

Principe de la méthanisation

Objectif : Recréer dans une enceinte fermée et étanche les conditions favorables au développement des bactéries responsables de la méthanisation (Processus biologique naturel de dégradation de la matière organique en conditions anaérobies).

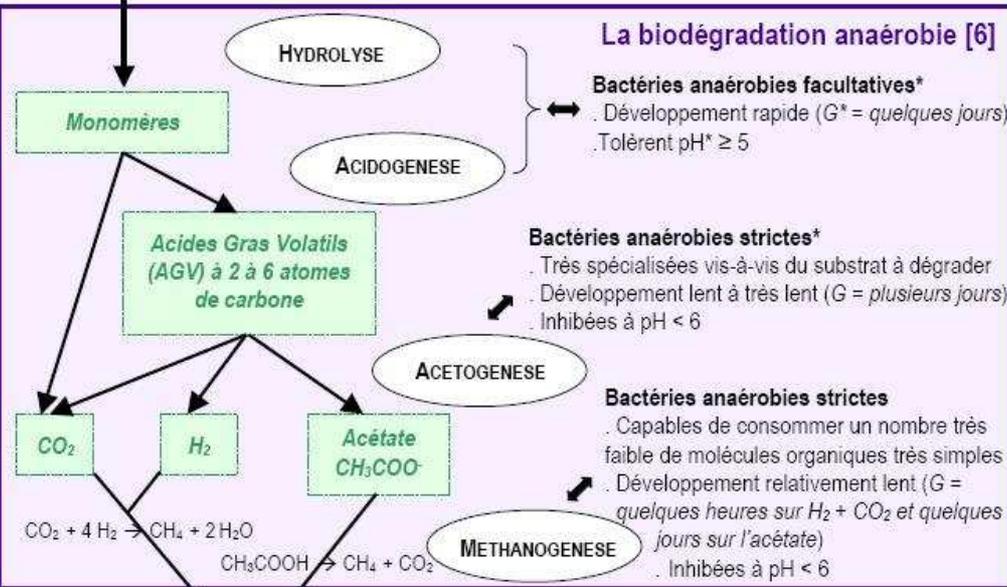
Les substrats

La méthanisation nécessite des substrats composés de matières organiques biodégradables, par exemple :

Matière organique (Bio-polymères)

Des déchets organiques : les ordures ménagères, les déchets organiques issus de l'industrie agroalimentaire (IAA), ... ;

Des effluents organiques : des effluents organiques industriels (par exemple ceux produits par les laiteries), des boues de station d'épuration, des effluents d'élevage (fumier, lisier, purin), ...



Le biogaz

CH₄ + CO₂

- Composition -

La composition du biogaz est fonction de la nature du substrat fermenté et des conditions opératoires.

| Constituant | Teneur (% du volume/volume de gaz sec) |
|------------------------------------|--|
| Méthane CH ₄ | 50 - 70 % |
| Gaz carbonique CO ₂ | 25 - 30 % |
| Hydrogène sulfuré H ₂ S | 0,5 - 5 % |
| Azote N ₂ | 0,5 - 3 % |
| Hydrogène H ₂ | 0,1 - 1 % |
| Monoxyde de carbone CO | < 0,1 % |

Tableau 3 - Composition moyenne du biogaz [6]

Produit en milieu humide, le gaz est saturé en eau.

- Voies de valorisation -

Le méthane est un gaz combustible, sa combustion peut produire chaleur et/ou électricité, ainsi que de l'énergie mécanique.

Le digestat

- Composition -

▶ Eléments nutritifs principaux (N, P, K) du substrat initial : globalement conservés → valeur fertilisante.

▶ Eléments C, H et O : une partie perdue sous forme de mélange CH₄ + CO₂.

▶ Beaucoup moins bioévolutif que le substrat initial puisque la matière la plus biodégradable a été dégradée → valeur amendante.

▶ Odeurs nettement atténuées.

▶ Plus ou moins débarrassé de graines d'adventices et de germes pathogènes, selon la température maximale atteinte lors de la réaction.

- Valorisation -

▶ Directement en épandage.

▶ Après transformations, peut être séparé en 2 produits : une fraction liquide à valeur fertilisante et une fraction solide, à valeur amendante et plus ou moins fertilisante (voir Partie 1 - § 2.3.3).

Pourquoi valoriser du fumier de porc ?

- 1,5 millions de porcs sur litière en France = 400 000 tonnes de fumier/an (équivalents à 10 000 ha de surfaces épandables).

- En moyenne, du sevrage à l'abattage, un porc sur paille accumulée utilise 84 kg de paille et produit 259 kg de fumier, soit : 2,2 kg N, 1,7 kg P₂O₅, 3,5 kg K₂O, 25g Cu et 35g Zn.

- Les fumiers porcins comportent 30% de MS environ.

- le fumier de porc est tout à fait apte à être méthanisé : il produirait autant de biogaz que les fumiers de bovins et de volailles, de qualité équivalente (% de CH₄)

- Les élevages de porcs ont des besoins en chaleur réguliers sur l'année (bon débouché pour la chaleur produite par co-génération).

- Le rapport composés stables (se transformant lentement en humus) / composés instables (à décomposition rapide) proche de 50 / 50.



Principe de la Méthanisation

• Comment interviennent les bactéries dans le processus de méthanisation ?

Les bactéries sont des micro-organismes dont le processus de croissance est endergonique, c'est-à-dire qu'il consomme de l'énergie. Pour obtenir cette énergie, les micro-organismes effectuent des réactions biochimiques d'oxydo-réduction. La méthanogénèse est le processus microbiologique au cours duquel des réactions d'oxydation des composés organiques (qui engendrent l'énergie requise par des micro-organismes) sont couplées à des réactions de réduction aboutissant finalement à la production de méthane.

Selon leur rôle dans le processus de méthanisation, des noms sont données aux bactéries des trois communautés bactériennes citées figure 1, à savoir :

- les bactéries hydrolytiques et fermentatives (hydrolyse et acidogénèse),
- les bactéries acétogènes (acétogénèse),
- les bactéries méthanogènes (méthanogénèse).

Le processus global de biodégradation anaérobie de la matière organique repose sur un équilibre dynamique relativement fragile et susceptible d'être rompu si l'un des groupes bactériens voit son métabolisme perturbé pour une raison ou pour une autre.

On comprend mieux la forte variabilité de la composition du biogaz en CO_2 et CH_4 , principales molécules produites par le métabolisme des bactéries intervenant dans le processus de méthanisation.

• Conditions et paramètres influençant la réaction

Température: conditionne l'activité des micro-organismes et donc la production de méthane => négligeable à $0^\circ C$, exploitable dès $15^\circ C$, elle augmente rapidement à partir de $20^\circ C$ avec un maximum à $37-40^\circ C$. Les fermentations anaérobies produisent très peu de chaleur, les unités de méthanisation sont donc souvent équipées de systèmes de chauffage externe, consommant une partie du méthane produit. Pour limiter l'auto-consommation, les digesteurs sont isolés thermiquement. De plus, les variations brutales de température ($> 1^\circ C$ en moins d'une journée) sont à éviter.

Oxygène: L'oxygène moléculaire (O_2) est extrêmement toxique pour les bactéries anaérobies strictes que sont les acétogènes et les méthanogènes. Il est donc indispensable de protéger le milieu de toute entrée d'air : les digesteurs doivent être équipés d'un système d'étanchéité.

pH: le pH optimal est neutre (pH = 7). Quand pH < 6, les bactéries méthanogènes sont fortement inhibées. Une chute de pH traduit un dysfonctionnement : la production d'AGV est supérieure à leur consommation. Un apport d'Alcali (lait de chaux, soude, potasse, carbonates...) peut remonter le pH à 7 - 7,5. En général, on préfère travailler à pH compris entre 7,5 et 8 pour s'assurer une marge de sécurité, pour intervenir en cas de baisse de pH régulière. **Le pH est un paramètre primordial de contrôle du processus de méthanisation.**

Charge organique entrante: il faut éviter les surcharges brutales ($> + 20\%$ en 1 journée) en déchets biodégradables, qui risquent de déséquilibrer le processus et d'acidifier le milieu. Les bactéries hydrolytiques et fermentatives, à développement rapide, peuvent s'adapter à l'augmentation de charge et produire plus d'AGV, tandis que les acétogènes, au développement plus beaucoup plus lent, ne pourra consommer le surplus d'AGV formé. On aboutit alors à une acidification susceptible d'inhiber les bactéries acétogènes et méthanogènes, capable de bloquer totalement le processus de biodégradation.

Besoins nutritionnels des bactéries: Le rapport C/N ne doit jamais être supérieur à 35. L'optimum est à 30, en dessous, la production de biogaz sera plus lente.

Absence d'inhibiteurs: La fermentation peut être entravée par la présence massive d'antibiotiques ou de désinfectants dans les effluents. En élevage de taurillons, un facteur de croissance (le Rumensin ou Monensin) a été identifié comme limitant la dégradation totale du substrat. L'ammoniac peut aussi devenir toxique, voire inhibiteur de la méthanogénèse à forte concentration (> 3 g/L d'N ammoniacal). Il semble que ce soit la forme NH_3 qui soit toxique, prédominante à pH > 9.

Agitation / brassage: Permet d'homogénéiser les conditions du milieu dans le réacteur, mais il n'est pas absolument nécessaire pour que la fermentation s'instaure. Il est par contre indispensable dans des systèmes à dominante liquide : il permet d'éviter la sédimentation des matières et de multiplier les contacts entre les substrats et la flore fixée. Il permet ainsi d'optimiser l'instauration et le réensemencement de la flore anaérobie.

• Les différents types de substrats agricoles

Les déjections animales: Généralement bien adaptées à la méthanisation : elles contiennent entre 2 et 24% de MO et ont un potentiel méthanogène très variable. Les effluents à caractère plutôt liquides (lisiers, fientes...) et ceux plutôt solides (fumiers) ne nécessitent pas les mêmes techniques.

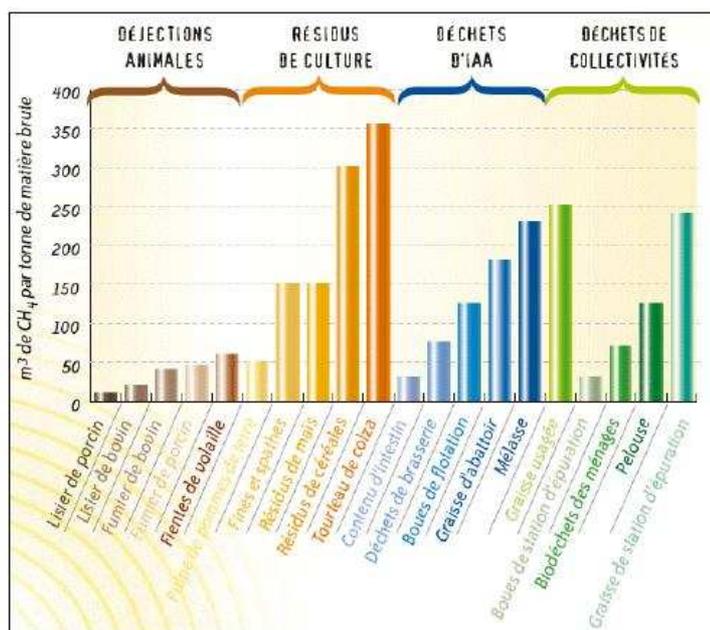
Les résidus de culture: Déchets organiques qui ont souvent de hautes teneurs en carbone, facilement assimilables dans le digesteur. Il peut s'agir : de pulpes de pommes de terre, de fanes et spathes, de résidus de céréales, de tourteau...

Les cultures énergétiques: Cultures non alimentaires, dédiées à la production d'énergie (bois, taillis à courte rotation, plantes pérennes). Les plantes céréalières et oléagineuses peuvent être cultivées à des fins énergétiques. Ces plantes ont un potentiel méthanogène intéressant. En Allemagne, la «co-digestion» s'est développée (méthanisation d'un mélange cultures énergétiques + déjections), grâce à une prime de 60€/MWh accordée pour l'utilisation de cultures dans les digesteurs. En France, cette pratique n'est pas forcément intéressante, et peut faire débat : production d'énergie et/ou d'aliments?

Les eaux chargées: Eaux blanches, brunes, vertes et jus de fermentation de «cuvées» de méthanisation antérieures.

• Le potentiel méthanogène des substrats organiques

Représente la quantité de méthane CH₄ que peut libérer une quantité donnée de substrat au cours de la méthanisation.



D'autres substrats que ceux d'origine agricole peuvent être intéressants à introduire dans le digesteur : les déchets d'IAA, de collectivités, mais aussi de restaurateurs privés ou collectifs, de GMS...

Plus les substrats sont riches en graisses, protéines et hydrates de carbone, plus leur potentiel méthanogène est important car la dégradation de ces composés permet la formation importante d'AGV, principaux précurseurs du méthane.

• Notions de « co-digestion » et de « co-substrats »

Pour augmenter la teneur en méthane du biogaz et la quantité elle-même de biogaz, le choix est souvent fait de méthaniser plusieurs types de substrats dans les digesteurs.

Dans le cadre de la méthanisation agricole, on parle de « co-digestion » et donc de « co-substrats » pour désigner les déchets organiques mélangés aux déjections animales principalement introduites dans le digesteur.

Dans le cas de la réalisation d'une co-digestion, certains points sont importants à prendre en compte tels que :

- le transport des différents co-substrats jusqu'à l'unité de méthanisation,
- la qualité et l'homogénéité du mélange des substrats et co-substrats dans le digesteur.

Il est important d'établir un contrat clair avec les producteurs des co-substrats. De même, le choix des matières organiques utilisées et les mélanges de co-substrats doivent être validés par le concepteur de l'installation.



Aspects techniques : étapes et équipements associés

*Le nombre de partenaires :
projet individuel ou projet collectif ?*

Unité de méthanisation individuelle

Un agriculteur fait le choix de méthaniser sur sa ferme les lisiers et/ou fumiers qui y sont produits. Effluents d'exploitations voisines et divers co-produits disponibles peuvent également y être associés.

Le gisement de biomasse doit être suffisamment important et régulier pour faire fonctionner l'installation.

Unité de méthanisation collective

Le projet peut être porté par :

- un groupe d'agriculteurs,*
- une entreprise indépendante.*

Souvent plus fastidieux à développer, le projet collectif nécessite notamment de :

- disposer d'un gisement de biomasses (agricoles ou autres) suffisamment important pour une valorisation énergétique,*
- valoriser de façon optimale l'énergie thermique.*

Système liquide

Le procédé de méthanisation est basé sur le traitement et la valorisation de substrats en phase liquide (lisiers principalement).

L'introduction des substrats peut être faite en continu ou en semi-continu. Un brassage doit permettre l'homogénéité des matières dans le digesteur.

*Le type de substrats :
système liquide, solide, mixte ?*

Système solide

Ce système permet de traiter des substrats solides évacuées de façon discontinue sur l'exploitation (fumiers de litières accumulées par exemple), sans dilution dans une phase liquide. On parle de « méthanisation en voie sèche ».

L'introduction des substrats se fait de façon discontinue. L'utilisation de plusieurs digesteurs permet une production de biogaz plus ou moins constante.

Le brassage n'est pas nécessaire.

Système mixte

L'installation est semblable à celle du système liquide mais peut, grâce à des aménagements spécifiques, être alimentée de façon (semi-)continue par des co-substrats solides. Un brassage permet d'homogénéiser le mélange.

• Etape 1 : Gestion des substrats

La gestion des différents substrats avant leur méthanisation proprement dite se résume en l'étude de trois points :

- leur transport de leur lieu de production jusqu'à l'unité de méthanisation,
- leur stockage éventuel à proximité de l'unité de méthanisation,
- leur introduction dans le/les digesteur(s).

Déjections animales liquides : stockage possible dans une pré-fosse, avant d'être pompées dans le digesteur.

Déjections animales solides : introduction possible dans le digesteur après évacuation du lieu de production. Elles peuvent être introduites avec un épandeur, un télescopique, un tracteur équipé d'une fourche... En système mixte, les déjections solides peuvent être mélangées à des substrats liquides, grâce à différentes techniques : introduction dans une trémie puis incorporation dans le digesteur avec une vis sans fin, introduction par un piston, mélange à des substrats liquides puis pompage...

Autres substrats solides : (ex : résidus de cultures) introduction dans le digesteur par les techniques citées ci-dessus.

Autres substrats liquides : (ex : eaux chargées) en méthanisation en voie sèche, ils peuvent être utilisés pour l'immersion des fumiers pour créer l'anaérobiose (procédé Ducellier - Isman) ou aspergés sur les fumiers et recirculés suite à leur percolation pourensemencer le digesteur en bactéries et maintenir l'humidité.

Co-substrats : (provenant d'IAA, de collectivités...) la régularité et la quantité des apports doivent respecter la capacité de « traitement » du digesteur. Ils sont acheminés par un véhicule souvent équipé d'un système d'extraction capable d'alimenter directement le digesteur ou un réceptacle préalable.

• Etape 2 : Digestion

3 différents modes de fonctionnement du digesteur:

Fonctionnement continu

Le digesteur est alimenté en continu, ce qui implique une bonne maîtrise des matériels utilisés qui sont sollicités en permanence.

C'est une technique applicable surtout aux déchets pompables (teneur en matières sèches bien inférieure à 10 % en masse).

Fonctionnement semi-continu

Le déchet est digéré en cuve étanche. On retire périodiquement une fraction du digestat, que l'on remplace par du substrat frais. Le temps de séjour moyen varie de 10 à 40 jours pour des températures de l'ordre de 30 à 35°C.

Fonctionnement discontinu, semi-continu ou continu ?

Fonctionnement discontinu (ou « batch »)

On charge le réacteur, on le ferme hermétiquement, on laisse la digestion se dérouler, puis on vide le réacteur et on recommence.

C'est une technique relativement rustique, bien adaptée pour des déchets à teneur en matières sèches supérieure à 20 % en masse.

Les technologies existantes en France: Présentation non exhaustive, seules les techniques mises en place et fonctionnant (ou sur le point de fonctionner) en France seront citées ici.

Technologie adaptée aux systèmes liquides

Digesteurs infiniment mélangés

Dans ce type de système, les matières en fermentation à l'intérieur du digesteur sont sous forme d'un liquide que l'on maintient le plus homogène possible grâce à un brassage. Il permet de traiter des mélanges de lisiers et de co-produits jusqu'à une teneur totale en matière sèche de maximum 12 %.

Le digesteur est une cuve (en béton, acier, ou autres matériaux) généralement cylindrique. Il peut être enterré ou sur le sol. Il est hermétiquement clos, isolé, brassé et chauffé.

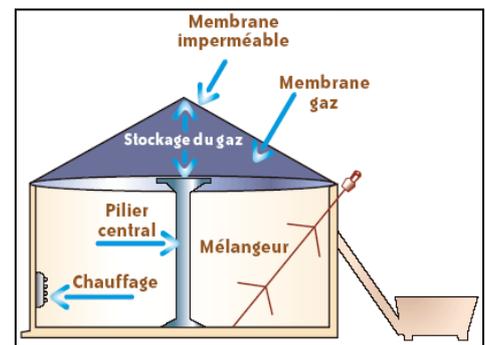
Le brassage assure plusieurs fonctions : éviter la formation de croûte en surface, éviter la sédimentation des matières, faciliter le dégazage.

Le système de brassage dépend du type de matière organique utilisée :

- Le plus souvent *mécanique* : hélices ou pales, fixe ou mobile,
- Mais peut également être *pneumatique* : par injection de biogaz comprimé à la base du digesteur avec effet air lift* (système sensible au phénomène de moussage : doit plutôt être réservé aux digesteurs présentant un ciel gazeux suffisamment haut),
- Ou *hydraulique* : boucle de re-circulation du digestat avec des pompes adaptées (système adapté aux déchets boueux).

Par ailleurs, l'orientation principale du brassage peut être horizontale, verticale ou oblique.

Le biogaz produit est stocké généralement grâce à une membrane souple (appelée couramment « gazomètre ») fixée de façon étanche au dessus du digesteur et/ou de la fosse de stockage du digestat en aval de ce dernier.



Une configuration possible d'un digesteur infiniment mélangé

Technologies adaptées
aux systèmes mixtes

Digesteurs pistons

Dans ce système, les matières circulent à l'intérieur d'un digesteur à la manière d'un fluide dans un piston. Le digesteur possède un système de brassage mécanique axial à pâles. Ces digesteurs peuvent traiter des mélanges plus épais que les précédents, à base de fumiers par exemple, jusqu'à des teneurs en matières sèches de 20 % pour les technologies en système mixte et supérieures à 25 % pour celles en système solide (ces dernières ne sont pas encore exploitées en France).

Le digesteur est constitué d'une cuve en position horizontale ou verticale, en acier ou en béton, de forme cylindrique, cylindro-conique ou parallélépipédique. Le digesteur est équipé d'une isolation, d'un système de chauffage et d'un système d'agitation mécanique.

En système solide, des systèmes de broyage et dilution de la matière avec des jus récupérés par un système de drainage interne permettent de réensemencer en bactéries les matières entrantes.

Le digesteur piston peut être raccordé à un réceptacle couvert qui sert uniquement de stockage ou peut être équipée elle-même comme un digesteur.

Le système d'agitation du piston remet en suspension les matières solides mais n'effectue pas de mélange global de l'ensemble du contenu du digesteur. Les matières organiques en fermentation avancent vers la sortie du digesteur uniquement sous l'effet des introductions quotidiennes.

Unité du
GAEC du Château

Le biogaz produit peut être stocké dans un gazomètre souple placé à côté de la cuve.

Technologies adaptées
aux systèmes liquides

Digesteurs à deux étapes

Ce système vise à maximiser les performances de la digestion ainsi que l'hygiénisation : la digestion anaérobie est conduite en deux étapes successives réalisées dans deux réacteurs en série. Les deux étapes correspondent à la phase d'hydrolyse-acidogénèse puis à celle d'acétogénèse- méthanogénèse.

Pour les systèmes liquide et mixte, **les deux réacteurs** peuvent être infiniment mélangés ou le premier digesteur peut être de type piston (teneur en matières sèches initiale plus élevée).

Il est courant que le premier digesteur soit thermophile et le deuxième mésophile.

Le biogaz produit est stocké dans un gazomètre fixé de façon étanche généralement au dessus du second réacteur (celui où a lieu la méthanogénèse) et éventuellement de la fosse de stockage en aval de ce dernier.

Si cette approche augmente les coûts d'investissement, elle permet de mieux contrôler le processus global de biodégradation et de réduire notamment les risques d'inhibition acide des bactéries acétogènes et méthanogènes. En effet, les acides gras volatils (AGV) sont produits dans le premier réacteur (par les bactéries acidogènes) et dégradés dans le second dont on peut contrôler le flux d'alimentation pour éviter toute surcharge.

Si l'hydrolyse est l'étape limitante de la dégradation, il ne semble pas intéressant d'appliquer une méthanisation en 2 étapes. En effet, quand l'hydrolyse est le facteur limitant, les bactéries méthanogènes ont le temps de croître simultanément aux bactéries hydrolytiques.

Unité
GEOTEXIA Mené

Technologies adaptées
au système solide

Digesteurs en voie sèche avec immersion de la matière

C'est l'un des plus anciens systèmes de méthanisation sèche discontinue. L'anaérobiose nécessaire à la digestion de la matière organique est créée par immersion de cette dernière dans du percolât d'anciennes cuvées ou de l'eau. Ce procédé est adapté au traitement de substrats de 30 à 40 % de matières sèches. Des derniers sont disposés dans un digesteur sans renouvellement régulier et sans brassage.

Le digesteur peut être conçu de différentes manières.

Caractéristiques des premiers systèmes construits (variance possible selon les installations) :

- Pré-fermentation aérobie dans le digesteur.
- Digesteurs : types « cuve », en béton, enterrés, isolés (isolation du dessous et des murs), plus ou moins équipés de caillebotis pour récupérer les jus et assurer la ventilation forcée lors de la pré-fermentation aérobie, étanches (étanchéité souvent assurée par un joint d'eau : le dispositif de couverture des cuves plonge dans de l'eau).
- Immersion du substrat : assurée par des grilles/barres fixées sous le système de fermeture du digesteur.
- Pas toujours de système de chauffage proprement dit. La température de digestion peut être assurée par le chauffage des matières entrantes lors de la pré-fermentation aérobie et par l'injection d'effluents préalablement chauffés (percolâts/jus de fermentation issus d'anciennes cuvées, purin ...).

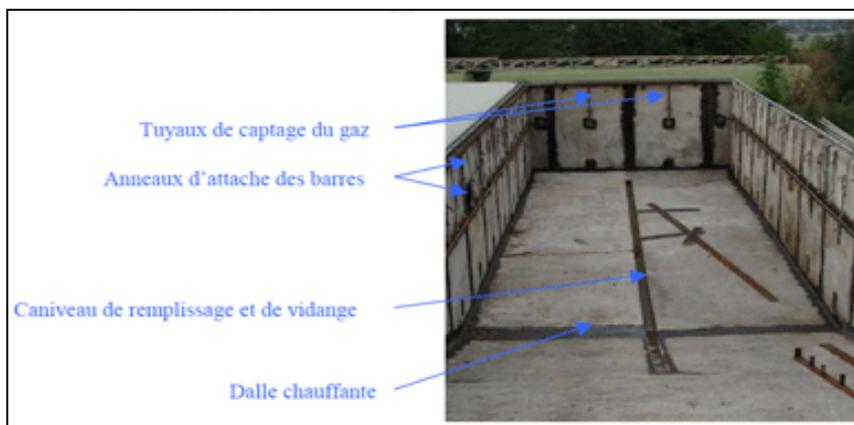
Caractéristiques de systèmes récemment construits :

Sensiblement les mêmes caractéristiques mis à part ces éléments :

- Digesteurs de type « fumières couloirs aménagées » (aussi appelées fumières « bateau ») avec couverture étanche et rampe d'accès, équipés de caniveaux de remplissage et de vidange, les murs peuvent être, ou non, mitoyens entre deux digesteurs.
- Système de chauffage du sol.

Les jus sont réutilisés pour les cuvées suivantes ou directement épandus. En cas de réutilisation, une cuve pouvant être isolée et chauffée peut permettre de les stocker.

Le biogaz produit est stocké dans un gazomètre rigide (anciennes installations) ou souple (installations plus récentes - système de fixation variable).



L'immersion complète nécessite la mise en place d'un système de rétention des matières immergées car elles flottent naturellement : ce système doit être capable de résister à des contraintes mécaniques élevées.

Digesteurs en voie sèche avec aspersion de la matière

Ce système est similaire au précédent. La différence est que l'immersion de la matière est remplacée par son aspersion avec des jus de fermentation recirculés en continu. Son développement en France tente d'apporter des évolutions au système avec immersion de la matière, qui malgré un fonctionnement jugé satisfaisant par ses exploitants, peut présenter quelques inconvénients.

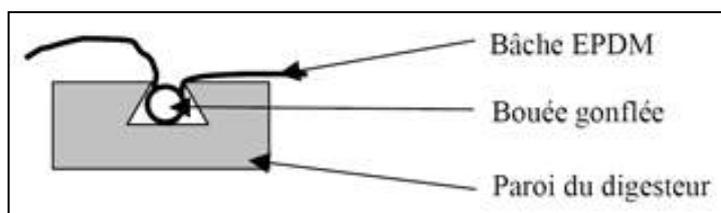
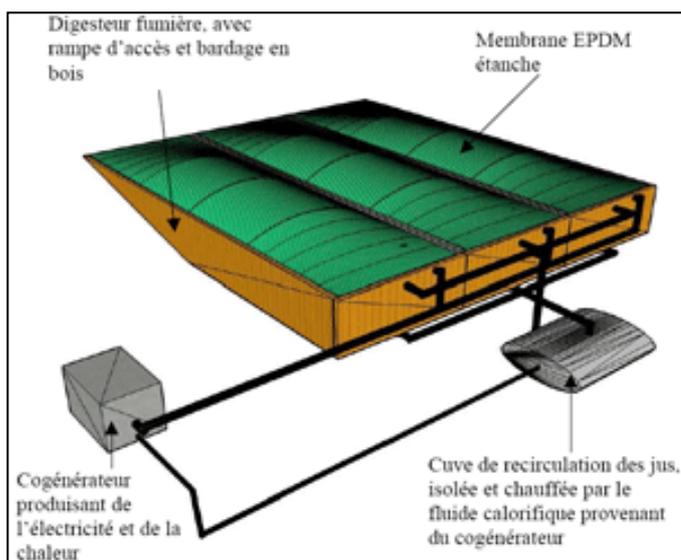
La recirculation des jus de fermentation en continu permet de garantir une humidité et une répartition microbienne homogène sur l'ensemble des matières méthanisées, tout en permettant au biogaz de s'échapper plus facilement.

... En effet, lorsque les matières sont complètement immergées sans recirculation, le biogaz produit peut avoir tendance à rester piégé dans la masse de matières flottantes.

L'indépendance des murs des digesteurs (par comparaison avec des murs mitoyens) permet d'optimiser l'isolation et l'étanchéité entre les fumières. Les murs peuvent être chauffés divers systèmes, utilisant généralement la chaleur produite par la cogénération (voir exemple du GAEC Bois Joly).

Il y a différentes techniques de fixation des membranes souples (constituant les gazomètres) sur les parois du digesteur, en voici deux :

- La technique du joint d'eau (la plus ancienne) : le sommet de la paroi des digesteur est fendu d'un caniveau - rempli d'eau- à l'intérieur duquel plonge un élément fixé à la membrane, entraînant celle-ci dans l'eau. En plus d'assurer l'étanchéité, ce système permet aussi de sécuriser l'installation : en cas de pression trop importante sous le gazomètre, le gaz peut s'échapper par le joint d'eau.
- La technique allemande : la membrane passe dans un profilé au sommet de chaque paroi du digesteur. Une bouée gonflée d'air bloque la membrane et permet de garantir l'étanchéité.



Unité
du GAEC
Bois Joly

Temps de séjour des matières dans les digesteurs et gestion de la digestion

Les temps de séjour sont variables d'une installation à l'autre. Globalement, on peut retenir :

- *En semi-continu* : comme indiqué au début de ce paragraphe, il peut être compris entre 10 et 40 jours, en fonction des procédés utilisés et l'ensemble des paramètres influençant la production de biogaz (le paramètre température notamment).
- *En discontinu*, le temps de séjour des matières dans le digesteur est aussi variable : d'au moins 30 jours, il peut atteindre plusieurs mois (pour les systèmes avec immersion de la matière). Dans tous les cas, il est fonction de la production de biogaz : quand celle-ci devient trop faible, l'exploitant peut décider de décharger le digesteur.

• Etape 3 : Valorisation du digestat

Caractéristiques du digestat

| Caractéristiques du digestat | Systèmes liquide et mixte <i>Méthanisation (semi-)continue</i> | Système solide <i>Méthanisation discontinue</i> |
|--|--|---|
| Texture et aptitude à l'épandage | <p>Plus fluide que du lisier non traité, il pénètre plus facilement dans le sol.</p> <p>La matière en suspension est plus fine d'où un digestat très homogène et facile à épandre.</p> | <p>Après égouttage, la méthanisation discontinue de substrats solides tels que les fumiers donne deux produits : la partie « solide » (substrat méthanisé mouillé) et la partie liquide.</p> <p>Généralement, la fraction liquide est recirculée dans le digesteur. Au fur et à mesure, elle se concentre en éléments minéraux et peut être comparable à un digestat issu de méthanisation continue, avec le même effet fertilisant.</p> <p>La fraction solide est comparable à un produit bien composté, son humidité dépend de la durée d'égouttage avant le déchargement. Comparé à un fumier brut ou un fumier de « bout de champs », elle est plus homogène et plus facile à épandre.</p> |
| Valeur amendante | <p>La matière organique résiduelle solide est constituée de formes moins biodégradables comme la lignine, non attaquée pendant la méthanisation, et de structures qui ont été stabilisées. Comme la fraction ligneuse contribuant à la formation de l'humus n'est pas attaquée, il y a conservation de la valeur amendante.</p> <p>Les molécules rapidement fermentescibles dégradées au cours de la méthanisation n'auraient pas amélioré de façon durable la teneur en matière organique du sol sur lequel l'effluent aurait été épandu. Par contre, la matière organique résiduelle dans le digestat de méthanisation permet d'augmenter durablement la teneur en humus du sol.</p> | |
| Valeur fertilisante | <p>Les valeurs fertilisantes en N-P-K sont globalement conservées contrairement à d'autres processus de maturation de la matière organique tel que le compostage.</p> | <p>Cas de la fraction solide issue de la méthanisation discontinue de fumiers :</p> <p>La matière sèche dégradée, 40 à 60% de la quantité encuvée, est proportionnelle à la production de gaz.</p> <p>Par contre il y a conservation, en poids, des éléments minéraux N, P, K. Cela se traduit donc par un enrichissement du fumier en ces éléments, par rapport à la matière sèche.</p> |
| <p>En terme qualitatif, les principaux changements s'opèrent au niveau de l'azote : présent sous forme organique dans les déjections fraîches, l'azote se retrouve dans le digestat majoritairement sous forme ammoniacale, une des formes minérale de l'azote qui est plus facilement assimilable par les cultures, mais également très volatile (<i>élément à prendre en compte pour les modalités de stockage et d'épandage</i>). D'autre part, l'azote ammoniacal est retenu par le complexe adsorbant du sol et n'est pas entraîné par les eaux de percolation.</p> | | |
| <p>→ <i>La méthanisation n'est pas un moyen de détruire la charge azotée.</i></p> <p>→ <i>Les épandages d'effluents étant essentiellement régis par les flux d'azote, la méthanisation ne réduit pas les besoins en surfaces d'épandage.</i></p> | | |



Aspects techniques : étapes et équipements associés

| Caractéristiques du digestat obtenu | Systèmes liquide et mixte | Système solide |
|--|---|----------------------------------|
| | <i>Méthanisation (semi-)continue</i> | <i>Méthanisation discontinue</i> |
| Germes pathogènes et graines d'adventices | <p><u>Germes pathogènes :</u></p> <p><i>La digestion thermophile est considérée comme un traitement hygiénisant des produits à haute concentration en agents pathogènes : à 55°C, élimination de 99,99 % des germes pathogènes (ordre de grandeur).</i></p> <p><i>La digestion mésophile convient pour des produits peu contaminés : à 37°C, élimination de 99% des pathogènes (ordre de grandeur).</i></p> <p>Elle peut être complétée par des traitements hygiénisants (pasteurisation, post-compostage...) si nécessaire.</p> <p>→ <i>L'efficacité dépend avant tout de la température (paramètre maîtrisable grâce à la valorisation du biogaz).</i></p> <p><u>Graines d'adventices :</u></p> <p>La méthanisation permet de désactiver les graines d'adventices présentes dans les effluents digérés.</p> | |
| Odeur | <p>Un des avantages de la digestion anaérobie des effluents d'élevage est de réduire l'odeur de ceux-ci. En effet, le procédé de méthanisation permet de diminuer fortement la teneur en Acides Gras Volatils (AGV) principaux responsables des odeurs désagréables des effluents d'élevage.</p> | |

Voies de valorisation du digestat:

Valorisation en plan d'épandage: Il faut bien connaître la teneur en éléments fertilisants du digestat pour l'épandre en respectant les ratios autorisés à l'ha. Il faut aussi connaître sa composition en éléments pathogènes et/ou toxiques. Il est possible d'utiliser le même matériel d'épandage que celui utilisé pour les effluents bruts, mais il est fortement conseillé de l'enfouir ou de l'épandre au plus près du sol, pour minimiser la perte d'N ammoniacal par volatilisation.

Post-traitements: différents types de post-traitements sont envisageables en fonction du digestat traité et des objectifs de stockage, de valorisation ou d'élimination :

- *Traitements mécaniques :* pour les digestats boueux (tx MS < 15% MB) => séparation de phases liquide - solide. La phase aqueuse est valorisable en engrais liquide, après concentration, et la phase solide en amendement de fond.
- *Traitements thermiques :* séchage et granulation (ajout éventuel de réactifs favorisant l'agglomération).
- *Traitements biologiques :* Quand le digestat contient une fraction organique biodégradable résiduelle, un traitement complémentaire aérobie de fermentation chaude est envisageable pour poursuivre la dégradation et sécher le digestat. Pour une valorisation agricole, une étape finale de stabilisation aérobie est nécessaire. On obtient au final un matériau similaire au compost, généralement appelé « affinat ».

• **Etape 4 : Valorisation du biogaz**

Le biogaz subit généralement une déshumidification et une épuration au cours de laquelle l'hydrogène sulfuré (H₂S) qu'il contient est éliminé. La solution la plus couramment utilisée est l'injection d'un petit débit d'air directement dans le ciel gazeux. Cela provoque une précipitation du soufre au niveau de l'interface gaz/liquide : le soufre se retrouve donc dans le digestat.

Le méthane, un gaz combustible pouvant produire de l'énergie:

Les unités :

J : joules cal : calorie

tep : tonne équivalent pétrole (1 161 litres)

1 stère = 1 m³ de bois (20 % d'humidité, 420 kg)

(kW) : (kilo)Watt (unité de puissance)

(kWh) : (kilo)Watt heure (unité de quantité d'énergie)

9,973 kWh/m³ de CH₄

C'est le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) du méthane.

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une quantité donnée de combustible.

On parle de pouvoir calorifique inférieur (PCI) lorsque l'eau produite par cette combustion reste à l'état de vapeur.

Correspondance des unités de mesure d'énergie :

| | kJ | kcal | kWh | m ³ de méthane | stère de bois | kg de propane ou butane | tep |
|-----------------------------|------------|------------|------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| 1 kJ | 1 | 0,239 | 2,778.10 ⁻⁴ | 2,786.10 ⁻⁵ | 1,852.10 ⁻⁷ | 2,198.10 ⁻⁵ | 2,389.10 ⁻⁸ |
| 1 kcal | 4,186 | 1 | 1,163.10 ⁻³ | 1,166.10 ⁻⁴ | 7,752.10 ⁻⁷ | 9,203.10 ⁻⁵ | 1.10 ⁻⁷ |
| 1 kWh | 3 600 | 860 | 1 | 0,1 | 6,667.10 ⁻⁴ | 0,078 | 8,577.10 ⁻⁴ |
| 1 m ³ de méthane | 35 903 | 8 577 | 9,973 | 1 | 6,649.10 ⁻³ | 0,784 | 8,577.10 ⁻⁴ |
| 1 stère de bois | 6 480 000 | 1 550 000 | 1 800 | 163,63 | 1 | 140,73 | 0,154 |
| 1 kg de propane ou butane | 46 044 | 10 999,4 | 12,79 | 127,90 | 7,05 | 1 | 1,09.10 ⁻³ |
| 1 tep | 41 860 000 | 10 000 000 | 11 629 | 1 166 | 7,752 | 913,86 | 1 |

Voies de valorisation du biogaz :

Le stockage du biogaz est possible sous une membrane souple fixée au digesteur ou dans un ouvrage séparé (type ballon souple) mais il reste plus intéressant de l'utiliser dès qu'il est produit, pour limiter les coûts.

Valorisation par cogénération : voie de valorisation la plus fréquente pour les installations de méthanisation à la ferme qui consiste à produire de l'électricité et de la chaleur, simultanément. Le module de cogénération est constitué d'un moteur ou d'une turbine entraînant un générateur de courant électrique, l'alternateur. La chaleur est prélevée sur le système de refroidissement du bloc-moteur et des fumées. La circulation d'un fluide caloporteur permet de valoriser la chaleur. Une série d'échangeurs permet une récupération maximale de l'énergie thermique. Un groupe de cogénération a un rendement électrique de l'ordre de 35% et la récupération de chaleur permet un rendement global de 85%, si toute la chaleur produite est utilisée.

Deux types de moteurs thermiques

Moteur à gaz (appelé aussi « Gasmotor »)

Ce sont des moteurs à allumage commandé, c'est à dire équipés de bougies comme les moteurs essence. Ce sont les plus répandus sur les installations allemandes. Le coût d'investissement et d'entretien est élevé.

Moteur « dual fuel »

Ce sont des moteurs à auto-inflammation du carburant par compression. Le méthane seul ne s'enflamme pas dans ces conditions à la différence du gazole. Ces groupes fonctionnent donc avec un mélange de la composition suivante : 90-95% de biogaz et 5-10% de gazole qui permet l'auto-inflammation de l'ensemble.

Ce moteur est moins coûteux à l'investissement mais engendre des frais d'achat et de stockage de fioul. Le rendement électrique est meilleur que pour un moteur gaz particulièrement pour des petites puissances.

Deux types de génératrices d'électricité

Synchrone

Ce type de génératrice fonctionne en parallèle avec le réseau électrique et également en secours en cas de défaillance du réseau.

L'avantage est donc, en cas de coupure du réseau, pour la ferme, mais aussi pour le digesteur, de continuer à fonctionner. Car si le cogénérateur ne peut plus tourner, il n'y a plus de production de chaleur, ce peut être alors l'arrêt complet du système en hiver. Le rendement est un peu meilleur que la génératrice asynchrone.

Asynchrone

Le coût est moins élevé et la durée de vie plus longue qu'un système synchrone mais ce type de cogénérateur ne permet pas de faire du secours en cas de défaillance du réseau électrique.

D'autres types de cogénération seront peut être amenés à se développer ces prochaines années :

- Les turbines à gaz: actuellement adaptées pour fonctionner avec du biogaz des centres d'enfouissement technique, de moins bonne qualité
- Les piles à combustibles: des projets de tests de piles sur site agricole sont en cours de montage avec ARIA Energie.
- Les moteurs Stirling: moteurs à combustion externe, de puissance souvent plus faible que les moteurs à combustion interne mais permettant d'obtenir des rendements semblables à ceux des meilleurs moteurs diesel de même puissance. Leur coût de production est aujourd'hui important du fait de leur faible diffusion.



Aspects techniques : étapes et équipements associés

Valorisation de la chaleur produite

Chauffage du digesteur

Une partie de la chaleur produite (environ 30 %, sous forme d'eau chaude à 85-90°C) est généralement réservée à cet effet.

Chauffage d'habitations

La chaleur produite vient en supplément sur le système de chauffage central de l'habitation de l'exploitant voir d'habitations voisines. Dans ce dernier cas, la chaleur peut être vendue.

Production d'eau chaude sanitaire

... par l'intermédiaire d'un ballon d'eau chaude.

Production d'air chaud

... utilisé dans le but de sécher des produits agricoles (fourrages, foin, ...), du bois ou de chauffer des bâtiments agricoles.

Production de froid

Il existe des réfrigérateurs fonctionnant à partir de chaleur fournie sous forme d'eau chaude. Leur prix est d'environ 20 000 €.

Le taux de valorisation de la chaleur est important car cela va fortement influencer la rentabilité du projet. En effet, le prix d'achat de l'électricité est fonction du taux de valorisation de la chaleur.

Valorisation de l'électricité produite

La méthanisation, en tant que technique de production d'une énergie renouvelable, bénéficie d'une obligation d'achat de l'électricité produite à partir du biogaz et d'une tarification spécifique avec un contrat de 15 ans.

Cette obligation d'achat à un tarif préférentiel rend l'autoconsommation de l'électricité non intéressante économiquement.

Le raccordement au réseau public

... doit faire l'objet d'une demande préalable auprès de l'Accès au Réseau de Distribution conformément à la procédure publiée par la Commission de Régulation de l'Électricité.

Les conditions tarifaires

...sont publiées dans l'arrêté du 10 juillet 2006.

Le tarif d'achat comprend :

- un tarif de base décroissant avec la puissance de l'installation,
- une prime à l'efficacité énergétique définie selon le pourcentage de valorisation de l'énergie contenue dans le biogaz,
- une prime à la méthanisation.

Valorisation voie thermique uniquement: l'utilisation d'une chaudière à gaz est le mode de valorisation le plus facile à mettre en place. L'investissement est moins élevé qu'en cogénération. A noter que l'on peut aussi produire du froid.

Utilisation d'une chaudière gaz

Il suffit d'utiliser des **brûleurs adaptés** à ce type de combustible.

Des **capteurs de la qualité du biogaz** (% CH₄) sont maintenant nécessaires afin d'adapter les conditions de combustion et respecter les normes d'émission de polluants.

Ils permettent d'optimiser la combustion en fonction du taux de méthane. Ces capteurs sont sensibles à la vapeur d'eau en particulier. Il est donc nécessaire de **déshydrater correctement le gaz**.

Cette valorisation est rentable s'il existe une **forte demande de chaleur** à proximité du site capable d'absorber la chaleur produite sur toute l'année.

La mise en place d'une chaudière peut aussi être envisagée **en cas d'arrêt de la cogénération** (entretien, panne) pour maintenir les digesteurs à température et éviter les émissions de méthane.

Utilisation d'un groupe de production de froid

La valorisation thermique sous forme de chaleur est intéressante en période hivernale. **Durant l'été**, il peut être intéressant de produire du froid pour climatiser une pièce ou pour la conservation d'aliments dans les pays chauds notamment.

Il existe **différents systèmes** permettant de produire du froid à partir de gaz, mais **tous ne sont pas adaptés pour un fonctionnement avec du biogaz**.

Certains systèmes, devant être alimentés par de l'eau à température élevée (> 90°C) pour garantir une efficacité suffisante, requièrent uniquement des **compétences de chauffagiste** pour l'installation et la maintenance. En effet, le matériel n'est pas influencé par le type de combustible utilisé pour chauffer l'eau et il n'est donc pas nécessaire de faire appel à des industriels ayant une expérience du biogaz.

Production de carburant à partir de biogaz: le biogaz peut techniquement être utilisé comme carburant, mais il existe des freins à son développement :

Freins au développement du biogaz carburant automobile

Exigence de pureté du gaz

- ▶ Doit contenir un minimum de 96 % de méthane.
- ▶ Ne doit pas contenir d'eau, de soufre, d'organo-halogénés, de carbone et de métaux.

Compression du gaz

Compression généralement autour de 200 bars, de façon à réduire l'encombrement du stockage.

Sous cette pression, le volume nécessaire est encore 5 fois plus élevé que pour un carburant liquide, ce qui constitue un handicap.

→ Pour ces raisons, l'investissement nécessaire est donc élevé.

Avantages du biogaz carburant

Le réservoir ne contient que du gaz

... alors que les réservoirs de carburants liquides contiennent un mélange de carburant et d'air, donc un mélange inflammable et explosif.

Aspects environnementaux

- ▶ Le méthane CH_4 est l'hydrocarbure qui possède la plus courte chaîne carbonée : par rapport aux autres carburants pétroliers, sa combustion permet une réduction des émissions de monoxyde de carbone et d'oxydes d'azote (tous deux des polluants atmosphériques) ;
- ▶ Réduction du bruit ;
- ▶ Réduction de la consommation d'huile.

Pour l'ADEME, cette voie de valorisation ne semble pas être une priorité : « il y a déjà fort à faire avec la valorisation du biogaz par la cogénération. C'est aujourd'hui la solution la plus aboutie. La voie du biogaz carburant ou de l'injection dans le réseau de gaz naturel pourront être intéressantes plus tard » explique Guillaume BASTIDE de la cellule méthanisation de l'ADEME.

L'association EDEN travaille actuellement sur un prototype qui épure le biogaz de ferme pour faire du carburant : elle pourrait présenter un tracteur fonctionnant au biogaz avant la fin de l'année 2008.

Peut-être que d'ici peu, selon la flotte de véhicules et la quantité de gasoil consommé sur une exploitation donnée, il pourra être intéressant économiquement d'y mettre en place une unité d'épuration et de compression du biogaz et de convertir les véhicules au méthane.

Il existe déjà des exemple d'utilisation de biogaz carburant en France et chez nos voisins européens, notamment en Suède et en Suisse :

En France, l'expérience pionnière de la communauté urbaine de Lille

De 2002 à 2004, 8 bus de la Communauté urbaine de Lille roulaient au méthane-carburant issus du biogaz en excès produit par la station d'épuration de Lille-Marquette.

Le Centre de Valorisation Organique de Sequedin, inauguré en septembre 2007, a pris le relais de la station pour la production de biogaz : il traitera, à terme, 108 600 t/an de biodéchets par méthanisation. Il devrait produire du compost mais aussi suffisamment de biogaz carburant pour alimenter 100 bus/an.

En Suède et en Suisse

Ces deux pays ont fait le choix de promouvoir le biogaz comme carburant.

Ainsi, la moitié des flottes captives en Suède fonctionne au biogaz.

En Suisse, un contrat cadre entre producteurs et distributeurs a pour but de promouvoir l'injection du biogaz dans le réseau avec un usage prioritaire en carburant.



Intérêts et limites de la méthanisation pour la filière agricole

• Intérêts pour le producteur

Intérêts économiques :

- Revenus supplémentaires et diversifiés en cas de revente de l'électricité et/ou de la chaleur produite.
- Autonomie en chaleur pour les bâtiments d'élevages et éventuellement pour l'habitation, dans un contexte de flambée des prix des énergies fossiles.
- Diversification des voies de valorisation des résidus de cultures et autres déchets organiques produits sur la ferme.
- Si l'exploitant profite d'une mise aux normes pour concrétiser son projet de méthanisation, les investissements réalisés s'en trouvent valorisés.
- Le digestat a une réelle valeur fertilisante, son utilisation peut permettre de réduire les achats d'engrais minéraux.

Intérêts agronomiques :

- Transformation des lisiers et fumiers en un produit plus assimilable par les plantes avec une réduction des odeurs, des pathogènes et des adventices.
- Les digestats sont globalement plus homogènes et plus faciles à épandre que les déjections fraîches.

Rappelons que la méthanisation ne permet pas en elle même de diminuer la charge en azote des effluents.

• Intérêts pour l'environnement, le voisinage et le territoire

Pour le voisinage plus ou moins immédiat et les personnes travaillant sur la ferme:

- Disparition des insectes attirés par les fosses de stockage
- Suppression des odeurs liées au stockage et à l'épandage

Pour l'environnement et le territoire:

- Réduction des émissions de gaz à effet de serre au niveau de la gestion et de l'épandage des lisiers et par substitution aux énergies fossiles
- Production d'énergie renouvelable
- Gestion durable et de proximité des déchets organiques d'un territoire
- Synergie entre les différents acteurs (agriculteurs, collectivités, industriels)
- Création d'emplois éventuelle sur le territoire

• Réflexion sur les limites du procédé de méthanisation

Un investissement de départ relativement élevé:

- Amortissement plus ou moins long selon le montant des subventions accordées et le montant annuel des recettes et/ou des économies permises par le procédé mis en place.
- Il existe des freins au développement de certaines filières de valorisation (ex: biogaz carburant)
- Des contraintes administratives et réglementaires rendent compliquée la concrétisation de projets de méthanisation

Une production d'énergie à partir d'effluents d'élevages uniquement jugée non optimale:

- La production d'énergie à partir des seuls effluents d'élevage n'est pas optimale du fait du potentiel méthanogène médiocre de ces substrats, comparé à d'autres substrats organiques.
- La production d'énergie doit être suffisante pour justifier les investissements, relativement élevés. Ces derniers peuvent être plus facilement amortis avec l'incorporation d'autres matières organiques fermentescibles ou « co-substrats » de pouvoirs méthanogènes supérieurs.

Une énergie pas toujours facile à exporter:

– La forme privilégiée de valorisation du biogaz, l'électricité est aisément exportable sur le réseau. Mais la chaleur produite n'est pas toujours valorisée à 100%, compte tenu de la variabilité des besoins en chaleur, de l'impossibilité de la stocker et du manque de réseaux de chaleur.

Un procédé qui ne permet pas de traiter les excédents en azote et en phosphore:

– Dans les régions en excédent structurel, la méthanisation n'apporte pas de solutions de traitement des effluents : le digestat concentre les éléments fertilisants présents dans les substrats introduits.
– Il est toutefois possible de transformer le digestat en produits organiques commercialisables après un certain nombre de traitements post-méthanisation.

• **La Méthanisation combinée au traitement aérobie des effluents d'élevage : un pilote expérimental**

Les politiques de gestion des éléments fertilisants en zones d'excédent structurel se sont orientées vers des procédés de destruction des composants azotés (400 unités actuellement, 500 à terme), et des structures d'exportation du phosphore. La destruction de l'azote se fait par traitement biologique aérobie de nitrification-dénitrification, qui est fortement consommateur d'énergie.

Par sa production de biogaz, un ouvrage de méthanisation associé serait susceptible d'améliorer le bilan énergétique global. De plus, la combinaison des traitements de méthanisation et de dénitrification pour gérer conjointement l'abattement de la charge azotée pourrait permettre des économies d'énergie.

Ainsi, le CEMAGREF de Rennes, dans son unité de recherche sur le traitement biologique des déchets, développe un pilote expérimental « DIGESTAERO », en partenariat avec l'INRA, l'Université Bretagne-Sud et deux équipementiers, visant à modéliser la conduite de telles installations, et dont les résultats seront disponibles fin 2008. Ce projet de recherche est financé par l'ANR.

Des traitements couplés existent déjà dans les stations d'épuration des collectivités (Saint-Brieuc), afin de réduire les volumes de boues à épandre.

Pour les élevages porcins concernés, la méthanisation associée au traitement aérobie se présenterait alors comme un investissement complémentaire au génie civil existant (stockage amont et aval) générant des économies d'échelle, et pourrait permettre un revenu complémentaire, par la revente de l'énergie excédentaire.

Le pilote expérimental DIGESTAERO

Pour plus de précisions, rendez-vous sur le site : <http://digestaero.rennes.cemagref.fr/>

Une illustration extraite du site :

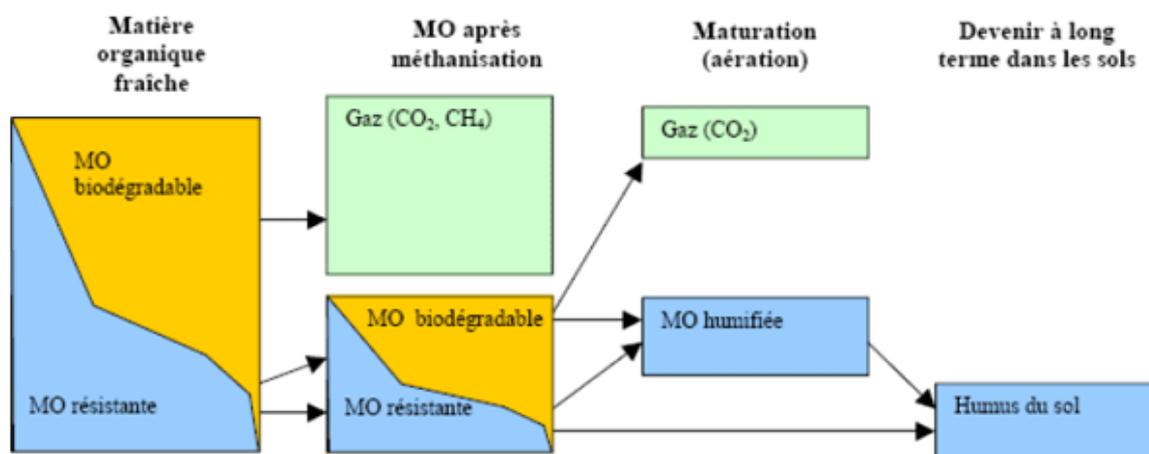
DIGEST...
Digestion anaérobie



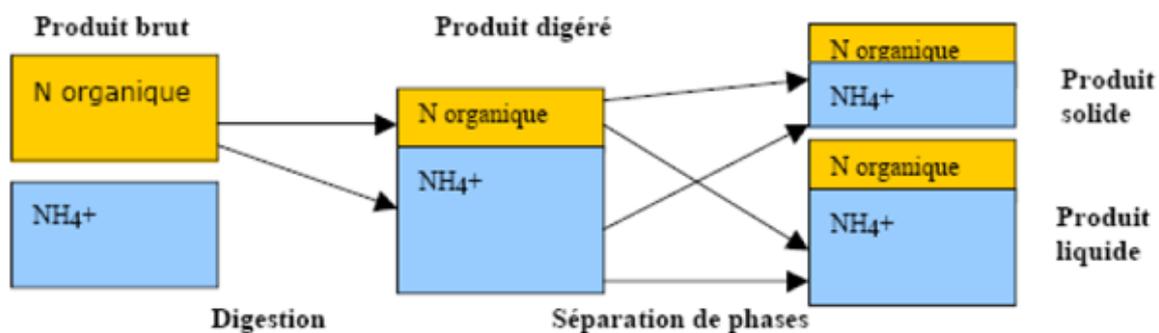
et **... AÉRO**
traitement aérobie du lisier



Carbone



Azote



Pour plus d'informations, contacter :

Tatiana Molé, chargée de mission « porc durable »
02.96.58.01.94 / tatiana.mole@reseau-coherence.org



Réseau Cohérence

Pôle Agricole, 2 avenue du chalu-tier sans pitié
22190 Plérin