

**Questions-réponses
sur la biométhanisation de la fraction
fermentescible des
déchets ménagers municipaux**

Cas d'étude :

**Brecht, Ypres, Varennes-Jarcy et Mülheim
Trois procédés différents**

Auteur : Gabriela Collado
Cadre : Stage IBGE
Année : 2007

Avant-propos

Ce document fait partie d'une initiative qui vise à apporter des éléments de réponse aux questions que se posent les autorités publiques locales sur le traitement par biométhanisation des déchets organiques ménagers et assimilés.

Table de matières

Définitions et lexique utilisés	5
1. Introduction	7
2. Qu'est ce que la biométhanisation ?	8
3. Quels types de déchets peut-on traiter par cette technique ?	9
3.1. Les déchets ménagers fermentescibles et les déchets assimilés.....	9
3. 2. Peut-on ajouter le gazon et le bois ?.....	10
3.3. Les langes aussi ?.....	10
3.4. Les plastiques biodégradables ?.....	11
3.5. Et les boues d'industries ?.....	11
4. Quelles sont les différentes technologies.....	12
4.1. Le procédé général.....	12
4. 2. Les technologies de méthanisation	13
4. 3. Paramètres importants à considérer	15
5. Quels sont les produits finaux et leurs possibilités de valorisation ?	16
5.1. Le biogaz.....	16
5.1.1. En pratique, comment le biogaz est-il utilisé ?	16
5.1.1.1. Production d'électricité	16
5.1.1.2. Production de chaleur	16
5.1.1.3. Carburant de véhicules	17
5.2. Le digestat.....	20
5.2.1. Utilisations potentielles du digestat	20
5.2.1.1. Compost.....	20
5.2.1.2. Usages non alimentaire.....	20
5.3. Est-il possible de valoriser les refus ?.....	21
6. La collecte sélective de déchets organiques est-elle indispensable ?	22
6.1. Différences dans les exigences de pré-traitement	22
6.2. Répercussions sur la qualité du compost	22
6.3. Une réflexion nécessaire sur l'objectif poursuivi.....	23
7. Le coût de la biométhanisation ?.....	24
7.1. Coûts d'investissement	24
7.2. Coûts de fonctionnement	24
7.3. Coûts de traitement	24
7.4. Revenus.....	24
8. Cas d'étude.....	26
8.1. Le cas de l'installation de Brecht - Belgique	26
8.2. Le cas de l'installation d'Ypres	31
8.3. Le cas de l'installation de Varennes-Jarcy.....	38
8.4. Le cas de Mülheim an der Ruhr	43
9. Conclusions : quelques considérations au moment de choisir le type d'installation.....	51
10. Bibliographie et sites internet utiles.....	53
11. Annexe.....	54

Définitions et lexique utilisés

Aérobic : littéralement « en présence d'oxygène » ; Désigne un être vivant ou un phénomène qui a besoin d'oxygène pour exister.

Anaérobic : « en l'absence d'oxygène » ; Désigne un être vivant ou un phénomène qui n'a pas besoin d'oxygène pour exister.

Biofiltre : La biofiltration est une technologie que consiste à neutraliser des odeurs par un processus naturel. L'air est capté et extrait des sources malodorantes par ventilation mécanique, puis insufflé dans l'unité de traitement où il est humidifié et ensuite biodégradé. La biodégradation se produit dans le biofiltre où des microorganismes présents dans le garnissage humide absorbent les molécules malodorantes et les oxydent grâce à leur complexe enzymatique.

Biogaz : mélange gazeux produit par la biométhanisation de déchets organiques, dont les principaux constituants sont le méthane et le dioxyde de carbone.

Biogaz brut : biogaz qui sort du digesteur.

Biométhanisation : dégradation biologique de déchets biodégradables sous des conditions contrôlées afin de produire du biogaz et du digestat.

Déchets biodégradables ou Biodéchets : déchets composés de matières carbonées pouvant subir une décomposition aérobie ou anaérobie. Des exemples sont les déchets de cuisine, de jardin, le papier et le carton, etc.

Digestat : produit solide issu de la biométhanisation.

Effet de serre : réchauffement supplémentaire de l'atmosphère suite à l'augmentation de la présence dans celle-ci de gaz absorbant le rayonnement infrarouge. Des exemples sont le méthane, le dioxyde de carbone, CFC (anciens gaz propulseurs, liquides de refroidissement).

FFOM : fraction fermentescible des ordures ménagères.

Hydrogène de sulfure (H₂S) : ou Hydrogène sulfuré. Gaz composé d'hydrogène et de soufre, facilement reconnaissable à très faible concentration à son odeur "d'oeuf pourri", qui disparaît à plus forte concentration. Il est émis lors de la fermentation anaérobie (en absence d'oxygène) de matière organique (Source : Actu Environnement).

Matière organique (MO) : est la matière carbonée (glucides, protides et lipides) produite par des êtres vivants. À la différence de la matière minérale, la matière organique est souvent biodégradable. Elle peut ainsi être facilement recyclée en compost ou en biogaz.

Matière sèche (MS) : est ce que l'on obtient lorsqu'on retire l'eau d'un produit. Le taux de MS est le rapport entre le poids de matière après séchage à 105°C et le poids de matière fraîche.

Méthane (CH₄) : Gaz incolore, inodore et non-toxique. Il est libéré dans l'atmosphère quand la matière organique se décompose dans des environnements avec de faibles niveaux d'oxygène. Il contribue fortement à l'effet de serre tandis que sa durée de vie dans l'atmosphère est de l'ordre de la décennie. Les sources naturelles incluent les terres marécageuses, les marais, les termites et les océans. Les sources synthétiques incluent l'exploitation et l'incinération de combustibles fossiles, les processus digestifs chez les ruminants tels que le bétail, les rizières et les sites d'enfouissement des déchets. Depuis le début de la révolution industrielle, la concentration atmosphérique en méthane a plus que doublée, et a contribué à 20% à l'augmentation de l'effet de serre, en deuxième place seulement après le dioxyde de carbone (Source : Actu Environnement)

Nm³ : « normal m³ », correspond à un volume occupé par le gaz dans les conditions dites normales, c'est-à-dire à 273,15 °K et 101 325 Pa. Selon la loi des gaz parfaits, une mole de gaz occupe 22,4 x 10⁻³ m³ dans les conditions normales. Connaissant la masse molaire du gaz, on peut en déduire le volume occupé par une masse déterminée de gaz dans les conditions normales.

Organochloré ou fluoré : composé organique contenant du chlore ou du fluor comme les dioxines et les PCB.

Plastique biodégradable et bioplastiques : Les plastiques biodégradables sont des plastiques qui vont se décomposer dans des environnements aérobie (compostage) ou anaérobie (décharge). De leur côté, les bioplastiques sont issus de ressources renouvelables, telles que le maïs, la patate douce, le blé, la canne à sucre ou l'huile de ricin.

Pouvoir calorifique inférieur (PCI) : c'est la chaleur dégagée (MJ/Nm³) par la combustion de 1 Nm³ de biogaz lorsque l'eau produite reste à l'état vapeur.

Tonne d'équivalent-pétrole (Tep) : unité exprimant la valeur calorifique d'une forme d'énergie quelconque en prenant comme référence l'énergie dégagée lors de la combustion d'une tonne de pétrole brut.
1 tep = 42 GJ.

Temps de Rétention Hydraulique (TRH) : temps nécessaire de résidence du substrat dans le réacteur.

1. Introduction

A l'heure actuelle, trois options sont notamment retenues au moment d'évaluer le traitement de la fraction organique des déchets municipaux et des déchets assimilés. Il s'agit de *l'incinération, du compostage* et de *la biométhanisation*. Cette dernière, un processus anaérobie, est aujourd'hui une technologie en plein essor en Europe. Développée dans des installations pilotes dans les années 1980, elle est devenue une biotechnologie établie et au stade de maturité dès le début des années 1990. Dans la dernière décennie, le développement de la biométhanisation a constitué une innovation importante dans le domaine des installations de traitement de déchets en Europe. De nos jours, une dizaine de fournisseurs se partagent le marché européen et plus d'une centaine d'unités industrielles qui traitent les déchets ménagers fermentescibles sont en service.

Par ailleurs, la Directive 1999/31/CE¹ du Conseil du 26 avril 1999 concernant la mise en décharge de déchets municipaux biodégradables, prescrit la réduction de 50 % en poids de ce type d'apports d'ici 2009 et de 65 % d'ici 2016. En effet, les déchets solides municipaux contiennent une proportion significative de matière biodégradable. Lorsqu'ils sont amenés en décharge, ces déchets sont dégradés et des gaz (notamment du méthane et du dioxyde de carbone) sont émis dans l'atmosphère. Le renforcement de la législation européenne en ce qui concerne la limitation de la mise en décharge de déchets biodégradables pousse ainsi les décideurs politiques à trouver des solutions alternatives pour le traitement de ces déchets.

La biométhanisation de déchets fermentescibles ménagers et des assimilés peut elle constituer une option adéquate au niveau local ?

Face à ces nouveaux défis, la biométhanisation constitue une solution avec des impacts économiques et environnementaux qui semblent satisfaisants. A ce sujet, il est important de rappeler que le méthane (un des principaux composants du biogaz) est non seulement un gaz utilisable en tant que source d'énergie, mais il est aussi un gaz à puissant effet de serre. Il contribue au réchauffement climatique avec un potentiel de réchauffement de 20 fois celui du CO₂. Ainsi, l'intérêt de l'utilisation du biogaz est à la fois économique et environnemental.

Par ailleurs, la biométhanisation comporte d'autres avantages importants. Mise à part la diminution des gaz à effet de serre (CO₂ et CH₄), la biométhanisation permet notamment d'éviter l'incinération des déchets hautement humides à faible pouvoir calorifique et d'avoir un meilleur contrôle des nuisances olfactives qui résultent souvent des centres de compostage ouverts. De plus, ses produits (le biogaz et le digestat) offrent différentes possibilités d'être valorisés économiquement.

Cependant, plusieurs questions pratiques se posent toujours. Quelles sont les options technologiques ? Quelles sont les considérations dont il faut tenir compte au moment de choisir le procédé ? Et les nuisances olfactives ? Est-il nécessaire d'établir un système de collecte sélective de déchets organiques ? Quelle est la surface nécessaire au centre de traitement ? Et les coûts associés ? Peut-on traiter les langes ? ... Telles sont certaines des questions que se posent les autorités publiques à propos de la biométhanisation. L'objectif de cet avant-projet est ainsi d'apporter des éléments d'aide à la prise de décision.

¹ Directive 1999/31/CE : JO L 182 du 16.7.1999, p. 1–19

2. Qu'est ce que la biométhanisation ?

Le processus connu sous le nom de **biométhanisation** (ou digestion anaérobie) consiste en la dégradation de la matière organique, soit-elle d'origine urbaine, industrielle ou agricole. Ceci à une température adéquate, en absence d'oxygène et à l'abri de la lumière. Il s'agit d'une dégradation fermentative qui est le résultat de l'activité microbienne. Ce processus conduit à la production d'un gaz naturel renouvelable riche en méthane² : **le biogaz**, et d'un résidu organique appelé **digestat**.

Concrètement :

matière organique + nutriments + bactéries = nouvelles bactéries + matière organique + biogaz + H₂O
(ordures ménagères) résistante (digestat)

Dans une installation de biométhanisation, la digestion se passe dans une espèce de silo (une grande cuve fermée isolée thermiquement) appelé **digesteur** ou **réacteur**. En termes chimiques, la dégradation anaérobie de la matière fermentescible qui rentre dans le digesteur compte 3 phases principales. Elles sont présentées par la Fig. 2.1. et il s'agit de :

- L'**hydrolyse** et l'**acidogénèse**, où les bactéries découpent la matière complexe (lipides, cellulose, amidon, protéines, etc.) en molécules plus simples pour, ensuite, les transformer en alcools, en acides et en hydrogène.
- Puis, pendant l'**acétogénèse**, les bactéries acétogènes reprennent les alcools et les acides pour produire des acétates (CH₃COO) et de l'hydrogène (H₂).
- Et enfin, a lieu la **méthanogénèse**. Dans cette étape finale du processus, les bactéries méthanogènes conduisent à la production du biogaz : un mélange de méthane (CH₄), de dioxyde de carbone (CO₂) et de vapeur d'eau (H₂O).

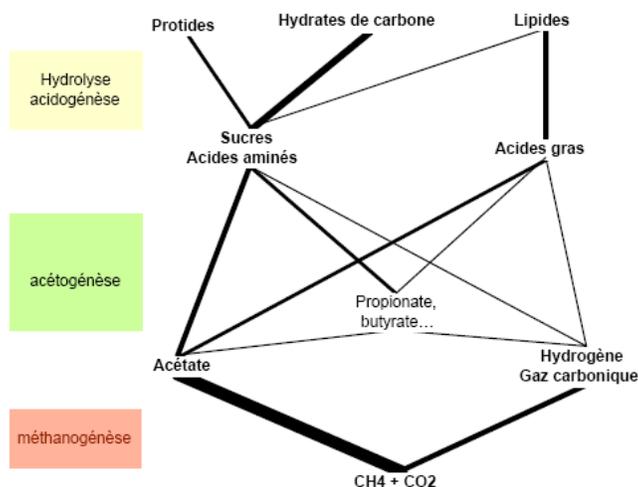


Figure 2.1 : Les étapes de la biométhanisation (Source : ORDIF-ARENE)

² Le méthane est le principal constituant du gaz naturel.

3. Quels types de déchets peut-on traiter par cette technique ?

En théorie, tous les *déchets biodégradables* aussi appelés biodéchets³ peuvent être traités dans une installation de biométhanisation. En pratique, il existe cependant certaines contraintes techniques et éventuellement aussi réglementaires qui font que certains déchets sont plus appropriés que d'autres pour ce type de traitement. De manière générale, les matières organiques utilisées pour la biométhanisation comprennent : la fraction organique de déchets ménagers, les déchets verts, les déchets des industries agroalimentaires, les boues de fosses septiques, les déchets organiques d'élevage, les boues de Station d'épuration des eaux usées (STEP), etc.

La Figure 3.1 présente la quantité de biogaz produit selon le type de matière fraîche entrante. Notons que d'autres déchets organiques méthanisables typiques du milieu rural sont aussi considérés.

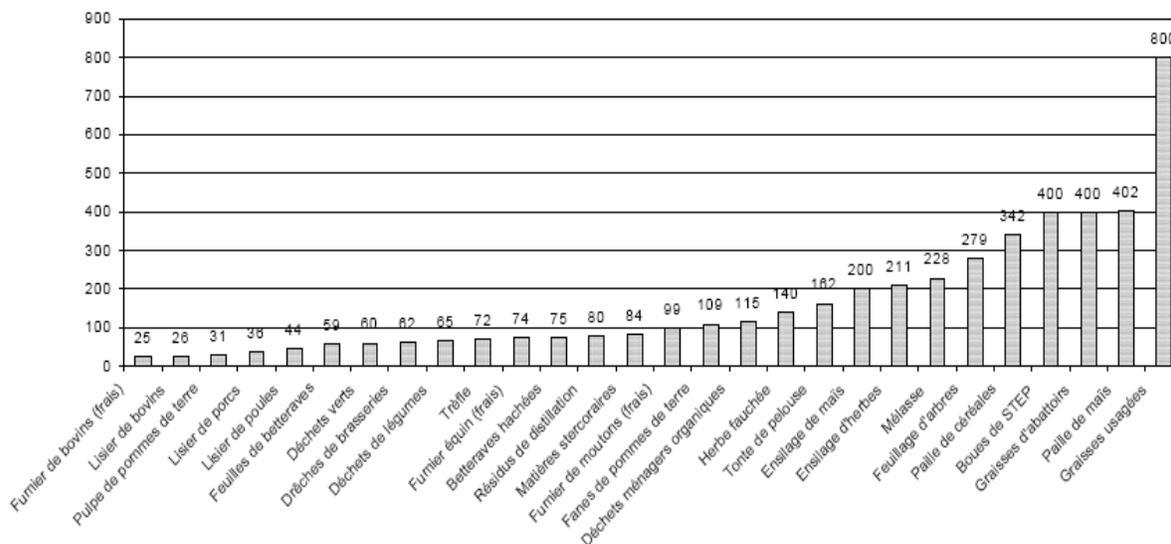


Figure 3.1 : Production de biogaz en m³/tonne de substrat entrant (Source : IRCO)

3.1. Les déchets ménagers fermentescibles et les déchets assimilés

La fraction fermentescible des ordures ménagères (FFOM) pouvant être traités par biométhanisation comprennent :

- **les déchets de cuisine** : les restes de repas (légumes, viande, ...), d'huiles, de graisses, les filtres et les marcs de café, les sachets de thé, ... Ces déchets organiques de composition variée présentent un bon potentiel de production de biogaz : environ 150 m³/tonne de déchets (Source : RDC),
- **les déchets de jardin** aussi appelés déchets verts : surtout les petits déchets de jardin notamment les feuilles et les fleurs fanées sont aptes à la biométhanisation. Ces types de déchets ont un rendement moyen de 90 m³/tonne (Source : RDC),

³ Les déchets biodégradables comprennent tous les déchets pouvant subir une décomposition anaérobie ou aérobie

- **le papier et le carton** : il s'agit surtout du papier souillé qui se trouve typiquement dans la cuisine et qui ajouté aux autres déchets méthanisables permet d'augmenter le rapport C/N. Les papiers souillés des ménages permettent un rendement d'environ 300 m³/tonne (Source : RDC).

Par ailleurs, d'autres déchets méthanisables du même genre que ceux générés par les ménages correspondent à ce qu'on appelle "*déchets assimilés*". Il s'agit **des déchets de cuisine** des Hôtels, de la Restauration et des Cafés (dit **secteur HoReCa Belgique**), et aussi, les **déchets de la grande restauration** (tous les autres services de restauration : ceux des écoles, des compagnies, des administrations, etc.) et des **marchés de fruits et légumes**. Ces déchets, représentent aussi un potentiel intéressant de production de biogaz. On estime leur rendement à 150 m³/tonne chacun.

Mis à part la fraction organique des déchets ménagers et assimilés, il est à noter que d'autres matières organiques présentes en milieu urbain peuvent aussi être méthanisées. Il s'agit des **boues de fosses septiques** et des **boues de station d'épuration**. Cependant, un aspect à considérer qui peut présenter des inconvénients est le contenu en métaux lourds dans le digestat obtenu. Une analyse des cas spécifiques est nécessaire afin d'évaluer leur impact dans le produit fini.

3. 2. Peut-on ajouter le gazon et le bois ?

Même si le gazon et le bois sont, en effet, des déchets biodégradables, leur traitement par cette technique pose des problèmes spécifiques.

Dans le cas des **tontes de pelouse**, leur traitement par biométhanisation (si elles sont le principal composant du substrat à méthaniser) présente les désavantages d'un faible rapport C/N (entre 15 et 20) et d'un taux d'humidité élevée. Celles-ci sont à l'origine d'un rendement dans la production de biogaz d'environ 111 m³/tonne (Source : RDC). Mais rien n'empêche de mélanger le gazon aux autres déchets plus efficacement méthanisables. Il peut ainsi contribuer à l'hydratation des autres déchets qui, étant solides, devront inévitablement être hydratés dans la phase de pré-traitement.

En ce qui concerne le **bois**, il n'est pas possible de le traiter par cette technique. A cause de son contenu élevé en lignine⁴, le bois n'est pas digéré par les bactéries impliquées dans la digestion anaérobie. Par contre, il peut être dégradé par compostage. Des champignons présents uniquement dans des conditions aérobies sont responsables de sa dégradation. De ce fait, même si le bois est accepté dans les installations de biométhanisation, il n'est pas méthanisé mais broyé et ajouté au digestat en fin du processus. Ce mélange des fibres de bois et de résidu de digestion suivront un processus de maturation pour se transformer en compost. Les fibres ont ici un rôle de régulateur d'humidité en absorbant l'excès d'eau du digestat. Le bois est ainsi un composant utile à la maturation du compost.

3.3. Les langes aussi ?

A l'exception des plastiques et des « velcro », les langes constituent un substrat biodégradable apte au traitement par biométhanisation. En effet, entre 85 et 95 % du lange est converti en biogaz avec un rendement faible d'entre 50 et 60 Nm³/tonne. Cependant, du point de vue environnemental, la biométhanisation de ce type de déchets est très intéressante si l'on considère que les langes mettent des centaines d'années pour se dégrader complètement dans une décharge. Dans les pays européens, les producteurs principaux de ce gisement sont les enfants et les personnes âgées. Dans la Région Bruxelles-Capitale, ce gisement représente environ 14.000 tonnes/an (soit l'équivalent de 14kg/hab/an), un chiffre important par rapport aux autres flux intéressants pour la biométhanisation (Source : RDC).

⁴ Lignine : elle intègre les parois de certaines cellules végétales des plantes ligneuses (la partie brune des plantes) et leur confère ainsi leur rigidité.

S'ils sont traités, il est conseillé de séparer les couches en plastiques au cours du pré-traitement. Ceci du fait que la décomposition des matières plastiques est associée à la production de substances contaminantes du gaz produit. De manière générale, cette dégradation peut conduire à l'apparition du sulfure d'hydrogène (H₂S), d'organochlorés, de fluorés et/ou de siloxanes⁵. Dans le cas des langes, les siloxanes semblent être un problème à considérer du fait qu'ils peuvent se volatiliser pendant la digestion anaérobie et contaminer le biogaz produit, affectant ainsi sa qualité. La combustion d'un biogaz contaminé par des siloxanes contenus dans les langes, produirait des microcristaux de silice qui présentent des propriétés abrasives pouvant causer des dommages aux engins à gaz, aux échangeurs de chaleur et aux systèmes de traitement catalytiques de gaz d'échappement (Dewil et al., 2006). Ceci représente, évidemment, une entrave potentielle à l'utilisation du biogaz comme carburant de véhicules.

Comme on l'a vu plus haut, dans les centres de biométhanisation, le biogaz brut produit subit un post-traitement où il est épuré afin de se défaire des contaminants éventuels. Cependant, un post-traitement plus poussé que celui réalisé d'office peut s'avérer nécessaire pour éliminer tant les siloxanes que le H₂S (cf. point 5.2).

Le centre de biométhanisation à Brecht, décrit au point 9.1. accepte les langes, qui sont traités avec les autres déchets organiques ménagers collectés sélectivement. Ceci après un déchirage mécanique qui permet d'enlever les couches en plastique. Leur biogaz ne présente pas des problèmes de siloxanes.

3.4. Les plastiques biodégradables ?

Les matériaux polymères biodégradables combinent deux caractéristiques intéressantes : les bonnes qualités d'usage des plastiques synthétiques et la capacité à être dégradés par une attaque microbienne. Par définition, ils sont des matériaux aptes au traitement par biométhanisation. De plus, ils ont un potentiel élevé de production de biogaz du fait de leur faible taux d'humidité. Cependant, à cause de contraintes techniques, les plastiques biodégradables ne peuvent pas être traités par un procédé humide (Source : RDC). En effet, ces plastiques sont facilement éliminés durant la phase de prétraitement car ils flottent en haut du pulpeur (cf. point 9.2. l'exemple de Ypres - procédé humide) et ils ne rentrent donc pas dans le digesteur. Les plastiques ainsi récupérés sont mis en décharge ou incinérés. Le pré-traitement par voie humide est très efficace dans l'élimination de plastiques contaminants, mais lorsqu'il s'agit des plastiques biodégradables, cette efficacité représente un désavantage.

En ce qui concerne le procédé sec, et particulièrement si on traite des déchets mélangés, un pré-traitement qui élimine les plastiques est aussi prévu. C'est le cas aussi de l'installation à Varennes-Jarcy (cf. point 9.3).

3.5. Et les boues d'industries ?

Certaines boues d'industries sont aptes à être méthanisées. Toutefois, selon le type de boue en question, la teneur en contaminants peut être élevée. Il peut s'agir, par exemple, des métaux lourds. Ils peuvent représenter non seulement un inconvénient du point de vue de la qualité du digestat obtenu mais aussi, et plus important, ils peuvent affecter la production de biogaz.

D'autres substances, telles que les sels sont aussi susceptibles de causer des dysfonctionnements au niveau du processus de biométhanisation. Tant la présence de sels que de métaux lourds conduiraient à une conductivité élevée qui affecterait la biométhanisation. De même, il peut s'agir d'antibiotiques, de certains oligo-éléments et autres inhibiteurs de la fermentation. Le PH des boues peut aussi, si trop acide, bloquer la production de méthane (Source : Bureau IRCO Sprl).

La décision d'inclure ou pas des boues d'industries comme substrat avec les autres déchets fermentescibles doit être analysée soigneusement en considérant fondamentalement le type de boue à traiter et la qualité de digestat désirée. La qualité de ce dernier devra être adapté aux débouchés prévus tant pour le digestat que pour le biogaz après le post-traitement.

⁵ Siloxanes : composés gazeux et non particuliers à base de silicium.

4. Quelles sont les différentes technologies?

Dans cette section, nous présentons tout d'abord un rappel technique général du procédé et par la suite nous donnons un aperçu des différentes technologies actuellement disponibles.

4.1. Le procédé général

De manière générale, le processus impliqué dans l'obtention du biogaz comprend trois grandes phases :

- La première phase consiste dans le **pré-traitement**. Il est destiné, d'une part, à la séparation des déchets méthanisables des autres résidus tels que les plastiques, les métaux, le verre, le bois, etc., et d'autre part, à l'homogénéisation du substrat avant l'entrée dans le digesteur. Le prétraitement peut comprendre des opérations telles que le broyage, le tri (volumique, densitométrique, magnétique) et le mélange. Dans le cas d'un procédé humide, cette première phase peut impliquer l'hydratation du substrat. Le pré-traitement sera ainsi plus ou moins poussé selon la qualité des déchets (collectés sélectivement ou non) qui arrivent au centre de traitement.
- Ensuite, la deuxième phase correspond à la **digestion de déchets** qui rentrent dans le réacteur, c'est la biométhanisation proprement dite. Grâce à l'action combinée de plusieurs communautés bactériennes, cette phase de digestion permet la production de biogaz brut et de digestat. La production de biogaz et le pourcentage de méthane contenu dans le biogaz dépendront logiquement du type de déchet traité : du rapport carbone/azote, du taux d'humidité, du PH, de la température et, naturellement, de la quantité de déchets introduits dans le digesteur. Il existe différentes technologies de méthanisation disponibles qui seront résumées au point 4.2.
- Finalement, une phase de **post-traitement** est appliquée tant au biogaz produit qu'au digestat avant leur valorisation. Le post-traitement dépend de la nature du substrat et de sa destination. Pour le biogaz, il s'agit de sa déshydratation et de son épuration. En ce qui concerne le digestat, un processus de déshydratation et puis de séchage partiel et de maturation sont nécessaires pour le transformer, par exemple, en compost commercialisable.

La Figure 3.2 présente un résumé des étapes impliquées dans le traitement par biométhanisation.

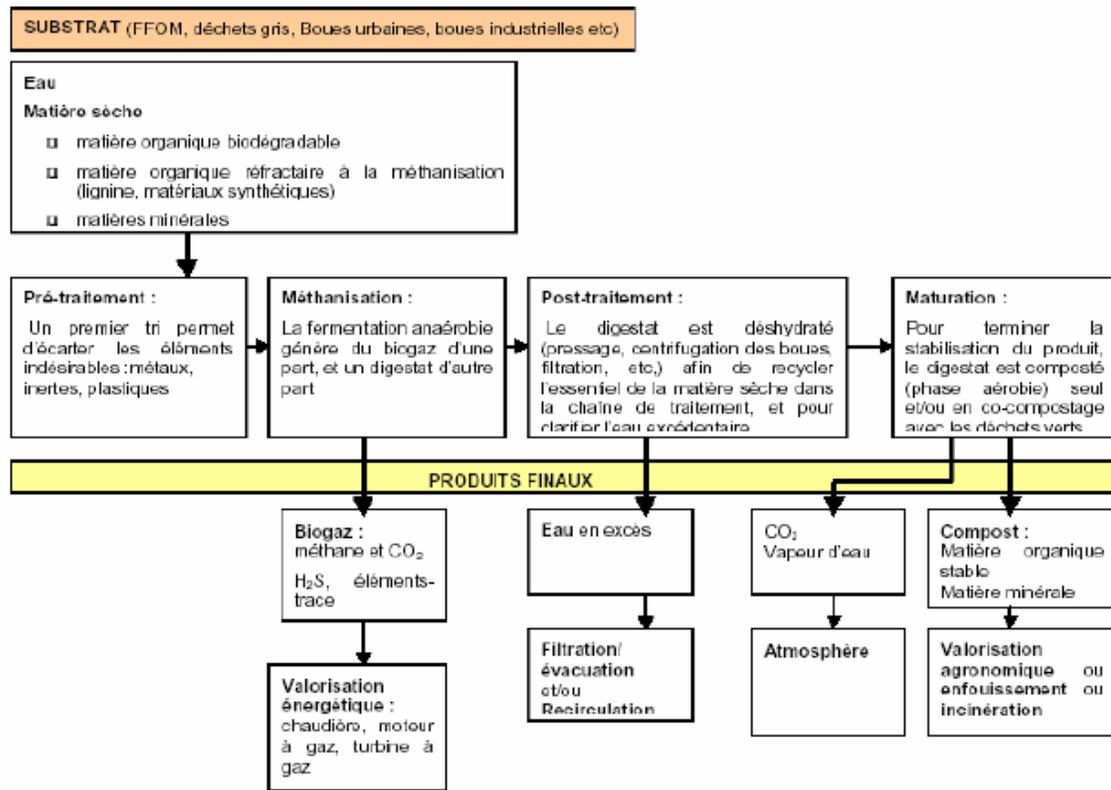


Figure 3.2: schéma de la filière de méthanisation
(Source : ORDIF-ARENE)

4. 2. Les technologies de méthanisation

Même si la digestion de déchets par biométhanisation s’effectue toujours sous contrôle et dans un réacteur fermé, il existe différents systèmes qui se distinguent sur base de différents paramètres opératoires. Ces derniers comprennent la teneur en matière sèche (MS) du substrat entrant (procédé humide ou sec), le mode d’alimentation du réacteur (continu ou batch), le type de mélange dans le digesteur (infiniment mélangé ou piston) la température de digestion (mésophile ou thermophile), et le nombre de phases du processus (monophasique ou multiphasique). Une explication détaillée des différentes technologies est donnée par la suite.

- **La teneur en matière sèche de la charge acceptée :** humide vs. sec

La fermentation peut se produire à *faible* ou à *forte charge* du digesteur. Le premier cas correspond au **procédé humide ou liquide**. Ici, le substrat entrant au digesteur est dilué pour obtenir une concentration de matière sèche entre 5 et 20 %. Le second correspond au **procédé sec**, où l’apport d’eau à la matière organique entrante est plus limité. Ceci afin d’obtenir une charge de concentration au-dessus de 20 %.

Les procédés fonctionnant à faible charge ont été historiquement les premiers créés pour traiter la fraction fermentescible des ordures ménagères (FFOM). Actuellement, pour le traitement de déchets municipaux, la plupart des digesteurs conçus sont des digesteurs fonctionnant à forte charge. Certains des procédés secs de méthanisation peuvent fonctionner avec un contenu jusqu’à 50 % de matière sèche.

- **L'approvisionnement** : en continu vs. batch

Le substrat peut être incorporé dans le digesteur en suivant des procédés différents. Dans le **procédé de digestion en continu**, le digesteur est rempli en continu. Une partie du résidu est recirculée afin de favoriser l'homogénéisation du substrat. Le substrat introduit de manière continue est digéré et évacué (digestat) mécaniquement ou par la pression des nouveaux intrants. Le procédé en continu est bien adapté aux installations de grande taille.

Un autre procédé, le **procédé en batch**, consiste en un remplissage du digesteur de manière discontinue. Ainsi, le digesteur est chargé et fermé jusqu'à que le processus de digestion soit complet. Les produits finaux sont récupérés et le digesteur est chargé à nouveau. Ce système est actuellement très peu utilisé. Il est surtout employé dans des petites installations.

- **Le mélange** : infiniment mélangé vs. piston

Un substrat bien mélangé contribue à assurer la production optimale de biogaz. Notamment, il permet l'homogénéisation des conditions du milieu, et par conséquent, un meilleur accès au substrat par les bactéries en évitant ainsi la formation non contrôlée des volumes morts.

Les systèmes d'agitation utilisés dans le digesteur comprennent différentes possibilités. Selon la disposition (verticale ou horizontale) du digesteur, certains systèmes utilisent des pales fixées soit sur un axe vertical, soit sur des axes transversaux. D'autres procédés incluent des hélices fixées sur un axe longitudinal dans le digesteur. Une autre possibilité de mélange est celle qui est réalisée moyennant un système d'injecteurs pour permettre la recirculation du biogaz. Ce dernier est injecté par le bas du digesteur (c.f. Figure 8.5). Ces systèmes dans lesquels le mélange est réalisé soit grâce à des pièces mécaniques internes soit grâce à la injection de biogaz, reçoivent le nom de « infiniment mélangés ».

Par contre, il existe d'autres systèmes qui n'utilisent pas de pièces mécaniques à l'intérieur du digesteur et où le mélange est effectué grâce à la recirculation externe du digestat de sortie moyennant une pompe extérieure permettant le mélange. Le système de mélange utilisé est ici le appelé « piston ». Dans le cas des digesteurs à alimentation continue, une partie du digestat est donc régulièrement extraite du digesteur pour être réinjectée dans celui-ci.

Il est à remarquer que l'absence de pièces mécaniques dans le digesteur évite les risques de blocage ou de casse. Dans le système de recirculation du biogaz, les injecteurs peuvent aussi se boucher, mais leur entretien ne présente pas trop d'inconvénients.

- **La température** : mésophile vs. thermophile

Le processus de biométhanisation peut être catalysé dans le digesteur à différentes températures. Les micro-organismes employés montrent des pics d'activité optimale à deux rangs de température : ils peuvent être **mésophiles** (25 - 45°C) ou **thermophiles** (55 - 65°C).

On rencontre plus rarement des systèmes **psychrophiles**, c'est-à-dire, fonctionnant à des températures inférieures à 20°C.

Il faut noter que du fait de l'énergie élevée nécessaire pour augmenter la température de l'eau, les procédés humides fonctionnent fréquemment dans des conditions mésophiles alors que les procédés secs le font dans des conditions thermophiles.

- **Le nombre de phases du processus** : monophasique vs. multiphasique

Dans une **approche monophasique** (ou single-stage), tout le processus de digestion est produit dans un seul digesteur. Par contre, le principe d'un **procédé multiphasique** (ou multi-stage ; le plus souvent bi-phasique) est celui de l'optimisation des conditions de chaque réaction nécessaire à la production de biogaz (cf. Figure 2.1). Ce type de procédé requiert donc des digesteurs différents. Ainsi, dans un procédé bi-

phasique, la phase d'hydrolyse et d'acidogénèse est réalisée dans un premier digesteur, et les phases de l'acétogénèse et la méthanogénèse dans un deuxième digesteur.

Les différentes technologies qui ont été décrites sont combinées pour créer un certain procédé. Il existe une dizaine de procédés actuellement commercialisés, certains sont plus connus que d'autres. Des exemples sont le procédé Dranco de la société OWS, le procédé Valorga de la société Urbaser-Valorga et le procédé BTA de la société MAT.

4. 3. Paramètres importants à considérer

- **Le rapport C/N**

Il est important de remarquer que la quantité du biogaz produit dépendra étroitement de la nature du substrat fermenté, notamment du **rapport carbone/azote** (C/N) ainsi que du **taux d'humidité**.

En ce qui concerne le rapport C/N⁶, il présente un optimum à 30 et ne doit pas être supérieur à 35 (Source: Bureau d'études IRCO Sprl). A titre d'exemple, les déchets de légumes ont un ratio C/N d'entre 12 et 27, les feuilles de 60, le bois d'entre 100 et 500, et le carton de 350 (Source : ADEME). De même, grâce à son contenu supérieur en carbone, les déchets riches en matières grasses ont un potentiel plus élevé de production de biogaz que les déchets riches en glucides (Source : Le biogaz⁷).

Du point de vue de la production de biogaz, le mélange de différents types de déchets méthanisables afin d'obtenir un rapport C/N adéquat est tout à fait possible et plus convenable que le traitement d'un seul type de déchets qui ne présente pas un rapport intéressant.

- **le taux d'humidité**

Même si l'eau qui entre dans le digesteur, en ressort sans aucun type de transformation biologique, elle a une influence sur la quantité du biogaz produit. Ceci simplement du fait qu'un taux élevé d'humidité implique que moins de matière solide est disponible pour la production de biogaz. Ainsi, comme règle générale, les déchets fortement humides n'ont pas un potentiel élevé de production de biogaz. (Source : RDC, Bureau d'études IRCO Sprl).

- **Le pH**

Les bactéries anaérobies, et tout particulièrement les méthanogènes, sont sensibles à la concentration d'acide. Ainsi, si le milieu dans le digesteur est trop acide, il peut inhiber la croissance des bactéries et bloquer la production de méthane. Le PH optimal se trouve entre 5,5 et 8,5. (Source : Eunomia).

- **Temps de Rétention Hydraulique (TRH)**

Il s'agit du temps moyen de séjour nécessaire du substrat dans le digesteur. Il est un paramètre utilisé afin de faire référence au temps requis pour une biométhanisation adéquate. Selon le procédé employé, le TRH varie entre 2 et 4 semaines.

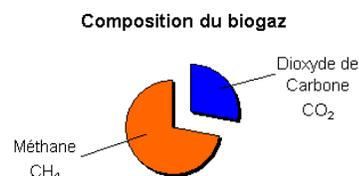
⁶ En dessous de 30, la production de gaz sera plus lente et en dessous de 20, les charges d'azote très élevées peuvent poser des problèmes lors du traitement des eaux en station d'épuration (STEP).

⁷ Le biogaz : <http://www.lebiogaz.info/site/032.html>, accédé le 7/5/2007

5. Quels sont les produits finaux et leurs possibilités de valorisation ?

5.1. Le biogaz

De manière générale, la composition moyenne du biogaz produit dans une installation de biométhanisation varie entre 50 et 80% (fréquemment entre 55 et 65 %) de CH₄, entre 15 et 45% de CO₂, environ 5% de H₂O et de jusqu'à 2% de H₂S. Se trouvent aussi présents des éléments en trace comme du dioxygène (O₂), de diazote (N₂), des métaux, du siloxanes et des organochlorés (Source Léonard, 2002).



5.1.1. En pratique, comment le biogaz est-il utilisé ?

Il est important de signaler que le biogaz brut qui ressort du digesteur ne peut pas être utilisé directement. Tout emploi du biogaz requiert d'abord son épuration. Ceci principalement du fait que le biogaz non épuré est moins calorifique (PCI biogaz non épuré = 18-25 MJ/Nm³ contre 35,5 MJ/m³). L'épuration peut aussi être requise afin de respecter des réglementations comme c'est le cas de l'hydrogène de sulfure (H₂S). Ainsi, deux types d'équipements d'épuration font d'office partie d'une installation de biométhanisation. Il s'agit du « système de déshydratation » et du « système de réduction de la teneur en H₂S ». En particulier, la réduction du H₂S est nécessaire lorsque la concentration de ce dernier dépasse les normes de rejet d'oxyde de soufre dans l'air⁸ ou les spécifications des constructeurs de moteurs.

En sortie du digesteur, le biogaz est normalement aussi soumis à une épuration tendant à éliminer le CO₂ et ceci, afin d'augmenter son PCI. Cette élimination est faite fréquemment par lavage à l'eau ou bien, par passage du biogaz sur une colonne de chlorure de calcium (CaCl) (Source : IRCO).

Par ailleurs, il est aussi important de remarquer que la valeur énergétique du biogaz comme énergie combustible est essentiellement fournie par le CH₄. C'est le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) qui exprime cette valeur. A titre de comparaison, le pouvoir calorifique de 1 Nm³ de biogaz comprenant 60% de méthane vaut environ 22 MJ⁹. Par exemple, ceci équivaut énergétiquement à :

- 0,56 litres de mazout
- 0,65 litres de fuel
- ~ 0,7 litres gasoil
- 0,21 m³ de propane
- 0,64 m³ de gaz naturel
- 0,7 kg de charbon

⁸ Normes de qualité de l'air de l'oxyde de soufre : Directive 1999/30/CE du Conseil, du 22 avril 1999, relative à la fixation de valeurs limites pour l'anhydride sulfureux, le dioxyde d'azote et les oxydes d'azote, les particules et le plomb dans l'air ambiant. JO L 163 du 29.6.1999, p. 41-60.

⁹ PCI biogaz = Q * 35,5 MJ/m³ = Q * 9,94 kWh/m³, où Q est le pourcentage de CH₄ contenu dans le biogaz. Pour les calculs on estime que la teneur moyenne en CH₄ est de l'ordre de 60%.

Dans la littérature, la tonne d'équivalent-pétrole (Tep) (= 42 GJ) est aussi utilisée pour exprimer la valeur calorifique du biogaz. Ainsi, 100 m³ de biogaz correspond à 0,065 Tep de pouvoir calorifique (Source : Actu Environnement).

En 2005, presque 5 millions de Tep de biogaz issu de différentes sources¹⁰ ont été produites dans l'UE, le Royaume-Uni en étant le leader européen (Source : Le Baromètre du biogaz, 2006). De nos jours, la valorisation la plus courante est tant la production d'électricité que de vapeur (une estimation de la production d'électricité et de chaleur sont données aux points 5.2.1 et 5.2.2.). Cependant, l'injection du biogaz directement dans le réseau de distribution public de gaz naturel, constitue une option émergente. Un autre débouché intéressant, mais aussi encore émergent, consiste en l'utilisation du biogaz comme carburant de véhicules au gaz naturel. Nous en verrons par la suite, les principales applications.

5.1.1.1. Production d'électricité

Le biogaz dûment épuré peut être acheminé directement vers une centrale électrique pour être brûlé dans un moteur thermique relié à un alternateur qui produit de l'électricité. Il s'agit donc de son injection dans des générateurs d'électricité, ce qui est possible dans la mesure où le pourcentage de CH₄ dans le biogaz est d'au moins 45% (Source : Verdesis).



Selon les auteurs, la production de 100 m³ de biogaz correspond à une fourchette d'entre 100 et 230 kWh électriques générés. Et afin de produire environ 100 m³ de biogaz, il est nécessaire de traiter entre 800 kg à 1 tonne de déchets fermentescibles ménagers (Sources : Actu Environnement ; RDC).

Le biogaz produit permet de rendre complètement autonomes les centres de biométhanisation des déchets tant pour l'électricité nécessaire au fonctionnement des machines que pour la chaleur nécessaire à la digestion anaérobie. L'électricité excédentaire produite peut alors être revendue. De manière générale, elle est tout d'abord convertie en haute tension et ensuite livrée au réseau. Approximativement, une unité de biométhanisation traitant 50.000 tonnes de déchets municipaux annuellement

est capable de produire de l'électricité correspondant environ à la consommation de 2.000 foyers, soit environ 4.800 personnes¹¹.

Au niveau européen, il est intéressant de signaler que la production d'électricité à partir du biogaz (issu des mêmes sources que celles indiquées dans le point 5.2. pour la production primaire, dont les déchets municipaux) a été estimée en 2005 à 14,7 TWh¹². Il est possible d'obtenir une estimation assez précise de ce type de production sur base du système de certificats verts (1 certificat vert est octroyé par MWh d'électricité produite). Les principaux producteurs d'électricité sont l'Allemagne et le Royaume-Uni avec 10,35 TWh, suivis de l'Italie (1,30 TWh) et l'Espagne (879,4 GWh) (Le Baromètre du biogaz, 2006).

5.1.1.2. Production de chaleur

Le biogaz peut aussi être brûlé dans une chaudière pour produire de la chaleur. Cette forme de valorisation du biogaz, prédomine surtout dans les STEP industrielles. Dans ce cas ci, l'utilisation est

¹⁰ Biogaz produit en STEP urbaine et industriel, en unités décentralisés de biogaz agricole, en unités de méthanisation de déchets solides municipaux, en unités centralisées de codigestion et en décharges.

¹¹ Ceci si on considère que la consommation en électricité d'une famille, composée en moyenne de 2,4 personnes, tourne au tour de 3.500 kWh/an.

¹² 1 térawatt-heure (TWh) = 1.000 GWh = 1.000.000 MWh = 1.000.000.000 kWh = 1.000.000.000.000 Wh

faite majoritairement en interne dans les processus industriels. La présence à proximité des bâtiments requérant du chauffage favorise aussi l'usage externe de la chaleur produite.

En ce qui concerne les unités de méthanisation de déchets fermentescibles municipaux, le biogaz est plus fréquemment acheminé vers une *unité de cogénération* pour la production conjointe d'électricité et de chaleur. Une partie de la chaleur est utilisée en interne, notamment pour réchauffer la matière entrant dans le digesteur et pour le chauffage des bâtiments.

La cogénération est aussi la forme de valorisation du biogaz la plus souvent utilisée dans les STEP urbaines et dans les petites unités agricoles.

Au niveau européen, la valorisation en termes de chaleur est plus difficile à suivre que celle de l'électricité et ceci non seulement du fait d'une comptabilité moins régulière mais aussi de l'autoconsommation importante dans les centres de traitement. Ainsi, même si une partie importante de la chaleur produite échappe aux statistiques nationales, les estimations les plus récentes pour l'UE indiquent que pour l'an 2005 la production de chaleur brute (issue du biogaz provenant des différents sources, dont les déchets municipaux) a été de 424 Tep, dont 135,8 Tep proviennent des unités fonctionnant en cogénération. Comme pour la production d'électricité, l'Allemagne et le Royaume-Uni en sont les principaux producteurs (Le Baromètre du biogaz, 2006).

5.1.1.3. Carburant de véhicules

Le biogaz peut également être utilisé comme carburant de véhicules. Ceci après épuration (concentration en méthane, déshydratation et puis élimination notamment du CO₂ et du H₂S) et compression à 250 bars. Le biogaz ainsi traité peut être livré aux stations-services sous des conditions particulières de stockage. La figure 5.1. présente l'unité de lavage et de compression de biogaz à Marquette, Lille.

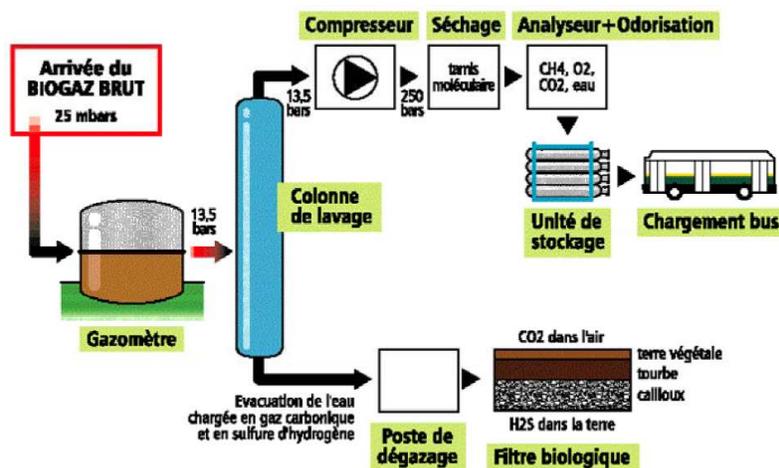


Figure 5.1. Unité de lavage et de compression – Marquette (Source : Polis)

Même si l'utilisation du biométhane comme carburant présente de nombreux avantages, comme signalé plus haut, ce type de valorisation est encore émergent. Concernant les avantages, il est intéressant de noter que le biogaz produit par les installations de méthanisation présente un bilan neutre en termes de CO₂ si on considère que sa combustion rejette du CO₂ préalablement stocké lors de la croissance de végétaux.

Globalement, la pollution générée par le gaz naturel est réduite par rapport à celle engendrée par l'essence et le diesel. En effet, la combustion du biométhane ne rejette pas de particules PM_{2,5} (une des

plus nocives pour la santé et pour l'environnement) ni d'hydrocarbures non méthaniques dans l'atmosphère. De plus, mis à part la réduction des émissions de CO₂, l'émission d'autres substances nocives est aussi réduite entre 60 et 90 %, notamment celle des oxydes d'azote (NOx) et celle des composés soufrés. Ce qui permet aux véhicules ainsi équipés de respecter la norme Euro 5¹³. Par ailleurs, ce qui n'est pas négligeable, la pollution sonore est aussi considérablement réduite.

A titre d'exemple, une unité qui traite 20.000 t/an de déchets peut produire une quantité de carburant qui permet à 2.000 voitures de parcourir 10.000 km/an¹⁴. Un kilogramme de déchets correspond donc à la consommation de carburant pour un parcours d'environ un kilomètre en voiture (Source : Vinci Environnement cité par Léonard, 2002).

En outre, au niveau européen, la croissance de l'utilisation du biogaz carburant permettrait de contribuer à la réalisation des objectifs visés par la Directive 2003/30/CE¹⁵ du Parlement européen et du Conseil du 8 mai 2003 visant à promouvoir l'utilisation de biocarburants ou d'autres carburants renouvelables dans les transports. Concrètement, ceci signifie que la part du marché des biocarburants doit atteindre 5,75% avant le 31 décembre 2010.



Dans ce contexte, il est intéressant aussi de faire référence au projet européen BIOGASMAX, un projet de recherche et de développement sur le biogaz carburant qui a été officiellement sélectionné en janvier 2006 par la Commission européenne dans le cadre du programme « Biofuel Cities » (lancé en 2004) pour s'achever fin 2009. Ce projet a

comme objectif de démontrer que les villes européennes peuvent produire du carburant de haute qualité à partir du traitement des déchets organiques. Le biogaz carburant ainsi produit doit servir à approvisionner notamment les transports publics (flotte de bus urbains) mais aussi des bateaux et les bennes à ordures ménagères. BIOGASMAX rassemble 25 partenaires des secteurs publics et privés en Europe, dont les municipalités de Rome et de Stockholm, des partenaires publics et privés de la région de Göteborg, l'université de Stuttgart et Gaz de France. Les partenaires s'articulent autour de Lille Métropole qui coordonne l'ensemble du projet.



Bus de Lille Métropole

Il faut mentionner que Lille compte, dans ce domaine, avec l'expérience de l'unité pilote de la station d'épuration de Marquette et avec celle du nouveau Centre de Valorisation Organique (CVO) de Sequedin¹⁶ d'une capacité de traitement par biométhanisation de 100.000 tonnes par an. Le premier bus au biogaz a été mis en circulation en 1994. L'unité de Marquette, qui a été arrêtée fin 2004, produisait annuellement plus de 4 millions de Nm³ de biogaz, ce qui équivaut à 4.480.000 litres de diesel.

En 2006, le Plan de Déplacements Urbains de Lille Métropole a prévu d'augmenter le parc de bus urbains au gaz de 100 véhicules supplémentaires, pour l'agrandir plus tard avec 100 autres unités. Lille travaille maintenant sur un projet de transports en commun 100% propres pour 2011.

¹³ Para rapport au diesel, l'utilisation de biogaz dans des bus, par exemple, entraîne une diminution de 95 % de l'émission des PM_{2,5}, de 99 % de composés soufrés et 70 % des NOx.

¹⁴ 1 kg de gaz naturel ou de biogaz correspond à environ 1,5 l d'essence (=équivalent essence). Source : <http://www.gaz-naturel.ch>

¹⁵ Directive 2003/30/CE : JO L 123 du 17.5.2003, p. 42-46

¹⁶ CVO de Sequedin : http://www.lillemetropole.fr/index.php?p=243&art_id=11194, accédé le 8/5/2007.

Sans doute, un exemple à souligner est celui de la Suède. Mis à part les à peu près 700 bus qui fonctionnent au biogaz circulent sur les routes suédoises, le premier train au biogaz¹⁷ du monde roule sur la côte est du pays. Depuis fin 2005, le train parcourt un tronçon de 80 km entre Linköping et Västervik. Il peut voyager jusqu'à 600 km avec un seul plein de biogaz issu de la STEP Lucernaverket à Västervik. Ce train est composé d'un seul wagon et peut transporter une soixantaine de passagers.



Emissions		
G/kWh	New bio-gas engines	Old diesel engines
CO carbon monoxide	0.01	0.60
NOx nitrogen oxides	2.00	6.15
NMHC hydrocarbons	0.10	0.35
Particles	0.01	0.16
Complying with	Euro 5	Euro I

Suède : Train « Amanda » à biogaz (Source : Svensk Biogas)

5.2. Le digestat

Le digestat est le résidu organique extrait du réacteur et résultant de la digestion méthanique du substrat. Sa composition est variable et dépend du type de substrat digéré, mais basiquement il s'agit de composés non dégradés, de bactéries excédentaires qui interviennent dans le processus de digestion et de matières minéralisées.

Comme dans le cas du biogaz, le digestat doit suivre un post-traitement avant de pouvoir être valorisé. Pour rappel, un processus de déshydratation, de maturation en aérobiose (en vue de compléter sa fermentation et hygiénisation) et de conditionnement, sont nécessaires pour le transformer en compost commercialisable.

Le traitement par méthanisation puis compostage de la fraction fermentescible des déchets ménagers municipaux, ainsi que d'autres substrats biodégradables, « stabilise » le biodéchets résiduel tout en éliminant les nuisances sanitaires potentielles (les germes pathogènes qui peuvent être présents) et les nuisances olfactives (à cause notamment de l'ammoniacque (NH₃) et du H₂S). Un digestat désodorisé et hygiénisé est de grande importance surtout lorsque le digestat est valorisé comme amendement agricole mais aussi lorsqu'il est employé dans des usages non alimentaires.

5.2.1. Utilisations potentielles du digestat

En ce qui concerne la valorisation du digestat, elle dépendra logiquement de la qualité du résidu obtenu mais aussi des conditions du marché. Nous traiterons par la suite les deux types principaux de valorisation.

5.2.1.1. Compost

Mis à part la production de biogaz, l'obtention d'un digestat de haute qualité est souvent l'objectif des centres de biométhanisation traitant des déchets ménagers biodégradables. Celui-ci peut être valorisé comme amendement agricole, pour améliorer la structure des sols ou servir d'engrais. En effet, la production de compost constitue le débouché le plus recherché du digestat. Le compost obtenu du digestat post-traité présente une valeur fertilisante intéressante : les éléments nutritifs persistent et l'azote s'y retrouvent en concentration relative (C/N) plus élevée. Le compost produit représente entre 30 et 60 % de la masse initiale de déchets.

¹⁷ Train « Amanda » : http://www.svenskbiogas.se/sb/docs/english/Biogastrain_produkblad_2005.pdf, accédé le 4/5/2007.

Une caractérisation analytique du compost est nécessaire afin de lui attribuer un *certificat d'utilisation*, indispensable à sa commercialisation. Des échantillons prélevés plus ou moins régulièrement permettent de déterminer la composition moyenne du compost produit (matière sèche et organique, contenu en chlorides et en nutriments), son PH et la présence d'hydrocarbures entre autres. Pour produire un compost de bonne qualité, il est indispensable que le digestat subisse une étape de maturation. Celle-ci lui permettra d'oxyder le NH₃ et aussi de compléter la biodégradation de certains composés organiques qui ne sont pas produits dans des conditions anaérobies.

Il existe différentes qualités de compost selon leur composition et degré de maturité. La qualité détermine le type d'utilisation (en agriculture, en horticulture, en maraîchage et paysagisme ou pour les cultures sous abri...).

A titre comparatif, un centre de traitement de déchets biodégradables des ménages avec une capacité de traitement par biométhanisation de 50.000 tonnes annuelles est capable de produire environ 20.000 tonnes de compost. La qualité de celui-ci dépendra de la « pureté » des déchets méthanisables (triés à la source ou pas) qui rentrent dans le digesteur.

5.2.1.2. Usages non alimentaires

Il existe aussi des options pour valoriser les digestats de moindre qualité. Celui-ci peut notamment être utilisé pour des plantations à usages non alimentaires. Son emploi dans des plantations de bordures d'autoroutes et dans des plantations forestières peuvent constituer une option parmi d'autres.

Si la qualité du compost est encore plus réduite, il est possible d'envisager un usage comme matériaux de remplissage ou dans la réhabilitation des sites pollués. Eventuellement, et face à une très basse qualité du produit final, il peut être stocké dans un Centre d'Enfouissement Technique (CET) comme déchet stabilisé (Source : IRCO).

5.3. Est-il possible de valoriser les refus ?

De même, selon leur composition et caractéristiques, certaines fractions de refus présents dans les biodéchets à traiter peuvent être aussi valorisés, par exemple, dans la construction routière. Des fractions valorisables en construction sont celles composées majoritairement par des contaminants inorganiques tels que des cailloux et des sables. Un autre exemple de valorisation possible est la fraction obtenue du pré-traitement (celle issue de l'hydropulpeur) de déchets mélangés dans un procédé humide (cf. point 8.2).

6. La collecte sélective de déchets organiques est-elle indispensable ?

Un digestat de bonne qualité est presque assuré lorsqu'une collecte sélective de déchets putrescible est efficacement installée et lorsque le tri à la source par les particuliers est correctement réalisé.

Cependant, le démarrage d'un tel type de collecte soulève de nombreuses questions notamment quant à la qualité du compost à commercialiser, quant aux coûts supplémentaires liés à la collecte sélective (main d'oeuvre, matériel,...), aux modifications des schémas de collecte, à la participation des citoyens aux collectes sélectives et aux conditions locales (notamment densité de population et type d'habitat). L'examen de ces questions n'entre pas dans le champ de ce guide. Celles-ci sont abordées en détails dans le guide de l'ACR+ sur la gestion des déchets ménagers biodégradables.¹⁸

Cependant, il est important de savoir que du point de vue d'une installation de biométhanisation, il faudra évaluer les éventuelles exigences de pré-traitement requises en fonction du type de collecte mise en place.

6.1. Différences dans les exigences de pré-traitement

Pour rappel, le pré-traitement de déchets méthanisables est appliqué afin de se défaire des autres résidus non méthanisables tels que les plastiques, le textile, les métaux, le verre et le bois, entre autres. Ceci afin d'introduire dans le digesteur un substrat préalablement homogénéisé le plus « pur » possible.

Dans le cas de déchets municipaux, le pré-traitement peut s'effectuer soit par tri de déchets organiques à la source, soit par une séparation mécanique une fois que les déchets sont arrivés au centre de traitement. Dans ce dernier cas, il faut sélectionner aussi un type de pré-traitement (plus ou moins poussé) convenable non seulement au type de déchets à traiter, mais aussi, à la proportion de substances contaminants qu'ils contiennent.

6.2. Répercussions sur la qualité du compost

La collecte sélective de déchets fermentescibles ménagers joue un rôle fondamental dans la qualité du compost produit et permet de réduire de manière significative les besoins d'opérations de pré-traitement. D'ailleurs, les déchets organiques qui ont été triés à la source sont traités avec succès par la voie sèche. Par contre, là où la qualité de la séparation à la source est moins bonne, la voie humide semble être un procédé plus performant du fait du pré-traitement plus poussé qu'elle implique.

Même si la collecte sélective des déchets organiques semble primordial lorsque l'objectif est aussi l'obtention d'un compost commercialisable, il semble aussi y avoir des exceptions. Un exemple de ceci est présenté au point 8.2. par l'installation à Ypres. Cette installation obtient un compost de qualité certifié issue du traitement de déchets mélangés. Il est à remarquer que du fait qu'il ne s'agit pas d'une situation idéale, son propriétaire et gestionnaire, IVVO, essaye de négocier avec les intercommunales afin d'obtenir la généralisation de la collecte sélective de la FFOM qu'elles lui envoient pour être méthanisés.

¹⁸ Voir « La gestion des déchets ménagers biodégradables: quelles perspectives pour les autorités locales européennes ? », ACR+ 2006

Ce rapport recommande donc la collecte sélective des déchets organiques à traiter. Ceci assurera la bonne qualité de digestat requise pour l'obtention d'un produit utile comme amendement des sols cultivés.

6.3. Une réflexion nécessaire sur l'objectif poursuivi

Une réflexion sur les possibilités réelles de valorisation des produits finaux au niveau local est certainement nécessaire en préalable non seulement à la mise en place d'une collecte sélective, mais aussi, au moment des choix techniques de conception de l'unité de méthanisation. La décision d'installation d'un système de collecte sélective visant à produire un compost de haute qualité doit être prise sur base de l'évaluation de plusieurs variables, telles que les conditions du marché local pour le compost.

Tant la collecte sélective que celle en mélange présentent des avantages et des inconvénients. La Figure 6.1 présente un résumé de ceux-ci selon le type de collecte choisi.

Collecte séparée des déchets ménagers biodégradables	Collecte de déchets ménagers en mélange
Avantages	Avantages
<ul style="list-style-type: none"> • Réduction des risques de contamination des matières biodégradables, ce qui permet d'obtenir un compost de qualité supérieure. • Moins d'argent et de temps consacrés à la manutention et au tri des matériaux au centre de compostage. • Permet de sensibiliser les résidents au tri, et peut encourager la réduction des déchets. • Stimule les performances des autres collectes sélectives. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'équipement de collecte supplémentaire. • Pas de main-d'œuvre supplémentaire pour la collecte.
Inconvénients	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite la participation effective des citoyens. • Peut requérir des équipements supplémentaires (achat d'une nouvelle gamme d'équipements et/ou de conteneurs). • Peut nécessiter davantage de main-d'œuvre. • Risque de contamination accru susceptible de générer un compost de qualité inférieure et des difficultés pour trouver des débouchés. 	<ul style="list-style-type: none"> • Les coûts de traitement devront intégrer ceux d'un tri mécanique. • Peut nécessiter un échantillonnage et une analyse plus fréquents des produits.

Tableau 6.1. Avantages et inconvénients de la collecte sélective et non-sélective
(Source : ACR+, 2005)

7. Le coût de la biométhanisation ?

7.1. Coûts d'investissement

Le coût d'investissement d'une installation dépend notamment de trois facteurs. Il s'agit du type d'installation à construire, du volume estimé de déchets à traiter (donc du volume du digesteur requis) et aussi du coût du terrain qui, parfois, n'est pas négligeable, surtout lorsqu'il s'agit d'une installation en ville. Ils comprennent les frais de planification et de conception, les frais pour les travaux de génie civil et de construction et les frais financiers.

En règles générales, les coûts de construction d'une installation fonctionnant par procédé humide sont moins élevés par rapport à ceux associés à un procédé sec. Même si un procédé humide utilise un système de pré-traitement plus coûteux, le besoin d'équipement de traitement et de transport de la biomasse est beaucoup moins coûteux que dans le cas d'un procédé sec.

Par ailleurs, il est aussi intéressant à souligner que le coût d'investissement pour une installation avec une capacité de traitement de 20.000 tonnes/an est quasiment identique à celui d'une installation de 40.000 tonnes/an (Source : RCD).

7.2. Coûts de fonctionnement

Au niveau du fonctionnement, les coûts dépendent fortement du type d'installation. Parmi les points à considérer se trouvent : la maintenance journalière de l'installation, la consommation d'eau et de produits chimiques, la consommation électrique et de chaleur, les frais éventuels d'élimination des déchets, les entretiens du module de cogénération, la maintenance et le remplacement des pièces usagées, la main d'œuvre nécessaire pour garantir un bon fonctionnement, la location du terrain, ...

7.3. Coûts de traitement

Ils sont la résultante tant des coûts de fonctionnement que d'investissement. Une estimation du coût net de traitement a été évalué pour une installation complète entre 70 à 150 euro/tonne de déchet à traiter suivant la taille et le type d'installation (Source : ADEME, 2003).

A titre d'exemple, pour les installations à Ypres (procédé humide ; déchets mélangés) et à Brecht (procédé sec ; FFOM) qui possèdent une capacité de traitement de 50.000 tonnes/an, ces coûts varient entre 70 et 80 euro/tonne. Dans le cas de l'installation à Varennes-Jarcy (procédé sec + bioréacteurs) qui compte avec une capacité de traitement de 100.000 tonnes/an, ils s'élèvent à environ 65 euro/tonne pour le traitement de déchets mélangés et à environ 35 euro/tonne pour le traitement des déchets organiques triés à la source.

A titre comparatif, pour la province de Namur en Région wallonne, une estimation du coût de traitement de déchets des différents filières indique une valeur d'environ 40 euro/tonne pour le compostage des déchets verts, d'environ 105 euro/tonne pour la mise en décharge et d'environ 115 euro/tonne pour l'incinération. Le coût pour la biométhanisation était estimé à environ 75 euro/tonne de déchets (Source : Etopia).

7.4. Revenus

Les revenus proviennent principalement de la valorisation du biogaz. Sa production dépend notamment du type de déchet traité et du type d'installation. Comme évoqué au point 5.2., les

possibilités de valorisation du biogaz sont multiples et chaque type de produit final a une valeur variable sur le marché. Il est à remarquer que pour la valorisation sous forme d'électricité et de cogénération, il est possible d'obtenir des certificats verts, ce que favorise économiquement ce type de valorisation.

Par rapport à la production de chaleur, sa valorisation économique à l'extérieur de l'installation pourrait être réalisée lorsqu'elle est vendue (pas fréquente) à une autre installation avec un besoin de chaleur plus ou moins constant. Il peut s'agir d'un hôpital, d'une usine ou de chauffage urbain.

La production de biogaz carburant semble aussi être un débouché économiquement intéressant.

En ce qui concerne le digestat, sa valorisation joue un rôle moins important que la valorisation du biogaz dans l'évaluation économique d'une installation. Lorsque la qualité du compost obtenu n'est pas intéressante ou lorsqu'il n'y a pas de demande sur le marché, le compost doit être mis en décharge (payant). Par contre, lorsque le compost est de bonne qualité et lorsqu'il y a demande, il peut être valorisé économiquement (la valeur de vente du compost en Région flamande varie, par exemple, entre 1 et 2,5 euro/tonne).

Le tableau 7.1 présente le prix de vente et d'achat de certains produits finaux estimés pour la Région Bruxelles-Capitale.

Produit	Prix de vente
1 kWh électrique	0,05 euro/kWh e
1 kWh thermique	0,0235 euro/kWh t
1 m ³ de biogaz sur PCI (55% CH ₄)	0,11 euro/m ³
1 m ³ de gaz naturel	0,19 euro/m ³
1 litre de diesel	0,53 euro/l
Produit	Prix d'achat
1 m ³ de biogaz par SIBELGA	0,28 euro/m ³
1 m ³ de biogaz épuré sur le réseau	0,73 euro/m ³

Tableau 7.1. Prix de vente et d'achat des produits finaux (Source : RDC – Belgique)

8. Cas d'étude

8.1. Le cas de l'installation de Brecht - Belgique

Introduction

Le syndicat IGEAN, fondé en 1969, est actuellement le propriétaire et exploitant des deux installations de biométhanisation à Brecht : Brecht I et Brecht II. L'IGEAN, situé à Lenaarts en Flandre, est une intercommunale qui regroupe l'ensemble des communes du nord de la province d'Anvers. Cette intercommunale raccorde 30 communes au total pour tout ce qui concerne l'environnement, le traitement de déchets et la sécurité au travail.

En 1991, l'IGEAN (bénéficiant d'une aide financière de l'UE) commanda à la société belge Organic Waste Systems (OWS) une unité-pilote de biométhanisation capable de traiter annuellement 20.000 tonnes des déchets ménagers biodégradables collectés sélectivement. C'est ainsi qu'en juillet 1992, l'installation « Brecht I » (aussi appelé « Dranco 1 » car Dranco est le procédé commercialisé par OWS) est mise en service. Les résultats encourageants obtenus pendant 6 ans ont permis, en 1999, la prise de décision de la construction d'une deuxième centrale de biométhanisation de plus grande capacité, « Brecht II », ainsi que d'une station d'épuration pour le traitement des eaux provenant du procédé et du drainage du dépôt d'ordures. Avec une capacité de 50.000 t/a, Brecht II (ou Dranco II), mise en service en 2000, ne traite que de déchets de cuisine, de jardin, de papier non-recyclables et des langes (GFT : Groente-, Fruit-, Tuinafval) tous triés et collectés séparément.

Il est à remarquer que le procédé Dranco (Dry Anaerobic Composting) est une biotechnologie développé à l'université de Gand et postérieurement perfectionné par la société OWS.

Les installations Brecht I et II fonctionnent à pleine capacité. Il arrive même qu'ils se voient obligés à envoyer une partie des FFOM¹⁹ collectées à une autre installation (Ypres) pour être traitées.

Dans ce rapport, la description réalisée correspond à l'installation Brecht II qui a été l'objet de la visite.



Brecht I (gauche haut) et Brecht II (droite bas) Source : IGEAN

¹⁹ FFOM : fraction fermentescible des ordures ménagères

Le procédé

De manière générale, le procédé comprend les étapes suivantes :

- **le pré-traitement** des biodéchets qui arrivent au hall de déchargement : il est réalisé tant pour se défaire des contaminants que pour homogénéiser le substrat qui rentre dans le digesteur,
- **la digestion** de ces déchets proprement dit qui comprend la production de biogaz brut et du digestat (procédé sec, thermophile et monophasique), et
- **le post-traitement**, appliqué tant au biogaz qu'au digestat afin de pouvoir les valoriser.

La figure 1 présente le *Diagramme de Flux* de Brecht II. Dans cette figure, le pré-traitement correspond à tout ce qui se passe à gauche de la représentation du digesteur et qui inclut le fond mouvant, le tambour à homogénéisation et le crible rotatif, la séparation magnétique et l'unité de dosage. La phase de digestion anaérobie des biodéchets a lieu dans le digesteur (en bleu). Le post-traitement, quant à lui, comprend tout ce qui se passe à droite du digesteur et qui aboutit à la production d'électricité et du compost (ce dernier commercialisé par l'IGEAN sous le nom de « Humotex »). Les différents étapes seront décrites en détail par la suite.

- Le pré-traitement

A l'arrivée des déchets organiques au *hall de déchargement*, les déchets sont emmenés via un *fond mouvant* (une partie du sol du hall) vers un *tambour à homogénéisation* pendant 1 heure, ceci afin de les réduire et de les homogénéiser avant la rentrée au digesteur. Les déchets sont, ensuite, tamisés par un *crible rotatif* à 40 mm. L'homogénéisation et le tamisage servent à séparer les composants non-dégradables et à obtenir un substrat de dimensions adéquates au traitement ultérieur.

Cette étape homogénéisation-tamisage est réalisée en série, autrement dit, tout ce qui a une taille supérieure à 40 mm est à nouveau soumis au même traitement mais cette fois durant 3 heures. Ce qui continue à avoir une dimension supérieure au tamis constituée *le refus* et sort du circuit de traitement pour aller en décharge. La possibilité d'incinération des refus avec obtention d'énergie est encore en phase d'évaluation. La mise en décharge est pour l'instant la solution retenue du fait que l'IGEAN est aussi propriétaire de la décharge qui se trouve juste à côté de l'installation.

La partie tamisée traverse un *séparateur magnétique* afin de se défaire des parties métalliques qui pourraient contaminer le digestat qui sera produit et, par conséquent, qui pourraient contaminer aussi le compost.

Ensuite, le substrat organique qui est maintenant libre de composants métalliques aboutit dans *l'unité de dosage*. Dans cette unité, il est mélangé à une partie du digestat provenant du réacteur (1 part de digestat par 8-9 parts de déchets frais) et ensuite réchauffée à 55 °C par injection de vapeur. Le mélange se produit ainsi par recirculation du digestat et postérieurement, à l'intérieur du réacteur, par gravité du fait que le substrat y rentre par-dessus.

Il est intéressant de remarquer que les moteurs à gaz qui produisent de l'électricité (générateurs) émettent aussi des fumées chaudes qui sont utilisées, à l'aide d'un échangeur de chaleur, pour générer de la vapeur afin de réchauffer le mélange entrant.

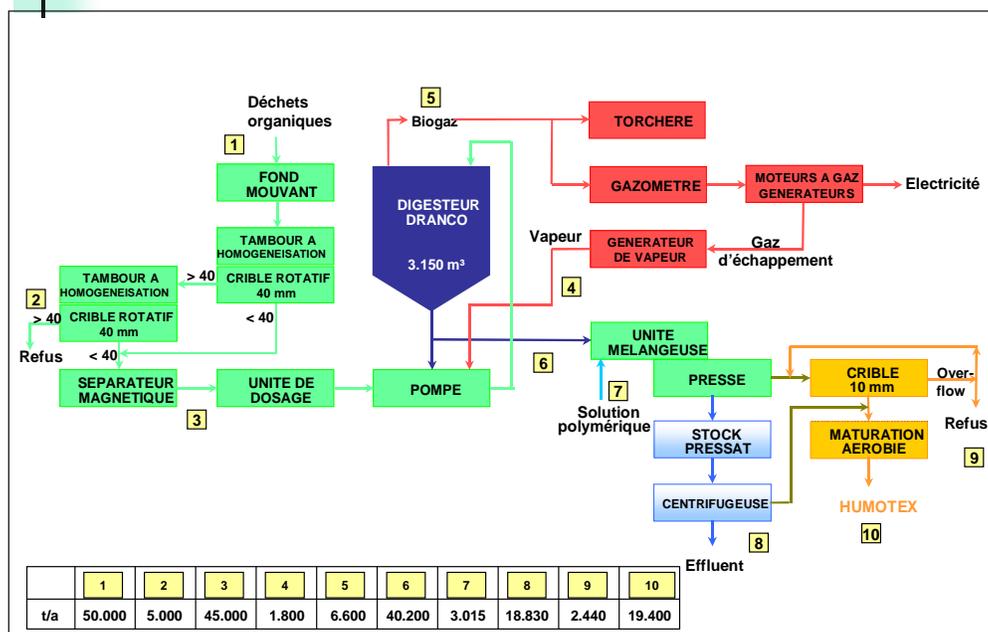


Figure 8.1 : Diagramme de flux – Brecht II (Source : IGEAN)

- Le traitement



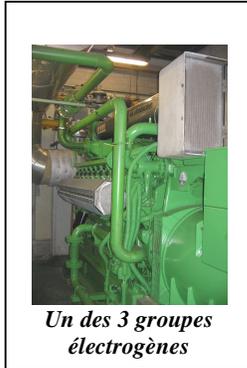
Source : IGEAN

Une pompe à succion à l'extérieur du digesteur, pompe le mélange de l'unité de dosage dans le réacteur. Le procédé utilisé est un procédé sec où la digestion est produite avec une teneur en matière sèche jusqu'à 40 %. La consistance du substrat est donc pâteuse. Le digesteur de type vertical avec sortie cônica travaille à une température d'entre 50 et 55 °C (thermophile) qui est maintenue grâce à la chaleur générée à partir d'une proportion du biogaz produit. Cette haute température élimine les microorganismes pathogènes qui pourraient éventuellement être présents dans les déchets.

En ce qui concerne le Temps moyen de Rétention Hydraulique (TRH) du mélange dans le digesteur, il est compris entre 15 et 20 jours (13 jours minimum), ce qui est parfaitement dans l'intervalle prescrit par le fournisseur (entre 15 et 25 jours).

- Le post-traitement et la valorisation de produits finaux

Le biogaz produit dans le réacteur (60-65 % de CH₄) est accumulé dans un gazomètre. Une torchère est prévue en cas des problèmes éventuels, notamment dans le fonctionnement des générateurs. Celle-ci éviterait le risque d'explosion en brûlant le biogaz produit dans le processus.



Un des 3 groupes électrogènes

Source : IGEAN

Le biogaz est transformé en électricité moyennant des moteurs à biogaz : 3 groupes électrogènes de 657 KW.

Environ 30 % de l'électricité produite est utilisée pour le fonctionnement de l'installation. Les 70 % restants sont vendus : l'électricité est d'abord convertie en haute tension et ainsi livrée au réseau.

Depuis sa mise en service, Brecht II a eu une production annuelle d'électricité moyenne brute de 8.560 MWh. Ceci correspond à une production de biogaz moyenne d'environ 110 m³/tonne équivalent de déchet. En 2006, cette production s'élevait à 9.472 MWh, ce qui représente une livraison au réseau de 6.612 MWh. La production nette d'électricité à Brecht (celle livrée au réseau) équivaut à la consommation d'environ 1.880 familles, soit 4.500 personnes (~70 % des habitants de Lenaarts).

En ce qui concerne le digestat, après la sortie du réacteur et dans l'*unité mélangeuse*, il est floconné à l'aide d'une solution polymérique (floculant). Ceci est réalisé avant d'être pressé et afin de faire précipiter les substances en suspension pour faciliter l'épuration de l'eau drainante. Le digestat est ensuite pressé dans des *presses à vis coniques*.

L'effluent est stocké et aussi floconné pour après être centrifugé. L'effluent résultant de la centrifugation est ensuite joint à l'eau de drainage provenant du dépôt des ordures puis, digéré à l'*unité de traitement des eaux* (station d'épuration) du site.

Ici, le traitement des eaux qui arrivent est réalisé en 3 phases :

- un traitement biologique (nitrification, dénitrification et sédimentation),
- un traitement physico-chimique, et
- un traitement par filtre à sable et par filtre à charbon actif.



Unité de traitement des eaux

Source : IGEAN

Après avoir été pressé, le digestat déshydraté (matière sèche du gâteau de presse : 45 à 50 %) est tamisé à 10 mm. Ce qui est supérieur à cette taille constitue le *refus*. Le digestat déshydraté et tamisé est déposé dans le *hall de maturation* par un système de distribution automatique. Il subit un compostage « statique ». Même s'il n'est pas retourné, il est ventilé, l'oxygénation étant assurée par un plancher perforé dans lequel circule de l'air introduit sous pression.

Un post-compostage aérobique qui dure entre 2 et 3 semaines conduit au produit final : un compost de haute qualité car produit exclusivement à partir de déchets organiques collectés sélectivement. Ce compost qui a un degré de maturation entre IV et V selon la classification par VLACO et commercialisé sous le nom de « Humotex ».

Il est important à mentionner que dans tous les locaux fermés de l'installation l'air est aspiré (système en sous-pression), lavé et dirigé vers un biofiltre. Le contrôle des odeurs semble être assez efficace.

Maintenance

- Aucune mention particulière de la part du responsable de l'installation.
- Il est à noter que comme le mélange dans le digesteur est réalisé par recirculation du digestat, ceci à travers d'un gros tuyau, il n'y a pas de risque de blocage comme c'est le cas quand le mélange est réalisé par recirculation du biogaz.

Résumé technique

Ville	Procédé/ Fournisseur	Type de déchet	Capacité traitement	Produit finaux	Coûts de traitement
Brecht – Belgique :	Procédé Dranco / Société OWS:	Déchets organiques triés sélectivement en proportion variable selon: déchets de cuisine (10-40%), de jardin (40- 75%), papier non- recyclable (14- 20%) et langes	- 50.000 (t/an) 1 Digesteur vertical, hauteur : 25 m volume : 3.160 m3	- Biogaz : 110 m ³ /tonne équivalent de déchets ; → Electricité : En 2006 : - 9.472 MWh/an bruts ; - 70 % livré au réseau = 6.612 MWh/an. (~ consommation 1.884 foyers ²⁰); - Digestat : Compost commercialisé sous le nom « Humotex »	- Biodéchets : ~80 euro/tonne
Brecht II, inclut station épuration (MS : 2000)	CO : - procédé sec -TRH : 13-20j - monophasique - thermophile (50-55 °C)				

MS : mise en service

CO : conditions opératives

Qualité du compost

Production	Contrôle	Composition moyenne
20.000 ton/an	- Certification VLACO, - Contrôlé par le ministère d'agriculture, et - Contrôle dans les laboratoires de l'usine	- Matière sèche 578 kg/ton - Matière organique 213 kg/ton - Chlorides 1,82 kg/ton - Nutrients Extractable P 0,75 kg/ton K 3,92 kg/ton Ca 7,20 kg/ton Mg 0,73 kg/ton - Rottegrad IV – V

Source : IGEAN

²⁰ Une famille consomme environ 3.500 KWh/an (2,42 intégrants)

8.2. Le cas de l'installation d'Ypres

Introduction

Le consortium IVVO (Intercommunale Vereniging voor Vuilverwerving van Veurne en Ommeland) est le propriétaire et exploitant de l'installation à Ypres.

La construction a commencé en 2001. L'installation a été mise en service en 2003 après plusieurs problèmes de démarrage. Avec une capacité de traitement de 50.000 t/an, actuellement elle ne traite qu'environ 25.000 t/an de déchets. Du fait que l'installation ne fonctionne pas à pleine capacité, elle traite tant des déchets triés que mélangés en provenance du secteur résidentiel (FFOM collectée sélectivement + déchets mélangés), commercial et industriel (comme certains boues, aussi présentes au moment de la visite). Ypres reçoit les déchets de 12 communes de la Flandre occidentale et seulement 4 d'entre elles collectent leurs déchets organiques séparément. Ceci n'est pas la situation idéale pour le traitement de déchets ni pour la production de compost, donc IVVO essaye de négocier avec les autres intercommunales afin d'obtenir la généralisation de la collecte sélective de FFOM.

Le procédé

Le procédé de base utilisé par l'installation à Ypres correspond au procédé BTA (Biotechnische Abfallverwertung).

Le procédé général consiste en 3 étapes principales :

- **le pré-traitement** des biodéchets qui arrivent au hall de déchargement : il comprend le traitement par trommel, par pulpeur, et par hydrocyclone. Il est réalisé afin de se débarrasser des contaminants et pour homogénéiser le substrat qui rentre dans les digesteurs,
- **la digestion** des déchets proprement dite avec la subséquente production de biogaz brut et du digestat (procédé humide, mésophile et en 2-phase), et
- **le post-traitement.**

Les numéros indiqués dans la description du procédé font référence au schéma général de l'installation (Figure 8.2).

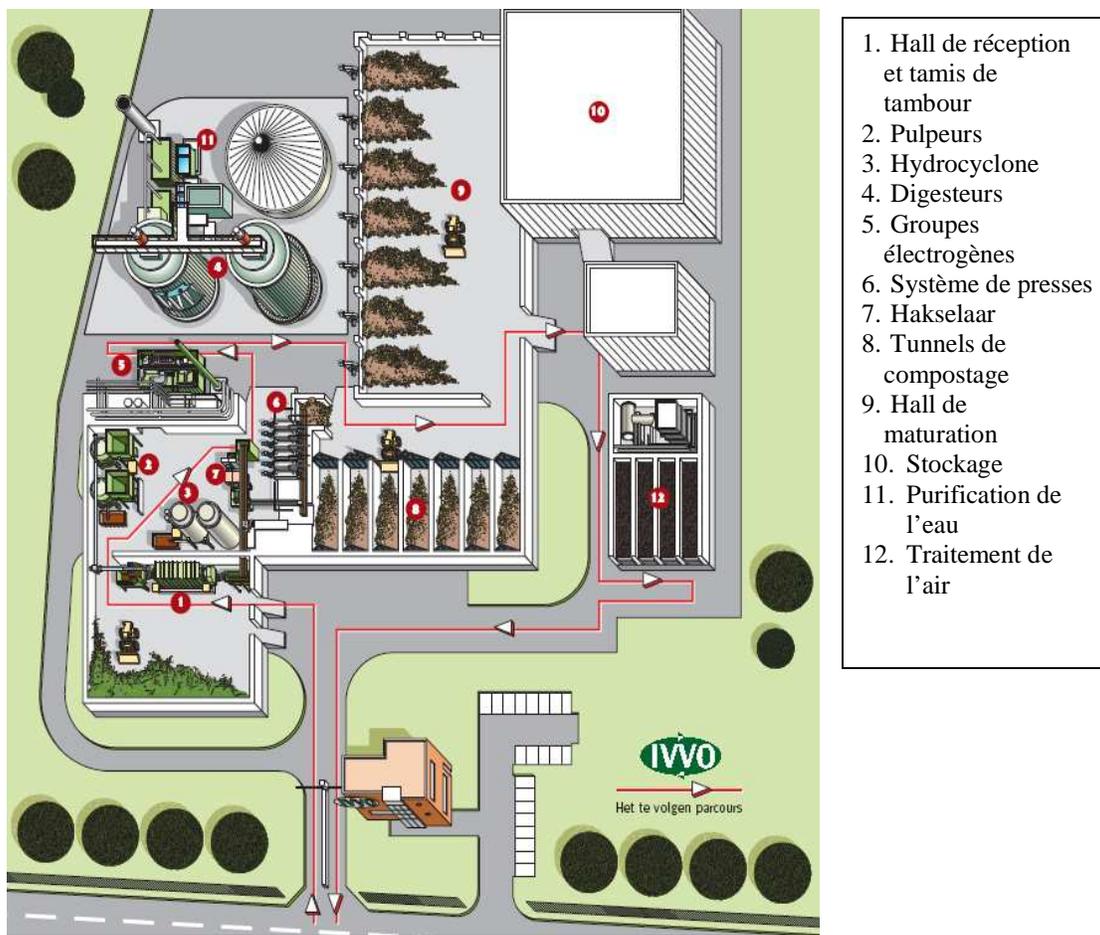


Figure 8.2 : Schéma général de l'installation (Source IVVO)

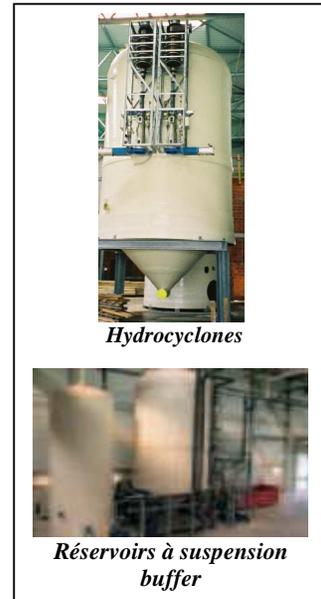
Le diagramme de flux est indiqué par la Fig. 8.3. Les cadres en gras montrent les étapes auxquelles est soumise la matière organique qui rentre dans le circuit.

pulpeurs et qui est composée par des piles, du verre, des métaux, des os, des pierres parfois de taille importante. Du fait de leur taille, les pierres qui rentrent peuvent endommager le pulpeur. Idéalement, il vaut mieux les détecter et les extraire dans le hall de déchargement.

La matière qui reste en suspension dans les pulpeurs sera enlevée moyennant le système de grilles d'élimination ou « *grid removal system* ». Ce dernier est, dans l'installation d'Ypres, composé de 2 réservoirs à suspension buffer et 2 hydrocyclones. *Les hydrocyclones* (3) qui, moyennant un mouvement tournant en spirale, éliminent les particules résiduelles les plus fines. Il s'agit de :

- « *la fraction lourde 2* » ou « *fraction de sables* » qui est principalement composée de sables, mais aussi de matière organique comme par exemple des noyaux des cerises, de maïs, etc. qui ne sont pas distingués par l'hydrocyclone.

La fraction lourde 2 est actuellement commercialisée comme matériel de construction (même si elle est composée par une proportion d'organiques). IVVO possède l'autorisation de commercialisation de cette fraction. Les 2 autres fractions sont mises en décharge.



• Le traitement

Après l'élimination des ces 3 fractions, la suspension résultante est pompée vers *les digesteurs* (4) où la digestion anaérobie a lieu. Même si l'installation travaille en 2 phases (2-stage), le procédé utilisé permet la flexibilité de travailler tant en série (2-stage) qu'en parallèle (single-stage). La température dans les digesteurs est maintenue à 37°C (mésophile) grâce à un système d'échangeurs de chaleur.



Le Temps de Rétention Hydraulique (TRH) de la suspension de matière dans les digesteurs peut se révéler plus long (jusqu'à 22 j) que le temps prescrit par le fournisseur (12-15j). Ceci selon la quantité de déchets à traiter. Fréquemment il s'agit de 14 j minimum. Dans les digesteurs, les déchets sont mélangés par la recirculation d'une partie du biogaz produit (mélangeur à propulsion de gaz). Des lancettes qui recirculent le biogaz rentrent dans les digesteurs par-dessus. S'il s'avère nécessaire (par des problèmes avec les générateurs par exemple), *une torçère* brûle le biogaz produit. Ce système éviterait ainsi le risque d'explosion.

Le biogaz produit (contenant fréquemment entre 60 et 68 % de CH₄) est dirigé vers *une station de cogénération*, la chaleur étant utilisée en interne. L'électricité produite par les groupes électrogènes (5) de 300 KW est utilisée pour les besoins de l'usine elle-même et le surplus est vendu.

Par ailleurs, le digestat est dirigé vers *l'unité de déshydratation* qui est constituée par un système de 6 presses (6). Jusqu'à 90 % de l'eau filtrée est réutilisée dans le processus d'hydratation du substrat dans les pulpeurs. Le reste est rejeté aux égouts pour être traité en STEP (11). Il en résulte un digestat déshydraté contenant entre 22 et 35 % de MS.



Avant d'envoyer le digestat déshydraté résultant vers la zone de compostage, il est mélangé avec la matière structurante (préalablement criblée et de-métallisée) qui avait été séparée par le tamis à tambours en amont du processus (cf. page 2) (7). Le mélange obtenu riche en fibres (appelé compost brut) est prêt maintenant pour être composté et est emmené à la zone de compostage.



- **Le post-traitement et la valorisation de produits finaux**



Dans les 7 tunnels opérant en mode batch (8), le compost brut demeure entre 2 et 3 semaines. Un monitoring continu enregistre les paramètres les plus pertinents (température, O₂, PH) de ce processus aérobique. Par ailleurs, un système de canaux (2 par tunnel) placé au sol collecte à la fois le liquide résiduel (qui continue à drainer du compost en maturation) et introduit de l'air propre nécessaire à une maturation adéquate. Ceci permettrait, en théorie, de se passer de retournement du compost en maturation. Néanmoins, dans la pratique, la méthode des tunnels sans retournement du substrat, produite à l'installation d'Ypres, un compost plus humide que désiré.

Ensuite, le compost est envoyé au *hall de maturation* (9). Arrangé en files, il finira sa maturation dans les 6 semaines environ qui suivent. Après un dernier tamisage, le produit final disponible pour la vente est stocké dans un local de stockage (10).

Actuellement, l'humidité du compost commercialisé est plus élevée que la proportion idéale (50 %). Une nouvelle machine qui mélange chaque file de compost déposé dans le hall de maturation sera prochainement mise en service afin de réguler l'humidité du produit final.



Il est important de signaler que la nuisance olfactive produite par les déchets organiques traités est réduite en aspirant l'air dans tous halls fermés de l'usine. Cet air est lavé et reconduit vers un *système de biofiltre* couvert (12). Néanmoins, il faut tenir compte que même si les odeurs sont contrôlées, cette nuisance n'est pas éliminée complètement. Ceci, constitue un point très important au moment d'évaluer la localisation éventuelle d'une installation.

Valorisation de produit final

Chez l'usine d'IVVO fait de la cogénération. Le biogaz (contenu moyen de CH₄ = 65% ; le jour de la visite il s'élevait à plus de 74 %) est transformé en électricité moyennant 4 groupes électrogènes qui produisent entre 160 et 180 KWh par tonne de déchet traité. L'électricité est injectée dans le réseau à haute tension et produit des certificats verts : 1CV/ 1MWh d'électricité produite.

En ce qui concerne le compost. Il est vendu fréquemment aux particuliers et à un prix très bas. Le compost respecte les normes imposées par le VLACO qui attribue les certificats d'utilisation du compost en Région flamande. Selon ces normes, le compost est de haute qualité.

Quelques problèmes rencontrés

- Problèmes de démarrage à cause du fournisseur (cf. page 32, Introduction)
- Traitement de déchets mélangés → l'installation n'était pas au moment de la visite utilisée comme prévu (pour le traitement exclusif de FFOM). Ceci est l'effet combiné, d'une part, du manque de déchets (l'usine travaille à moitié de capacité) et, d'autre part, de la collecte non-triée de déchets issues de 8 communes de la Flandre occidentale
- Compost avec un contenu élevé d'humidité (> 50 %). Une retourneuse était en train d'être testée afin de permettre un assèchement plus rapide.

Maintenance

- L'hydrocyclone et les pulpeurs sont régulièrement entretenus et par conséquent ils ne présentent pas de problèmes de fonctionnement
- Le système de mélange à propulsion de gaz du réacteur (lancettes) se bouche de temps en temps. Le débouchage ne semble pas être une partie agréable de la maintenance des réacteurs.

Résumé technique

Ville	Procédé/ Fournisseur	Type de déchet	Capacité traitement	Produit finaux	Coûts de traitement
Ypres - Belgique (MS : 2003)	Procédé BTA / Société MAT: CO : - procédé humide -TRH : 14 - 22 j - 2- phases - mésophile (37°C) - Mat. sèche: 8-10%	Déchets mélangés (mais originale- ment pensé pour Biodéchets)	- 50.000 (t/an) mais travail à moitié de capacité 2 Digesteurs verticaux, hauteur : 15 m volume : 2.500 m3	Travaillant à pleine capacité : - Biogaz : 91 m ³ /tonne de déchets ; contenu CH4 : 65 % ; → Electricité : 7.000 MWh/an (+ 50 % vendu ~ consommation 2.000 foyers) - Digestat : Compost commercialisé	73 euro/tonne

MS : mise en service

CO : conditions opératives

Qualité du compost

Production	Contrôle
Travaillant à pleine capacité : 18.740 tonnes/an	- Certification VLACO, - Contrôle dans les laboratoires de l'usine

8.3. Le cas de l'installation de Varennes-Jarcy

Introduction

L'installation à Varennes-Jarcy, propriété du SIVOM (Syndicat Intercommunal à Vocation Multiple de la Vallée de l'Yerres et des Senarts), est actuellement exploitée par la société Urbasys appartenant au même groupe que le fournisseur du procédé : Valorga International, avec une concession attribuée pour 13 ans. Urbasys est une filiale du groupe Urbaser, une entreprise espagnole.

Varennes-Jarcy (Essonne), en Ile de France, a une longue histoire dans le traitement de déchets ménagers qui a commencé dans les années 1970. La première unité de traitement de déchets, « le Centre TRIGA », utilisait déjà, la méthode de compostage accéléré. Ceci était réalisé dans 2 grandes tours qui traitaient environ 80 tonnes de déchets par jour. Cette première installation comptait aussi un four d'incinération.

Dans les années 1980, des améliorations sont introduites tout en maintenant le principe du compostage, mais en prévoyant la fabrication d'un combustible solide composé principalement de plastiques et de papiers-cartons présents dans les ordures ménagères (procédé SOBEA). Cependant, en plus d'un rendement insuffisant du procédé, l'utilisation du combustible s'est avérée rapidement difficile, compte tenu de sa teneur en chlore.

C'est ainsi que des profondes modifications ont eu lieu à partir des années 1990, notamment la suppression de la chaîne de fabrication de combustible, le remplacement des tours de compostage par 2 cylindres horizontaux (*les bioréacteurs*, toujours en fonctionnement) et l'instauration du tri préalable permettant de séparer le plastique, le verre et le métal. Ainsi, le « Centre de compostage par bioréacteurs SOGEA » traitait 70.000 tonnes annuelles de déchets tout en permettant de faire du recyclage grâce au tri instauré à l'usine et d'obtenir une meilleure qualité du compost.

Depuis lors, en réagissant à l'accroissement du volume des déchets par habitant et de nouvelles exigences en termes de qualité du compost, des nouvelles modifications ont été implémentées. Ainsi, fin 2002, le nouveau « Centre de compostage et de méthanisation STEINMULLER VALORGA » a été mis en service. Il a une capacité de traitement de 100.000 tonnes annuelles. Actuellement, l'usine de Varennes-Jarcy, traite environ 15 000 t/an de biodéchets (sacs marrons), 50 000 t/an de déchets résiduels (sacs verts) et 5 000 t/an de déchets verts. Elle reçoit les déchets provenant des 15 communes.

L'image suivante (Figure 1) montre l'aspect actuel du centre de traitement avec ses 3 digesteurs (l'un étant destiné au traitement exclusif de biodéchets et les autres au traitement des déchets résiduels) et ses 2 bio-composteurs.



Centre de compostage et méthanisation à Varennes-Jarcy (Source : SIVOM)

Le procédé

Il comprend :

- **le pré-traitement** : Le pré-traitement diffère selon qu'il s'agit de biodéchets ou de déchets résiduels.
- **la digestion** : procédé sec, mésophile et monophasique, et
- **le post-traitement**.

Un schéma général du procédé est montré par la Figure 2.

• Le pré-traitement

Tous les déchets arrivent au *hall de déchargement* grâce aux camions de collecte. Ils suivront, par la suite, un pré-traitement différent selon s'il s'agit de biodéchets ou de déchets résiduels. Dans cette étape, les biodéchets ne sont pas mélangés avec les déchets résiduels. L'usine reçoit aussi des déchets verts issus des travaux de maintenance des parcs et des voies publiques.

Pour les biodéchets

Ils sont emmenés au moyen d'un grappin à l'*unité de déchiquetage* où ils sont principalement réduits en taille (Figure 2, haut). Les biodéchets sont ensuite introduits dans une *pompe d'injection* qui rend la matière plus malléable avant l'entrée dans les digesteurs.

En ce qui concerne le bois qui arrive au hall, il est d'abord broyé pour après être mélangé au compost en maturation en fin de processus. Cet apport en fibres facilite l'absorption de l'humidité excédentaire du compost et ainsi favorise sa maturation.

Pour les déchets résiduels

Avant d'être dirigés vers les digesteurs, les déchets résiduels subissent d'abord une phase d'épuration (Figure 2, bas). Ainsi, les déchets sont introduits dans les *bio-composteurs* : 2 grands cylindres horizontaux et tournants de 42 et 48 mètres de long dans lesquels commence la décomposition de tout ce qui est organique.

Dans ces cylindres, les déchets sont retenus pendant 2 jours à une température qui monte naturellement jusqu'à 45°C. Ceci produit une première « hygiénisation » en éliminant certains des pathogènes éventuellement présents dans les déchets.



Source : EDF



Source : SIVOM

Le matériel qui en ressort, un pré-compost, est soumis à un *trommel*. Il est, en effet, tamisé 2 fois. La première fois à 30 mm et la deuxième fois à 10 mm :

- Ce qui n'est pas tamisé traverse d'abord un *électroaimant* qui récupère ce qui est métallique. Puis, un *tapis densimétrique* collecte les morceaux de verre. Ces deux fractions sont séparées afin d'être recyclées. Ce qui n'est pas séparé (des résidus divers, surtout des plastiques) est évacué en décharge (CET classe 2).
- Ce qui est tamisé constitue le substrat des digesteurs.

Ce type de traitement aérobie (bio-composteurs + tamis) permet l'extraction des métaux et des plastiques entiers avant du processus de fermentation à l'intérieur des digesteurs réduit de manière importante la contamination du compost par des métaux lourds et du biogaz par l'hydrogène sulfure (H₂S).

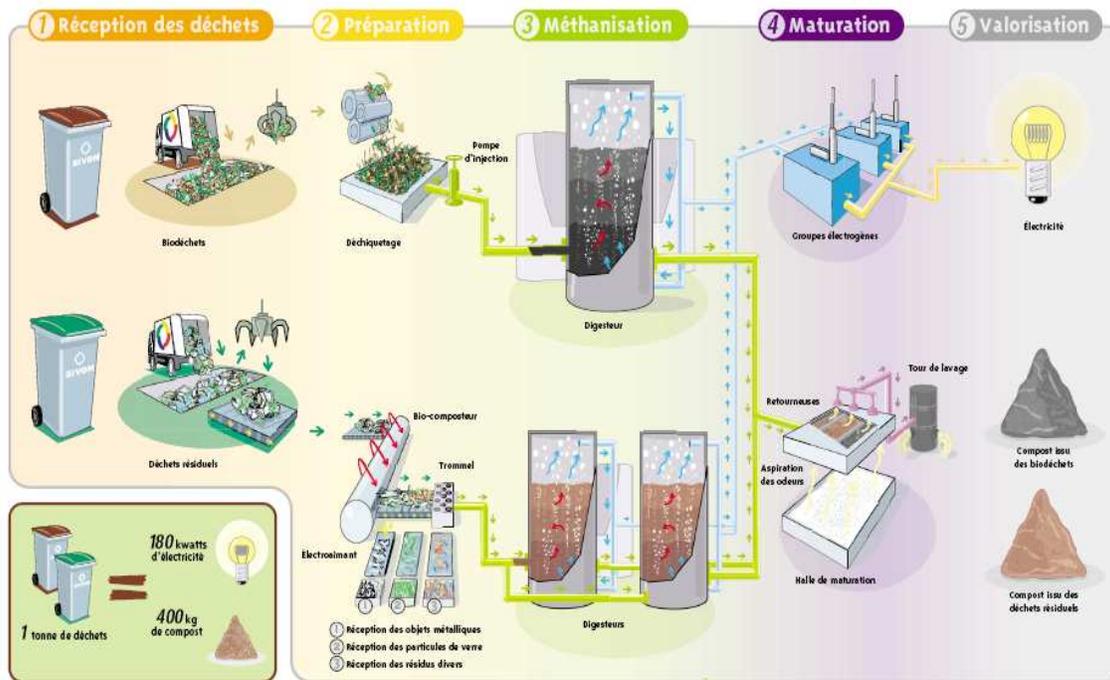


Figure 8.4 : Schéma du procédé original (Source : SIVOM)

- **Le traitement**



Source : SIVOM

Une particularité intéressante à signaler concernant le digesteur Valorga est la présence d'une paroi médiane verticale en béton placée sur environ 2/3 de son diamètre (Figure 8.5).

Dans ce système, tant l'orifice d'alimentation du substrat à digérer, que celui d'extraction du digestat, sont situés à la base du réacteur. Ils se placent d'une part et de l'autre de cette paroi interne.

Par conséquent, le substrat est obligé d'effectuer un mouvement circulaire pour contourner la paroi. Ceci implique que les déchets introduits ne peuvent être extraits qu'après avoir parcouru toute la surface du digesteur. Il s'agit d'un cheminement des matières de type piston horizontal. De cette manière, la fermentation de tout le substrat intrant est assurée.

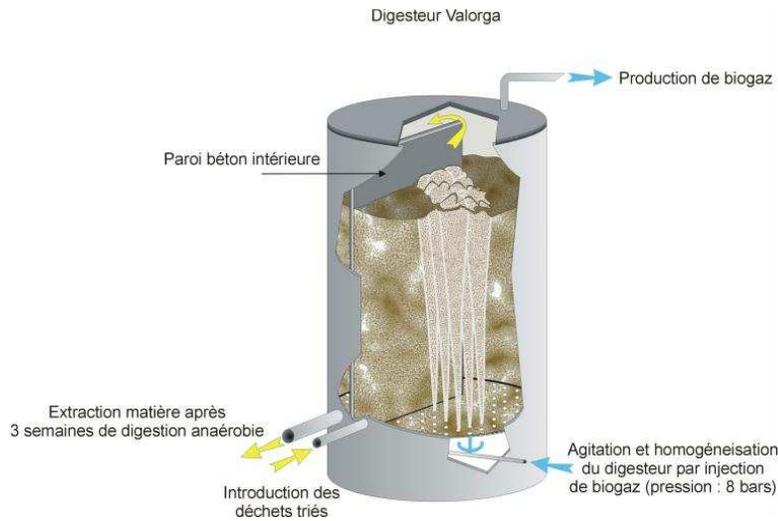


Figure 8.5 (Source : Valorga)

En ce qui concerne les conditions opératives requises par le procédé utilisé, elles comprennent :

- une température d'environ 37 °C (procédé mésophile)
- une proportion d'environ 30 % de matière sèche à l'intérieur du digesteur (procédé sec), et
- un Temps de Rétention hydraulique (TRH) du substrat d'environ 3 semaines à 25 jours en moyenne.

Le contenu de CH₄ dans le biogaz obtenu s'élève à 55 % en moyenne.

Le système de mélange utilisé est pneumatique : une partie du biogaz produit est réinjecté à la base du réacteur sous pression, ceci au travers de plusieurs centaines d'injecteurs (Figure 8.5). La réinjection de biogaz agirait aussi en accélérant la décomposition de déchets.

- **Le post-traitement et la valorisation des produits finaux**

Le biogaz et le digestat produits à partir de biodéchets et de déchets résiduels reçoivent le même type de post-traitement.

Le biogaz

Le biogaz est déshydraté et postérieurement transformé en électricité au moyen de 3 groupes électrogènes. L'utilisation de l'électricité en interne tourne au tour de 25 %. Les 75 % restants sont revendus à Electricité de France (EDF).

En interne, le biogaz est aussi utilisé pour l'alimentation d'une chaudière qui permet le réchauffement des déchets en entrée de méthanisation. De même, on réchauffe de l'air qui sera injecté au compost en maturation.



Source : SIVOM

Le digestat

Le digestat qui ressort des réacteurs est tout d'abord pressé pour éliminer l'excès d'eau. Il est aussi mélangé aux fibres (bois broyé) qui absorbent l'humidité (cf. pré-traitement).



Compostage en couloirs ventilés

Source : Valorga

Puis, il est entreposé *le hall de maturation*, un grand bâtiment clos où un système de retourneuse sur rails automatiques permet un assèchement plus rapide (procédé de compostage en couloirs ventilés). Aussi, de l'air préalablement réchauffé est injecté au compost au moyen d'un plancher perforé. Ces deux systèmes combinés permettent l'obtention d'un produit final avec un contenu (idéal) de 50% de matière sèche.

Le processus de maturation du compost est d'environ 2 semaines où la température arrive en moyenne aux 65°C. Avant sa commercialisation il est tamisé afin de réduire le contenu de contaminants présents (verre, plastiques, etc.) et d'obtenir une taille homogène du produit.

Dans ce bâtiment, l'air est aspiré, désinfecté et désodorisé dans une tour de lavage ce qui réduit, de manière importante, les nuisances olfactives.

Le compost obtenu est homologué par la norme française NFU 440-51 qui en garantit la haute qualité. Ceci permet sa commercialisation en agriculture et en horticulture. Le compost est aussi remis gratuitement aux usagers habitant les communes du SIVOM.

Maintenance

- Problème de blocage des injecteurs qui recirculent le biogaz. Néanmoins, le débouchage ne semble pas être une procédure trop compliquée pour retourner au déroulement normal du processus.

On mesure le temps que le biogaz prend depuis sa sortie en haut du réacteur pour arriver aux points de rentrée, en bas du réacteur. Une claire indication de blocage est montrée lorsque ce temps est supérieur à une certaine valeur, 18 sec. à l'installation de Varennes-Jarcy.

Résumé technique

Ville	Procédé/ Fournisseur	Type de déchet	Capacité traitement	Produit finaux	Coûts de traitement
Varenes- Jarcy – France (MS : 2002)	Procédé Valorga / Société Urbaser- Valorga CO : - procédé sec (30 % MS) -TRH : 21-25 j - monophasique - mésophile (37 °C)	30% Biodéchets triés sélectivement ; 70% Déchets résiduels	100.000 (t/an) 3 Digesteur verticaux - hauteur : m - volume : 1x 4.500 m3 + 2 x 4.200 m3	- Biogaz : 140 m3/tonnes équivalent de déchets triés ; → Electricité : 3 000 MWe (25 % utilisé en interne, 75 % revendue); - Digestat : Compost commercialisé (agriculture et horticulture) → Certifié par la norme NFU-44051	- Déchets résiduels : 60 euro/tonne - Biodéchets : 35 euro/tonne

MS : mise en service

CO : conditions opératives

Qualité du compost

Production	Contrôle
25.000 tonnes/an en 2004 (de 64.000 déchets collectés tonnes/an)	- Conforme Norme NFU 440-51

8.4. Le cas de l'installation de Mülheim an der Ruhr

Introduction

La société MEG Mülheimer mbH (51 % propriété de ville de Mülheim et 49 % de RWE Umwelt AG) est propriétaire du nouveau centre de traitement de déchets à Mülheim an der Ruhr. Dans ce site de 4.600 m², cette société gère le traitement et/ou l'élimination des déchets municipaux classiques à travers différentes installations: un centre de recyclage, un magasin de réparation, une installation de trie, une station de transfère de déchets résiduels (mélangés), une installation temporaire de stockage de déchets dangereux et l'installation de biométhanisation, objet de cette visite.

L'installation de biométhanisation, opérée par la firme Remondis, traite des déchets organiques très variés. Mise en service en 2003, l'installation dispose d'une capacité de traitement annuelle de 22.000 tonnes. Au moment de la visite, elle ne travaillait pas encore à pleine capacité.

Dans l'installation on traite d'une part, les déchets fermentescibles provenant des ménages, c'est-à-dire, les déchets organiques de cuisine et jardin qui sont collectés sélectivement dans des sacs bruns auprès des 169.905 habitants de la ville de Mülheim et, d'autre part, les déchets méthanisables provenant des commerces. Ces derniers tant de la ville même comme d'autres localités (par exemple, des restes de boulangerie provenant de Stuttgart). Les déchets appelés « de commerce » comprennent les déchets de cuisine assimilés provenant tant de commerces que des supermarchés et incluent notamment des produits périmés, des déchets de fruits et légumes restes des marchés et des déchets des restaurants. Des matériels liquides tels que les glaces fondues sont aussi traités.

Il est à remarquer que certains de ces produits arrivent au hall de déchargement toujours dans leurs emballages (salades dans des boîtes plastiques, etc.) en conséquence la quantité de sacs en plastique éliminée par le prétraitement n'est pas négligeable.



Mülheim

Le procédé

Le procédé utilisé dans cette installation est le procédé BTA (Biotechnische Abfallverwertung) de la société allemande MAT.

Le procédé comprend les étapes suivantes :

- **le pré-traitement** des déchets organiques qui arrivent au hall de déchargement. Il sert principalement à se défaire des contaminants (principalement le bois mais aussi les plastiques, les métaux, les verres, etc.) mais aussi à donner au substrat une consistance adéquate pour être digéré,
- **la digestion** des biodéchets comprend la production de biogaz brut et du digestat. Mülheim utilise un procédé humide, mésophile et monophasique,
- **le post-traitement** : en ce qui concerne le digestat, il n'est pas un post traitement sur place. Il est à remarquer que l'installation à Mülheim ne produit pas de compost elle-même. Pour cette raison, le post-traitement n'implique que le passage du digestat par de *presses de déshydratation*. Déshydraté, le digestat sera postérieurement envoyé à une installation de compostage à Cologne pour suivre le processus de maturation et affinage. Ceci, afin d'obtenir du compost commercialisable.

La figure 8.3 présente le *Diagramme de Flux* de l'installation de Mülheim ann de Ruhr.

Moyennant deux halls de réception, l'installation a été conçue pour appliquer un prétraitement différentiel selon qu'il s'agisse de déchets provenant de la collecte sélective réalisée auprès de particuliers ou de déchets de commerce. Au moment de la visite, le hall destiné initialement à la réception des déchets fermentescibles ménagers n'est cependant pas utilisé en raison de contraintes opérationnelles.

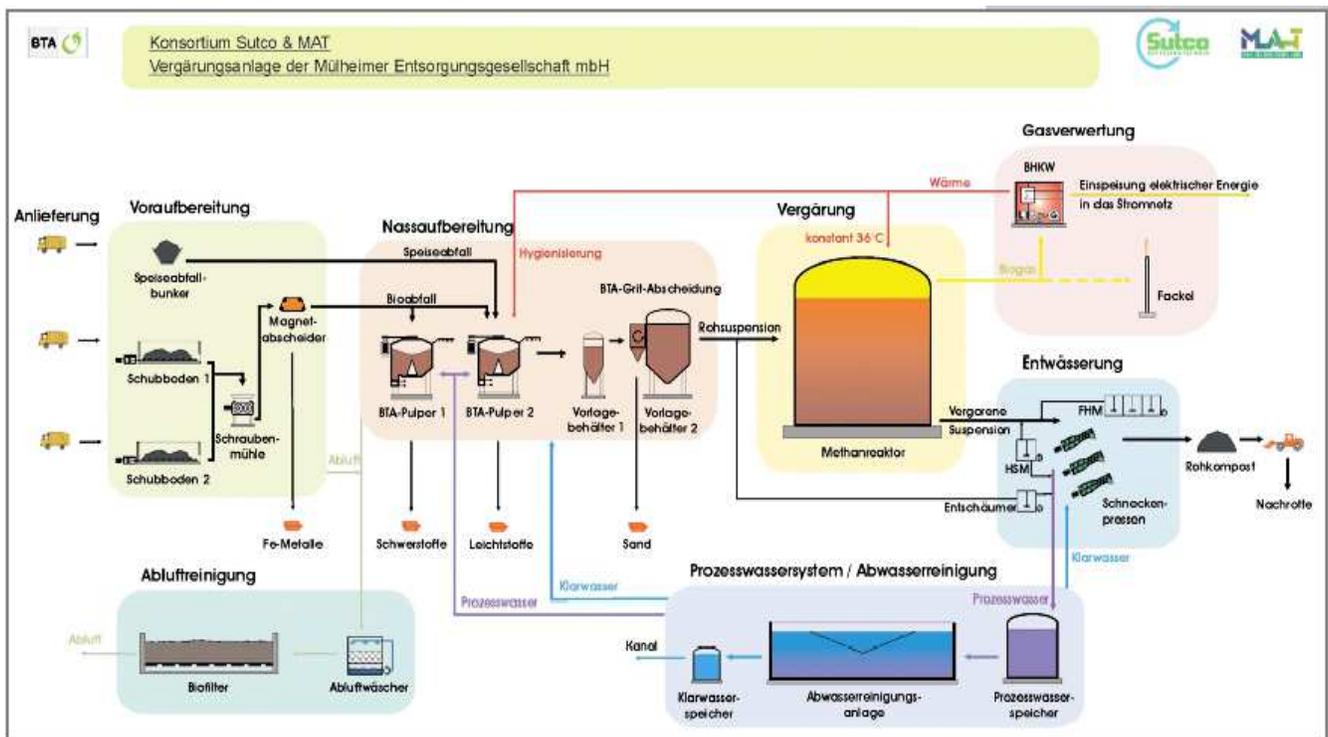


Figure 8.6 Diagramme de Flux (Source : BTA international)

- **le pré-traitement hydromécanique**



Dans le hall actuellement en fonctionnement, les ordures fermentescibles (des particuliers et des commerces) sont déchargées par les camions de collecte dans deux *bunkers (fosses) de fond mouvant*.

Les déchets y sont stockés temporairement pour ensuite être transportés vers un crible afin de réduire grossièrement leur taille. En suite, via un *tapis roulant pneumatique* (conveyor belt) les déchets passent sous un *séparateur magnétique* qui a pour objectif enlever les métaux.

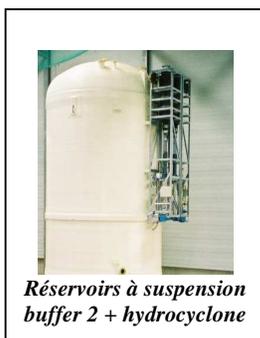
(Source : Mülheim an der Rur – Stad en Fluss)



La matière libre des métaux est ainsi dirigée vers les *hydropulpeurs* (deux pulpeurs de 20m³ travaillant en mode batch) où elle est diluée pour obtenir une concentration de matière sèche entre 8 t 10%. L'eau utilisée pour diluer la matière entrante provient de *l'unité de traitement des eaux* (l'eau de procédé est donc réutilisée).

Le principe de l'hydropulpeur n'est pas restreint au simple mélange. Il défibre et dissout la biomasse de façon rapide et efficace. Ainsi, la « pulpe » sortante est composée d'une suspension liquide contenant environ 90% de composants fermentescibles (Source : BTA international).

Dans les hydropulpeurs, deux fractions contenant des contaminants seront séparés des déchets organiques. *La fraction lourde 1*, correspondant à tout ce qui tombe au fond des pulpeurs, est constituée principalement par des morceaux de métaux, pierres, verres et par d'autres constituants indésirables. *La fraction légère 1*, tout ce qui flotte, comme les sacs en plastiques est aussi enlevé des pulpeurs. Ce qui reste en suspension est composé par de la matière enrichie en composants organiques.



Cependant, certains sédiments tels que les sables, les petites pierres, les coquilles d'œuf, etc. sont toujours présents dans la suspension organique des pulpeurs et doivent être éliminés du flux. Ceci du fait qu'ils produisent l'usure et l'obstruction dans différentes parties des machines et particulièrement dans les tuyaux. Les séquelles de l'action de ces fines particules résiduelles appelées *sables*²² se traduisent par un service d'entretien avec des frais élevés.

Source : BTA International

²² Fraction de sables = fraction lourde 2

Ainsi, un système de grilles d'élimination (« *grid removal system* ») est utilisé pour éliminer ces sédiments fins. A Mülheim, ce système comprend 2 réservoirs à suspension buffer²³ et un hydrocyclone. L'*hydrocyclone* est un constituant fondamental de ce système qui enlève les sables provenant des pulpeurs de « la pulpe » de déchets organiques qui sera méthanisée. Cette fraction constituée par des particules inférieures à 10mm (sables) est appelé *fraction lourde* 2.

Il est à remarquer qu'un des pulpeurs (BTA-pulper 2 dans la figure 8.6) est isolé thermiquement, ceci afin de recréer les conditions nécessaires pour tout matériel requérant un traitement sanitaire²⁴. Dans ces conditions, la matière organique est réchauffée à une température de 70°C pendant 1 heure minimum.

La figure 8.4 présente une vue du pulpeur (en bleu) et du « grid removal system ».



Figure 8.7 Prétraitement hydromécanique (Source : BTA international²⁵)

Les fractions ainsi séparées par les pulpeurs et l'hydrocyclone (la fraction lourde, la fraction légère et la fraction de sables) sont, toutes les trois, dirigés vers un hall de stockage (en principe conçu pour la maturation du compost mais n'est pas utilisé comme tel). Ces fractions ne suivent pas une valorisation matière. Elles sont incinérées.

De manière générale, la quantité des matières contaminantes dans le flux déchets organiques qui arrivent au hall de déchargement n'est pas négligeable. Même si les déchets collectés sont issues de la collecte sélective, des contaminants comme le bois présent dans les déchets de jardin et le plastique

²³ Réservoir à suspension buffer : composé par un réservoir de charge ou à suspension buffer 1 et un réservoir à suspension buffer 2

²⁴ En Allemagne tout matériel organique provenant des commerces requiert d'un processus sanitaire (hygénisation)

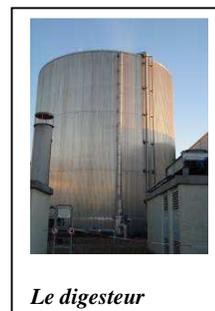
²⁵ http://bta-international.de/der_bta_prozess.html?&lang=3

des emballages issus des déchets de commerce sont importants. Dans ce sens, il est à souligner que la quantité de contaminants sépare avec le procédé tel qu'appliqué à l'installation de Mülheim est d'environ plus d'un tiers de la capacité annuelle de traitement (environ 8.000 tonnes/an sur 22.000 tonnes/an).

- **le traitement**

« La pulpe » enrichie en déchets méthanisables est redirigée vers le réacteur où elle sera digérée en anaérobie. Ce dernier (3.400 m³ de capacité) travaille dans des conditions monophasiques et mésophiles (35-38°C). Le temps de rétention hydraulique (TRH) prescrit par le fournisseur (environ 18 jours) est le temps utilisé dans cette installation.

Même si la capacité de traitement est de 22.000 tonnes/an, l'installation de Mülheim ne travaille pas à pleine capacité. Elle a traité 18.000 tonnes annuelles en 2006 et deux tonnes de moins dans le courant de 2007.



Dans le digesteur, la matière est mélangée par la recirculation d'une partie de biogaz produite dans le processus. Le biogaz est réintroduit moyennant 8 injecteurs qui rentrent par-dessus du réacteur, parcourent sa longueur et s'ouvrent à la base de celui (Figure 8.8). Le biogaz mis sous pression mélange la pulpe liquide dans son chemin ascendant.



Figure 8.8 Système d'injecteurs de biogaz (Source : BTA international²⁶)

En moyenne le biogaz produit par biométhanisation présente un contenu moyen de 65% de CH₄. A la sortie du digesteur, il est dirigé vers la station de cogénération. Cette station est constituée par deux groupes électrogènes qui ensemble représentent une capacité totale production d'électricité de 622 KW (2 groupes électrogènes de 311KWe chacun). A l'heure actuelle toute l'électricité produite est injectée dans le réseau. L'électricité nécessaire au fonctionnement de l'installation est rachetée. Ceci du fait des avantages financiers que représente la vente d'énergie dite « verte »²⁷ en Allemagne. Par exemple, ceci représentait en 2006, 2,8 mKWh/an produites et 1,5 mKWh/an consommés des 18 tonnes de matière digérée. Ces valeurs



²⁶ http://bta-international.de/der_bta_prozess.html?&lang=3

²⁷ L'électricité produite à Mülheim est vendue environ à 10 cents d'euro par KWh et racheté à environ 8 cents d'euro



La torchère

montrent que de la quantité totale de énergie produite dans l'installation environ la moitié est utilisée pour consommation interne. L'installation est capable de produire de l'électricité suffisante pour 500 ménages (intégrés en moyenne de 4 personnes).

En ce qui concerne l'énergie thermique, sa production annuelle est d'environ 430 KWt (4,220,000 kWh/a). Cette dernière est utilisée dans l'installation pour maintenir à température adéquate le matériel entrant dans le digesteur (37°C) et pour réchauffer le matériel présent dans un des pulpeurs durant le traitement sanitaire des déchets de commerce (70°C).

Il est intéressant à remarquer qu'au contraire des autres installations visitées, à Mülheim *la torchère* n'est que rarement utilisé sauf en cas d'urgence et pendant les weekends, la torchère n'est pas en fonctionnement. Dans des conditions normales d'opération (pas d'urgences) son utilisation est principalement due à ce que cette installation ne compte pas avec un dispositif de stockage de biogaz, ce qui par ailleurs ne semble pas poser des inconvénients.

Outre le biogaz produit, le résidu organique qui ressort du digesteur, le digestat, est ensuite dirigé vers *l'unité de déshydratation*. Cette unité est constituée par une presse.



La presse



Stockages d'eau de procédé et d'eau traitée

L'eau qui ressort de ce traitement est dirigée vers *l'unité de traitement d'eau de procédé*. La plupart de l'eau de presse y sera filtrée et réutilisée pour hydrater la pulpe entrant dans les pulpeurs et dans l'hydrocyclone.

La quantité de digestat produite (entre 25 et 35 % de matière sèche) représente un peu plus d'un tiers de la matière totale digérée (En 2006, 6.700 tonnes de digestat déshydraté ont été obtenues à partir des 18.000 tonnes traitées).

Mülheim comporte aussi un dispositif de réduction de nuisances olfactives. L'air de halls fermés est aspiré et lavé avant d'être dirigé vers un *biofiltre*.



Digestat

- **le post-traitement**

Digestat

Après déshydratation, le digestat est transféré à une installation de compostage à Cologne. Là-bas, le digestat suivra un processus de maturation et d'affinage en aérobiose pour être transformé en compost commercialisable. Le compost brut est soumis à maturation pendant 1 à 3 semaines.

Au bout de ce processus, le compost obtenu (de haute qualité) respecte les critères de qualité exigés par l'ordonnance sur les biodéchets/déchets organiques²⁸ (BioAbfVO) et par les standards RAL²⁹.

²⁸ BioAbfVO (in EN) : <http://www.bmu.de/english/documents/doc/3379.php>

Maintenance

- En cas de blocage des injecteurs qui recirculent le biogaz dans le digesteur : les lancettes doivent être isolées pour que du biogaz à une certaine pression soit injecté afin de les désobturer. Cette pression doit être plus grande que la pression hydrostatique du digestat dans le réacteur.
- Il est à remarquer que depuis le démarrage de l'installation en 2003, celle-ci n'a pas rencontré de problèmes à signaler, ayant de manière générale un fonctionnement satisfaisant selon nos interlocuteurs.

Résumé technique

Ville	Procédé/ Fournisseur	Type de déchet	Capacité traitement	Produit finaux	Coûts de traitement
Mülheim – Allemagne (MS : 2003)	BTA / MAT CO : - procédé humide -TRH : 18 j - monophasique - mésophile (35-38 °C)	Biodéchets collectés sélectivement (cuisine et jardin) + Déchets de commerces	22.000 (t/an) 1 Digesteur verticaux 3,400m ³	- Biogaz : 460 Nm ³ /tonnes équivalent de déchets ; → Electricité surplus (produite – consommée) : 2.225 MWhe/an (en réalité : 100 % vendue ; 50 % racheté pour consommation interne) → Thermique surplus: 4.220 MWh/a Total energy conversion efficiency : 76% (11.300 MWh/a) - Digestat : Compost commercialisé	- Biodéchets : <i>No data</i> - Déchets de commerces : <i>No data</i>

MS : mise en service

CO : conditions opératives

Qualité du compost

Production	Contrôle
~6.700 tonnes/an en 2006 (de 18.000 déchets collectés tonnes/an)	- Certifié par : BioAbfVO / RAL

²⁹ Il y a deux standards RAL : pour le compost (<http://www.kompost.de/index.php?id=36>) et pour le digestat (<http://www.kompost.de/index.php?id=706>)

9. Conclusions : quelques considérations au moment de choisir le type d'installation

Le traitement de déchets biodégradables municipaux par biométhanisation se présente, de nos jours, comme une option intéressante et adéquate en milieu urbain qui s'installe dans le cadre du développement durable. Les déchets fermentescibles deviennent des ressources, retrouvant leur place dans le cycle « ressources-produits-déchets-ressources ». De plus, l'utilisation du biogaz dans ses différentes formes de valorisation (électricité, chaleur, carburant) implique que moins de ressources non renouvelables sont employées pour obtenir de l'énergie. Ceci avec des émissions polluantes très réduites par rapport aux combustibles classiques comme effet immédiat.

Il existe différentes technologies bien établies pour le traitement de la FFOM qui sont disponibles sur le marché. Cependant, plusieurs considérations sont nécessaires avant d'envisager la construction d'une installation de biométhanisation. Une planification technique soignée de l'installation sera nécessaire, de même que l'analyse détaillée de ses coûts et de ses débouchés. Ceci surtout du fait que les investissements en jeu sont importants. Ces considérations incluent :

- **le type et la quantité des déchets potentiels à traiter**, ce qui sera déterminant dans le choix non seulement du type de procédé, mais aussi de son dimensionnement (capacité de traitement des digesteurs). Il est important de tenir compte du fait que le substrat à méthaniser doit avoir au moins 10% de matière sèche, et ce via l'apport de matières organiques qui favorisent la production de CH₄ et réduisent la teneur en soufre (papiers souillés, déchets végétaux, graisses végétales, tontes de pelouses, ...). Par ailleurs, il est important de disposer d'un gisement continu de matières organiques à traiter pour éviter de devoir arrêter et redémarrer l'installation ;
- **le besoin ou non de la mise en place d'un système de collecte sélective** de déchets organiques. Ce type de collecte jouera un rôle important dans la conception de l'installation notamment quant au choix des procédés de prétraitement ainsi que dans la qualité et l'homogénéité du compost produit avec pour corollaire des implications significatives dans les possibilités de valorisation du digestat et du compost ;
- **la localisation de l'installation de biométhanisation** : d'une part, la proximité par rapport aux installations qui vont valoriser les produits finaux (par exemple un hôpital pour la chaleur, le réseau de distribution pour l'électricité), d'autre part, une « distance de précaution » par rapport aux habitations réduit le risque de nuisances olfactives (même si celles-ci sont réduites par rapport à d'autres techniques de traitement de déchets organiques) ;
- **l'analyse détaillée des débouchés potentiels** : la production d'électricité, de chaleur, la cogénération ou la production de biogaz carburant ;
- **l'information du public** : ceci contribuera, sans doute, non seulement à sensibiliser le citoyens (notamment dans le cas d'une collecte sélective), mais aussi à favoriser le marketing des produits finaux ;
- **la procédure administrative** : la réalisation des études préalables nécessaires, telles que l'étude d'incidence et de faisabilité, et l'introduction des permis d'exploiter et de bâtir ;
- **la prise en compte des règles de sécurité** : liées surtout aux risques d'explosion et d'incendies ;

- **la prise en compte des avantages et inconvénients selon le contexte local.** Le tableau ci-dessous reprend les principaux avantages et inconvénients de la biométhanisation.

POSSIBILITÉS / INTERETS	AVANTAGES	INCONVENIENTS / CONTRAINTES
Possibilité de traiter des déchets non triés	Oui comme pré-traitement avant stockage comme déchets ultimes	Implique un tri poussé pour la valorisation agronomique
Possibilité de traiter d'autres types de déchets	Oui (boues de STEP, déchets des IAA, déchets d'espaces verts, de restauration...)	Sous réserve de non contamination et d'aptitude à la fermentation
Possibilité de traiter des déchets humides	Oui	Eaux usées à traiter en cas de bilan hydrique négatif
Possibilité de traiter des déchets ligneux	En post-maturation	Lignine non digestible, nécessité d'un broyage fin
Intérêt pour les communes rurales	Évite le transport des déchets sur de longues distances	Nécessité d'une taille minimale, ou opportunité pour traiter d'autres types de déchets
Intérêt pour les communes urbaines	Habitat pavillonnaire adapté à la collecte séparative des organiques Possibilité d'implantation en zone urbanisée	Difficultés pour organiser une collecte séparative en habitat urbain très dense ou vertical
Compatibilité avec le compostage	Oui (post-maturation) Co-traitement avec les déchets verts ligneux	Technique concurrente pour des quantités limitées
Compatibilité avec l'incinération	Oui (déchets humides détournés de l'incinération)	L'économie globale de la gestion des déchets est affectée
Compatibilité avec le stockage	Oui (pré-traitement avant stockage)	

Tableau 9.1. Intérêts, avantages et inconvénients de la biométhanisation (Source : SOLAGRO, ARENE, GDF, ADEME ; 2000)

10. Bibliographie et sites internet utiles

Bibliographie

ADEME, 2003. Réalisation d'un référentiel technique et économique d'unités de traitement de déchets organiques par méthanisation avec et sans valorisation du biogaz.

De Baere, L. ; 2006. "Will Anaerobic Digestion of Solid Waste Survive in the Future?", Water Science & Technology 53 (8):187-205

BIOGASMAX, a driving force. Carburant renouvelable pour les transports.

Blischke, Joerg ; 2004. Combining anerobic digstion with enclosed tunnel compposting. BioCycle Energy.

Bureau d'études IRCO Sprl. Vade-mecum technique et administratif relatif à la biométhanisation de biomasse humide en Région wallonne pour les installations d'une puissance maximale de 10 MWth. Document téléchargeable : http://energie.wallonie.be/servlet/Repository/VADEMECUM_BIOMETHAN.PDF?IDR=465

Etopia, 2005. La biométhanisation des déchets ménagers : vers une modernisation écologique de la gestion des déchets ? L'exemple de la Province de Namur et de la commune d'Assesse. Document téléchargeable : <http://www.etopia.be/IMG/pdf/25.biomethanisation.pdf>, accédé le 03/12/2008

IGEAN. <http://www.igean.be>

Lille Métropole, <http://www.lillemetropole.fr>

Léonard, Angélique ; 2002. Biométhanisation. Ulg, Faculté des Sciences Appliquées, Département de Chimie Appliquée, Laboratoire de Génie Chimique. <http://www.lassc.ulg.ac.be/webCheng00/IngenieurEnergie/Biomethane.pdf>, accédé le 03/12/2008

Marshal, Alex, 2007. Growing bigger, Bioenergy from waste as a source of power. Waste management world. Document en ligne : http://www.waste-management-world.com/display_article/289598/123/CRTIS/none/none/Growing-bigger/, accédé le 03/12/2008

ORDIF (L'Observatoire Régional des Déchets d'Ile de France), ARENE (L'Agence Régionale de l'Environnement et des Nouvelles Energies Ile de France), 2003. Quelle place pour la méthanisation des déchets organiques en Ile-de-France ? Document téléchargeable : <http://www.ordif.com/public/document.srv?id=6989>, accédé le 03/12/2008

Programme européen BioGasMax <http://www.biogasmax.eu>

RDC Environnement, 2007. Techniques de Biométhanisation. <http://www.rdcenvironnement.be>

SIVOM, http://www.orcagna.com/sivom_2005

SOLAGRO, ARENE, GDF, ADEME , 2000. La méthanisation des déchets ménagers et assimilés.

Svenskbiogaz - Suède, <http://www.svenskbiogas.se>

Verdis, <http://www.verdesis.net>

Sites internet intéressantes

ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie). <http://www.ademe.fr>

AIE (agence international de l'énergie), Task 37. <http://www.iea-biogas.net>

ATEE, club biogaz. <http://www.biogaz.atee.fr>

EDEN (Energie, développement, environnement). <http://www.eden-enr.org>

Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement, INRA. <http://www.methanisation.info>

Le biogaz, portail professionnel du biogaz. <http://www.lebiogaz.info>

ORDIF (L'Observatoire Régional des Déchets d'Ile de France). <http://www.ordif.org>

Portail de l'énergie en Région wallonne. <http://energie.wallonie.be>

Publications Solargo. <http://www.solagro.org>

Waste management world. <http://www.waste-management-world.com>

Méthéor. <http://www.metheor.org>

11. Annexe

Liste non-exhaustive des fournisseurs de technologies

Fournisseur	Adresse	Site internet	e-Contact	Téléphone/fax
AAT Biogas	Austria 6960 Wolfurt, Konrad Doppelmayer Straße 17	www.aat-biogas.at	office@aat-biogas.at	+43/5574/65190-18/ +43/5574/65185-6
BTA	Landsberger Str. 6, D-80339 München, Allemagne	www.bta-technologie.de	post@bta-technologie.de	+4989520460-6/ +49895232329
Kompogas	Kompogas AG Flughofstrasse 54 CH-8152 Glattbrugg, Suisse	http://www.kompogas.ch	info@kompogas.ch	+4144 8097777/ +41448097700
Linde KCA	Bodenbacher Strasse 80 01277 Dresden Allemagne	http://www.linde-kca.com/	http://www.linde-kca.com	+49351250300/ +493512504800
OWS	Dok Noord 4 B-9000 Gent, Belgique	www.ows.be	winfried.six@ows.be	+3292330204/ +3292332825
Valorga International	1140 avenue Albert Einstein - BP 51 F 34935 Montpellier Cedex 09, France	http://www.valorgainternational.fr	contact@valorgainternational.fr	+334 6799 4100/ +33 467 99 4101

Personnes de contact aux installations visitées

Brecht

M. Peter Magielse
IGEAN milieu & veiligheid
Oostmallebaan 70-72
2960 St Lenaarts (Brecht), Belgique
Tél. : +32 (0)3 330 19 20/350 0811

Ypres

M. Johan Del'haye
Exploitatieverantwoordelijke GFT Compostering
IVVO Bargiestraat 6
8900 Ieper, Belgique
Tel 057/23.08.80/82

Varennes-Jarcy

M Franc Seara
SIVOM de la Vallée de l'Yerres et des Sénarts
Route du Tremblay
91480 Varennes-Jarcy – France
Tél. : +33 1 69 00 57 41

Mülheim a.d. Ruhr

M. Roche
MEG Mülheimer Entsorgungsgesellschaft mbH
Pilgerstraße 25
45473 Mülheim a.d. Ruhr, Allemagne
Tél. +(0)208 9966 0 260/250

Pour contacter l'auteur :

Gabriela Collado
Association of Cities and Regions for Recycling sustainable Resource management (ACR+)
Avenue d'Auderghem 63,
1040 Brussels- Belgium
T: +32 2 234 65 05
F: +32 2 234 65 01
E-mail : mgc@acrplus.org
Website: www.acrplus.org