculer le digesteur (en plus du lisier). Cependant il faut faire attention à l'adaptation des bactéries dans le nouveau digesteur. Il est donc conseillé d'utiliser le digestat d'une exploitation utilisant les mêmes substrats pour inoculer le digesteur avec une microflore bactérienne la plus adaptée possible. Dans tous les cas, les premiers apports en substrat doivent être progressifs, ne jamais introduire la ration de base directement dans le digesteur !

Exemple d'un protocole de démarrage : digesteur de 1200 m^3

- 700 m^3 de lisier de porc frais, chauffage jusqu'à $38^{\circ}C$ (environ 2 semaines de montée en température) puis ensuite $20\text{ m}^3/\text{jour}$ de lisier (faible volume pour éviter les chocs thermiques)
- Au bout de 2 semaines, 1 à 2 tonnes/jour de fumier de porc pendant 15 jours
- Au bout de 1 mois, 4-5 tonnes de digestat provenant d'une unité de méthanisation voisine, puis incorporation progressive des matières végétales (ensilage) puis des graisses pour atteindre la ration de base, au bout de 2 mois, composée de $15-17\text{ m}^3/\text{jour}$ de lisier de porc, 3 tonnes/jour de matières végétales et $3-4\text{ m}^3/\text{jour}$ de graisses

Montée en température

Le chauffage du digesteur est essentiel pour assurer des conditions mésophiles (entre 37 et 40°C) dans le digesteur. Pour éviter les brusques changements de température et optimiser la montée en température, il est conseillé de chauffer l'air ambiant du digesteur avant l'introduction du lisier et d'introduire le lisier à une certaine température (limiter le stockage à l'extérieur, surtout l'hiver).

Le premier apport de lisier doit remplir le digesteur à environ 50% de son volume. La montée en température doit être progressive (pas trop rapide, les bactéries sont sensibles aux variations de température). En général la montée en température est limitée par la puissance de la chaudière utilisée, mais dans tous les cas, il est déconseillé d'augmenter la température de plus de 1°C par jour.

Ensuite, le lisier doit être incorporé progressivement jusqu'à atteindre le volume souhaité, en limitant les variations de température (introduction journalière de faibles volumes).

Temps de séjour

Le temps de séjour correspond à la durée théorique de séjour dans le digesteur des substrats avant d'être évacués, donc à la durée de contact entre les substrats et les bactéries. Il est en général préconisé de dimensionner l'installation pour avoir un temps de séjour compris entre 40 et 60 jours. Ainsi lors de la phase de démarrage, il est impératif de garantir un temps de séjour minimum aux premiers substrats

incorporés. L'évacuation du digestat se faisant en général par surverse, il faut que le volume dans le digesteur ne dépasse pas le niveau de surverse pendant au moins les 2 premiers mois.

Le suivi de la biologie lors du démarrage

Le démarrage d'un digesteur anaérobie est une phase critique à forte inertie. Il est donc essentiel d'être précautionneux et de suivre des paramètres du milieu de réaction pour contrôler l'état de la biologie. Le suivi de la température, du pH et des teneurs en NH_4^+ et en AGV semble indispensable pour maîtriser le démarrage. Le taux d'AGV est élevé au début du fait de l'activité des bactéries hydrolytiques et acidogènes qui se divisent rapidement et sont donc les premières à avoir une activité importante dans le digesteur. Ensuite la teneur en AGV va diminuer sous l'action des bactéries acétogènes et méthanogènes (au cycle de développement plus long), l'équilibre entre les différentes bactéries est réalisé. Cet équilibre peut être long à atteindre si les conditions ne favorisent pas le développement des bactéries méthanogènes (taux de NH_4^+ trop élevé, pH trop acide).

Les processus biologiques reposent sur des équilibres fragiles, il est donc important de garantir des conditions favorables aux bactéries en évitant tout changement brusque. Les bactéries peuvent s'adapter si les modifications se font progressivement, tout en assurant des conditions favorables de développement.

Le suivi de la biologie en régime nominal

Une fois le démarrage du digesteur réalisé et le régime nominal atteint, il est important de suivre régulièrement des paramètres de production et du milieu dans le but de garantir des conditions favorables aux bactéries et d'adapter au mieux la ration, ce qui permet d'optimiser la production de biogaz et donc d'électricité.

Quels paramètres suivre ?

On peut distinguer deux catégories de paramètres à suivre :

- les paramètres de production, donnant indirectement des informations sur l'état de la biologie,
- les paramètres du milieu, indiquant les conditions dans le digesteur.

Le suivi de ces deux catégories de paramètres permet de maintenir les conditions dans le digesteur pour optimiser l'activité des bactéries et en même temps de contrôler leur activité. Le tableau 1 présente les principaux paramètres à suivre sur une unité de méthanisation pour s'assurer du bon fonctionnement de la biologie. Les valeurs optimales de ces paramètres sont également présentés dans ce tableau. Certains paramètres dépendent du dimensionnement de l'installation, nous ne pouvons donc pas fournir de valeurs optimales pour ceux-ci.

Tableau 1 : Liste des paramètres à suivre et leur valeur optimale

		valeurs optimales
paramètres de production	quantité de substrats introduits	-
	quantité de biogaz produit	-
	quantité d'électricité produite	-
	taux de CH ₄ du biogaz	50-60 %
	taux de CO ₂ du biogaz	35-45 %
	taux de H ₂ S du biogaz (corrosif pour le moteur)	< 200 ppm
	taux de O ₂ du biogaz (O ₂ utilisé pour désulfuration, mais trop grande concentration inhibitrice de la méthanisation)	0,8-1,1 %
paramètres du milieu	température	35-40 °C
	pH	7,5-8
	conductivité (représentatif de la concentration en sels minéraux, inhibiteurs à fortes concentrations)	18-30 mS/cm
	potentiel d'oxydoréduction (représentation du pouvoi réducteur du milieu et donc de la présence d'O ₂ , inhibiteur)	-300 mV
	teneur en AGV (Acide Gras Volatils ; produits de l'acidogénèse dégradés par l'acétogénèse et la méthanogénèse, inhibiteurs à fortes concentrations car baisse du pH)	-
	TAC (Titre Alcalimétrique Complet ; représentatif du pouvoir tampon des ions bicarbonates principalement, limite les variations de pH)	> 8 g HCO ₃ ⁻ /L
	rapport AGV/TAC	0,2-0,5
	teneur en NH ₄ ⁺ (inhibiteurs à fortes concentration)	< 3,5 g/L

Méthodes de suivi

Il est conseillé de suivre régulièrement ces indicateurs, quotidiennement pour la température, le pH et les paramètres de production et toutes les semaines ou les deux semaines pour les autres paramètres du milieu. Toutefois, si une détérioration de la production est observée, il est alors nécessaire d'analyser les paramètres du milieu pour tenter d'expliquer l'origine du problème et de le résoudre.

En étudiant les relations entre les substrats introduits dans le digesteur et les paramètres de production et du milieu, on peut déterminer la ration optimale sur l'exploitation. Les bactéries sont des êtres vivants, il faut donc raisonner la ration comme on le ferait pour un animal et de bien l'équilibrer : du lisier pour l'eau, des matières végétales (ensilages) pour les « sucres lents » et des graisses ou des déchets de céréales pour les « sucres rapides ». Généralement ceci est réalisé empiriquement par l'exploitant, l'enregistrement du suivi permet de le formaliser et de constituer une base de données. L'enregistrement peut se faire en version papier ou en version informatique (fichier Excel). L'association AILE propose aux exploitants des supports pour ce suivi.

Les principaux problèmes biologiques rencontrés sur une unité de méthanisation

L'acidose est le principal problème rencontré sur les unités de méthanisation. Elle correspond à une accumulation d'Acides Gras Volatils (AGV) dans le milieu qui engendre une baisse du pH. Il en résulte inhibition de l'activité des bactéries et une diminution de la production de biogaz. Les causes de l'acidose sont soit une trop grande quantité de matières fermentescibles introduites dans le digesteur, soit une inhibition des bactéries acétogènes et méthanogènes entraînant une accumulation d'AGV.

Dans le premier cas il faut commencer par stopper les apports de substrats pour réduire la teneur en AGV (consommation par l'activité des bactéries acétogènes et méthanogènes) puis ensuite réévaluer la ration. Il est important de ne pas trop introduire de substrats rapidement hydrolysables (riches en glucides et en lipides) car ces substrats libèrent rapidement de grandes quantités d'AGV sous l'action des bactéries hydrolytiques et acidogènes, ce qui peut entraîner une accumulation d'AGV.

Pour éviter l'acidose du digesteur, on peut dans ce cas envisager une cuve d'hydrolyse en aval du digesteur, ce qui permet de séparer les phases d'hydrolyse et d'acidogénèse de l'acétogénèse et de la méthanogénèse, et donc de limiter le risque d'accumulation d'AGV dans le digesteur .



Figure 2 : Plateforme de stockage des substrats solides

Dans le second cas, l'inhibition des bactéries est due à la présence d'agents inhibiteurs. Les principales substances responsables des intoxications sont le sulfure d'hydrogène (substrats riches en acides aminés contenant du soufre [méthionine et cystéine] : colza et autres crucifères), les métaux lourds (cuivre, zinc...), les antibiotiques et les désinfectants (dans les lisiers, attention à la conduite des ateliers d'élevage). C'est la qualité d'un substrat qui est remise en cause, d'où l'importance d'avoir une bonne connaissance des substrats utilisés. Pour les substrats ne provenant pas de l'exploitation, il est fortement conseillé de demander une analyse avant l'introduction dans le digesteur. Pour remédier à l'acidose, il faut dans ce cas

identifier le substrat responsable de l'intoxication et réduire voire supprimer son incorporation dans la ration. L'ajout de NaHCO_3 constitue une solution curative pour ramener le pH vers des valeurs proches de la neutralité et renforcer le pouvoir tampon.

L'alcalose est également un problème important. Elle correspond à l'accumulation d'ammoniac dans le milieu provenant de substrats riches en protéine : lisiers et fumiers de volailles... Il résulte une augmentation du pH et une toxicité liée à l'ammoniac entraînant une inhibition de la méthanogénèse.

Dans tous les cas, on constate que la bonne connaissance des substrats utilisés et l'équilibre de la ration sont fondamentaux pour optimiser la biologie, la production de biogaz et la stabilité du processus. Outre la phase de démarrage, le changement de ration et la réception de substrats atypiques constituent également des points critiques pour la biologie et nécessitent une attention particulière.

Les équipements de mesure disponibles

Le suivi des paramètres de production (biogaz et électricité) peut se faire à partir des données de l'armoire de contrôle du moteur de cogénération. Le suivi des substrats introduits dans le digesteur demande un relevé quotidien des quantités introduites et nécessite donc une trémie sur peson pour les substrats solides et des débitmètres pour les substrats liquides. Le suivi des autres paramètres nécessite des équipements d'analyse plus spécifiques.

Les mesures se font à deux niveaux :

- au niveau de la conduite de biogaz avant le moteur de cogénération pour le suivi des paramètres de production (quantité et composition du biogaz),
- au niveau du digesteur pour le suivi des paramètres du digesteur.

Analyse du biogaz

En règle générale, les paramètres du biogaz sont contrôlés sur les unités de méthanisation pour éviter les détériorations du moteur. Un débitmètre à l'entrée du moteur de cogénération permet de définir la quantité de biogaz et un analyseur en ligne installé sur la canalisation avant le moteur permet de mesurer la composition

du biogaz. L'analyseur en ligne envoie les mesures réalisées par les sondes vers un transmetteur qui traite et affiche les données. Il est également possible

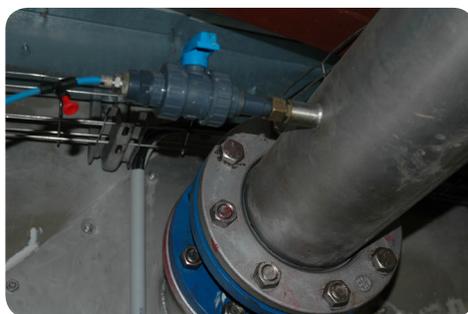


Figure 3 : Prise d'échantillon sur la conduite de biogaz

d'enregistrer, de stocker et d'envoyer vers un ordinateur ces données. La détection de chaque composé nécessite l'utilisation d'une sonde particulière.

L'analyse du biogaz peut également se faire ponctuellement à partir d'un analyseur portable. Cependant, du fait que les unités de méthanisation sont

généralement équipées d'un analyseur de biogaz l'analyseur portatif peut servir à analyser ponctuellement le biogaz sur la canalisation.

Analyse du contenu du digesteur

Contrairement à l'analyse du biogaz, les unités de méthanisation suivent en général peu les paramètres du contenu du digesteur. Seuls la température et parfois le pH sont suivis en ligne. Les autres paramètres sont suivis ponctuellement par des analyses de laboratoire. Des outils sont disponibles sur le marché pour suivre ces paramètres sur l'exploitation, aussi bien des analyseurs en ligne que des analyseurs portables. Nous allons présenter ici les principes des principaux outils disponibles sur le marché.

Analyseur en ligne

Comme pour l'analyse en ligne du biogaz, les équipements sont constitués de sondes et d'un transmetteur. Ce type de matériel nécessite une installation



Figure 4 : Analyse de la température et du pH dans le digesteur

sur l'unité de méthanisation. Les analyses se font en général directement dans le digesteur (figure 3). Plusieurs analyseurs doivent être utilisés car aucun appareil sur le marché ne propose une analyse de tous les paramètres présentés, les techniques analytiques étant différentes. On peut distinguer les analyseurs de température, pH, conductivité et potentiel d'oxydoréduction et les analyseurs du TAC et des teneurs en AGV et en NH_4^+ . La mesure de la température, du pH, de la conductivité et du potentiel d'oxydoréduction se fait en général grâce à une sonde multiparamètres. Le TAC et les teneurs en AGV et en NH_4^+ sont eux généralement mesurés grâce à des techniques de titration automatique. Différents fournisseurs proposent ces équipements. Il est à noter que le suivi en ligne du contenu du digesteur nécessite une maintenance accrue des équipements du fait de l'encrassement des sondes notamment (maintenance mensuelle recommandée).

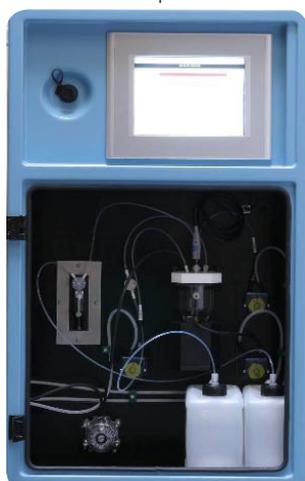


Figure 5 : Analyseur en ligne des AGV (Anasense©)

Analyseur portable



Figure 6 : Analyseur portable multiparamètres (T, pH, EC)

L'analyse en ligne possède les avantages d'être automatique et de pouvoir stocker les données, mais son installation doit se faire dès la conception de l'unité de méthanisation et elle a un coût relativement important comparé aux analyseurs portatifs. Pour l'analyse des paramètres qui peuvent être suivis ponctuellement en régime nominal, les analyseurs portables offrent une solution adaptée mais doivent être utilisés manuellement par l'exploitant. Dans le cas d'analyses ponctuelles, il est important d'homogénéiser le contenu du digesteur avant l'analyse (agitation) pour que l'échantillon prélevé soit représentatif du milieu. Des outils simples et pratiques d'utilisation ont aujourd'hui été développés. L'analyse de la température, du pH, de la conductivité et du potentiel d'oxydoréduction peut se faire avec un appareil portable muni d'une sonde multiparamètres. La mesure du TAC et de la teneur en NH_4^+ peut se faire par des outils récemment développés, inspirés des équipements existants déjà pour analyser les lisiers de porcs (Quantofix® et Agro-Lisier®). La mesure de la teneur en AGV est quant à elle plus compliquée, des travaux de recherche sont en cours pour tenter de trouver un protocole simple utilisable sur l'exploitation. D'autres équipements existent (dosage manuel, titrateur automatique...) mais ils nécessitent des manipulations de laboratoire qui ne sont pas adaptées au suivi sur l'exploitation. Les analyses en laboratoire peuvent donc être pertinentes pour certains paramètres à suivre ponctuellement comme la teneur en AGV par exemple.



Figure 7 : Analyseur du TAC et de la teneur en NH_4^+ (BiogasPro©)

Les deux techniques d'analyses possèdent des avantages et des inconvénients (tableau 2), le choix doit se faire en fonction de la stratégie de suivi que l'exploitant souhaite mettre en place. Le coût de ces équipements est également différent. Généralement il est de quelques centaines d'euros pour un analyseur portable alors qu'il est de quelques milliers d'euros pour un analyseur en ligne. Dans tous les cas, il est important de bien entretenir le matériel, d'effectuer des étalonnages réguliers et de réaliser ponctuellement des analyses en laboratoires pour vérifier le bon fonctionnement du matériel utilisé sur l'unité de méthanisation et s'assurer de la pertinence des mesures.

Pour s'assurer de la représentativité des mesures, l'échantillonnage est très important. Pour les analyses en ligne, s'assurer que le capteur n'est pas obstrué et qu'il indique une valeur représentative des conditions au coeur du digesteur. Par exemple, il se peut que la sonde de température n'indique pas la «vraie» température car la sonde est généralement proche de la paroi chauffée et qu'elle peut être obstruée par un amas de substrats. Pour les analyses ponctuelles, l'échantillon prélevé doit être représentatif du milieu. Par exemple pour un prélèvement de digestat, laisser couler un peu le digestat afin de prélever un échantillon le plus représentatif du digesteur.

La réflexion du suivi biologique doit se faire dès la conception de l'unité, ce suivi fait partie intégrante du projet de méthanisation.

Tableau 2 : avantages et inconvénients des analyseurs en ligne et portable

	avantages	inconvénients
analyseur en ligne	<ul style="list-style-type: none"> • automatisation • enregistrement des données 	<ul style="list-style-type: none"> • maintenance des appareils de mesure • coût d'installation
analyseur portable	<ul style="list-style-type: none"> • outils simples à prendre en main • prix d'achat 	<ul style="list-style-type: none"> • analyses réalisées par l'exploitant • erreurs de mesures (étalonnage, mauvaise manipulation)

Liste de fournisseurs

Cette liste n'est pas exhaustive et est réalisée à titre informatif sans valeur d'agrément par AILE. Elle est le résultat d'un travail d'investigation sur internet répertoriant les principaux fournisseurs des analyseurs en ligne et des analyseurs portatifs de biogaz et de digestat.

Tableau 3 : Liste des fournisseurs

Fabricant / distributeur	Coordonnées	Analyses
Hach Lange	Tél. : 08 20 20 14 14 info@hach-lange.fr www.hach-lange.fr Eric Monchau (Ingénieur technico-commercial région Ouest) Tél. port. : 06 12 97 61 21	digestat
Hanna Instruments	Tél. : 03 88 76 91 88 http://www.hanna-france.com/	digestat
Greisinger Electronic	http://www.greisinger.de/index.php?language=en	digestat

Fabricant / distributeur	Coordonnées	Analyses
Mesureo	Tél. : 04.74.70.22.12 contact@measureo.com http://www.measureo.com/pages/Analyseur_AGV.html	digestat
Silex International	Tél. : 01 30 37 00 00 info@silexinternational.com www.silexinternational.com	biogaz
A2E Industrie	malnoyjm@gmail.com https://sites.google.com/site/a2eindustrie/ Tél. port. : 06.20.69.09.28	biogaz
Applitek	http://www.applitek.com/en/home/	digestat + biogaz (analyse en ligne)
BiogasPro Gewitra	Tél. : +49-8231-96390 info@rimu.de http://www.biogaspro.de/	digestat (TAC et NH4+)
Envolure	yves.dudal@envolure.com www.envolure.com	digestat (AGV)

Conclusion

Chaque digesteur est unique, de part le process utilisé, les substrats introduits... Ainsi ce guide ne constitue pas un recueil d'informations à utiliser tel quel sur l'exploitation, mais fournit plutôt des conseils et les lignes directrices à suivre pour comprendre et tenter d'optimiser le fonctionnement de son digesteur.

Le suivi des paramètres présentés dans ce document permet dans un premier temps de faciliter la compréhension du fonctionnement de la biologie de la méthanisation et dans un second temps son utilisation en routine permet de surveiller l'activité des bactéries pour tenter d'optimiser la production de biogaz sur l'exploitation.

La gestion d'une unité de méthanisation demande un investissement personnel pour « prendre en main » son digesteur, anticiper les réactions des bactéries aux apports de substrats et optimiser la production de biogaz. Le suivi de la biologie fait partie intégrante de la gestion de l'exploitation.

« Un bon éleveur est un bon méthaniseur »

Réflexion souvent entendue en Allemagne

Association AILE - 73 route de Saint-Brieuc

CS 56520 - 35065 Rennes Cedex

Tel : 02 99 54 63 23 - Fax : 02 99 54 85 49

www.aile.asso.fr

responsable Biogaz : Armelle Damiano (armelle.damiano@aile.asso.fr)