

**Sarah Boyer
Diane Labrunie
Elodie Segard**



Projet Scientifique en Laboratoire

Fabrication de Biogaz :
Synthèse de pétrole par
fermentation à partir de
déchets organiques



Tuteur : Mr Rouberty

- Janvier 2009 -

- Sep -

Sommaire

Sommaire	2
Tables des illustrations	3
Introduction.....	4
I. Généralités	5
I.1. Le problème des transports	5
I.2. Définition et historique : le biogaz/biométhane	6
I.3. Domaine d’application et exclusion de notre sujet	7
II. Du déchet organique au pétrole synthétique	8
II.1. Les types de déchets.....	8
II.2. Les différents pré-traitements.....	10
II.3. Les différents digesteurs : lieu de la fermentation anaérobie	12
II.4. Purification et valorisation du biogaz.....	15
III. Quels processus biologique se déroulent dans les méthaniseurs ?.....	17
III.1. Fonctionnement biochimique d’un méthaniseur par digestion anaérobie.....	17
III.2. Les bactéries de la méthanisation	20
III.3. Les facteurs physico-chimiques.....	23
III.4. Les besoins nutritionnels.....	24
IV. Aspect réglementaire, économique et écologique du biogaz.....	25
IV.1. Aspect réglementaire.....	25
IV.2. Aspect économique : les freins à la valorisation du biogaz	25
IV.3. Aspect écologique	25
IV.4. Des projets mis en place : quelques exemples	26
V. Gestion de Projet.....	29
Sarah BOYER - Diane LABRUNIE - Elodie SEGARD	2

PSL 2009

V.1. Limitation et faisabilité du projet 29

V.2. Equipe de projet/ répartition des tâches/ acteurs extérieurs 29

V.3. Objectifs du projet 29

V.4. Les ressources 29

V.5. Intervalle de temps de réalisation 29

V.6. Planification prévisionnel..... 29

Conclusion 30

Bibliographie..... 31

Résumé..... 32

Abstract 32

Tables des illustrations

Figure 1 : Schéma des sources et utilisations du Biogaz ----- 7

Figure 2 : Le biogaz. Procédés de fermentation méthanique ----- 11

Figure 3 : avantages et inconvénients des différents digesteurs infiniment mélangés ----- 13

Figure 4 : Le biogaz. Procédés de fermentation méthanique ----- 14

Figure 5 : schéma d’installation de récupération du gaz----- 15

Figure 6 : les différentes étapes de la digestion anaérobie et les flux de carbones associés (en % de DCO) ----- 19

Figure 7 : bactéries du genre Méthobactérium ----- 22

Figure 8 : Contenu des projets de démonstration ----- 27

Figure 9 : Objectifs chiffrés ----- 28

Introduction

Les activités humaines et surtout les transports sont en partie responsables de l'accroissement de l'effet de serre et par conséquent du réchauffement de la planète.

Pour faire face à cette problématique, une action clé sur le court terme consiste à augmenter l'utilisation de carburants alternatifs afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Pour son approvisionnement en énergie, l'Union Européenne est de plus en plus dépendante des carburants fossiles importés. Or, les ressources pétrolières sont limitées, la demande en énergie est en constante augmentation et les produits pétroliers proviennent de zones politiquement instables.

De plus, les émissions de gaz à effet de serre par les carburants fossiles contribuent au changement climatique.

Cette situation complexe engendre d'importants risques écologiques et économiques pour la société.

C'est pourquoi la Commission Européenne a engagé une série d'initiatives centrées pour la plupart sur le secteur des transports fortement dépendant du pétrole. L'une de ces initiatives est de développer les unités de fabrication de biogaz et ainsi proposer une alternative au pétrole.

Dans le cadre du Projet Scientifique en Laboratoire, nous étudierons la synthèse du biogaz depuis le déchet jusqu'au biocarburant. Après avoir exposé les enjeux et les intérêts de la valorisation de cette nouvelle énergie alternative, nous expliquerons de façon technique sa fabrication. Ensuite, nous verrons quels procédés biochimiques permettent d'obtenir du biogaz. Enfin, nous aborderons l'aspect réglementaire de sa production. La dernière partie sera consacrée à la gestion de projet à savoir son déroulement et l'analyse des éventuels écarts.

I. Généralités

1.1. Le problème des transports

De nos jours, les activités humaines et surtout les transports sont en partie responsables de l'augmentation de l'effet de serre et par conséquent du réchauffement de la planète.

Cette hausse de gaz à effet de serre au niveau du transport s'explique par l'augmentation du trafic routier, par l'augmentation des distances parcourues et par la généralisation d'équipements fortement consommateurs d'énergie comme par exemple la climatisation (émetteur de gaz fluorés).

Sur le plan national, la part de la circulation routière dans les émissions totales de gaz à effet de serre est d'environ 20%. Elle est responsable de 1% des émissions de N₂O, 14% des émissions de HFC (Hydrofluorocarbures) en raison de la généralisation de la climatisation sur les véhicules, **33% des émissions de CO₂**. Ceci nous montre bien que les transports sont en tête des émetteurs pour ce polluant devant le résidentiel/tertiaire (23%), l'industrie manufacturière (29%), la transformation d'énergie (18%) et l'agriculture/sylviculture (2%). (Source : CITEPA pour l'année 2006.)

Les émissions de CO₂ sont directement proportionnelles à la consommation de produits pétroliers, constitués en quasi totalité par des hydrocarbures saturés qui comportent dans leur masse 75% à 84% de carbone. A l'issue de la combustion, le carbone se retrouve quasi intégralement dans les gaz d'échappement, combiné à l'oxygène de l'air sous forme de CO₂ ou de CO qui se transforme en CO₂. On peut ainsi considérer qu'un moteur émet autant de carbone qu'il en consomme sous forme de carburant.

Emissions de CO ₂ par litre de carburant consommé	
Essence	2,35 kg
Gazole	2,60 kg

Tableau 1: Emissions de CO₂/l de carburant consommé

Pour faire face à ce problème, on commence à utiliser du **biogaz** comme carburant (**biométhane**). Celui-ci permet de supprimer les rejets de fumées dans l'atmosphère et de réduire les gaz à effets de serre ainsi que la pollution sonore.

I.2. Définition et historique : le biogaz/biométhane

I.2.1. Définition

Le biogaz peut être obtenu par la fermentation de matières organiques animales ou végétales en l'absence d'oxygène.

Cette fermentation est appelée aussi méthanisation. Celle-ci se produit naturellement (dans les marais) ou spontanément dans les décharges contenant des déchets organiques, mais elle peut être aussi provoquée artificiellement dans des digesteurs pour traiter des boues d'épuration, des déchets organiques industriels ou agricoles....

Le biogaz est un mélange composé essentiellement :

- de méthane (typiquement 50 à 70%) et
- de gaz carbonique, avec des quantités variables d'eau, d'hydrogène sulfuré (H₂S).

Le biogaz carburant est du biogaz ou du biométhane utilisé comme carburants verts pour véhicules. Sa partie énergétique est du méthane biologique, il s'agit donc tout simplement de GNV (Gaz Naturel pour Véhicule) renouvelable.

I.2.2. • Historique

La découverte du pétrole synthétique par Jean Laigret. (1863-1966)



Jean Laigret est un médecin et un biologiste français. Il est né le 17 août 1893, à Blois dans le Loir et Cher. Il est élève de l'Ecole principale du service de Santé de la Marine. De 1921 à 1923, il est médecin de l'Hôpital Indigène du Moyen-Congo, à Brazzaville. En 1923, il suit le cours de microbiologie de l'Institut Pasteur.

Des 1943, il est chargé par le gouvernement d'étudier des bactéries qui interviennent dans la fabrication de fumier. Il travaille sur la fabrication d'hydrocarbure à partir de bactéries anaérobies du sol, de type *perfringens*.

Les bacilles anaérobies sont des microorganismes capables de vivre dans un milieu privé d'oxygène. Le *perfringens* possède déjà une certaine notoriété: c'est en effet l'un des microbes les plus importants de la gangrène gazeuse; d'autre part, son action de ferment destructeur de la matière organique aux dépens de laquelle il produit du gaz carbonique et de l'hydrogène

Un article de Jean Lagarde a été publié dans science et vie en Juillet 1949 intitulé « le pétrole de fermentation peut être produite partout ».

Extrait de l'article :

A Tunis, le Dr *Jean Laigret* vient d'obtenir du pétrole par l'action d'un ferment, le bacille « *perfringens* » sur les matières organiques les plus diverses. Cette découverte qui élucide le problème de la formation du pétrole naturel peut provoquer une révolution économique. Elle apporte un prestige

PSL 2009

nouveau à l'Institut Pasteur de Tunis, dont le directeur, Charles Nicolle (1866-1936), avait reçu le prix Nobel de médecine en 1928.

1.3. Domaine d'application et exclusion de notre sujet

Le biogaz peut être utilisé à différentes fins. Il peut être utilisé en tant que :

- chaleur
- électricité
- gaz naturel
- carburant

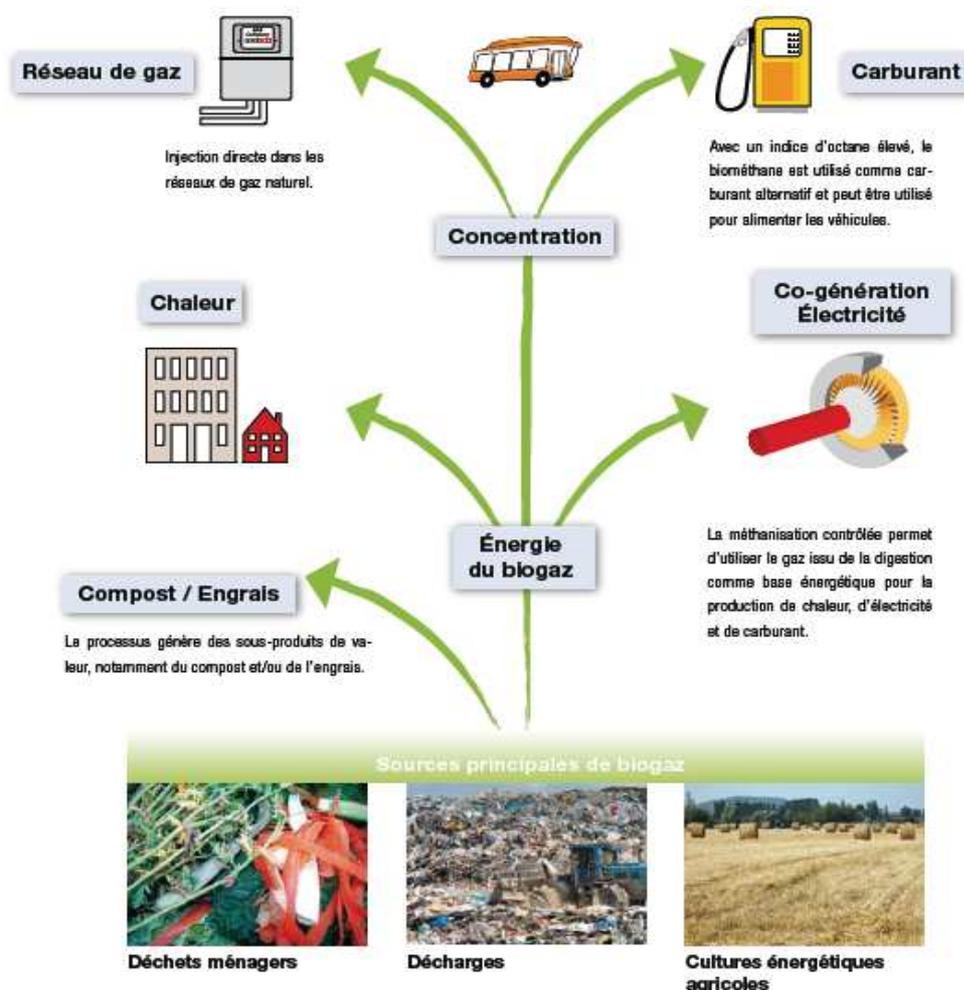


Figure 1 : Schéma des sources et utilisations du Biogaz

Source : www.biogasmax.fr

PSL 2009

Pour expliquer la synthèse de pétrole à partir de déchets organiques, nous allons nous intéresser aux installations productives de biogaz par fermentation anaérobie. Nous nous intéressons ici seulement à la production de carburant.

II. Du déchet organique au pétrole synthétique

Nous verrons dans cette partie la synthèse de biogaz à partir de déchets organiques à savoir les différents pré-traitements et les types de digesteurs, siège de la méthanisation. Ensuite nous verrons la valorisation du biogaz en carburant, c'est-à-dire les différentes méthodes de purification et concentration du biogaz.

II.1. Les types de déchets

Toute installation de biogaz est alimentée par différents substrats organiques et fermentescibles dont l'état peut être liquide, pâteux ou solide. Les déchets qui sont particulièrement intéressants pour faire fonctionner une installation de biogaz sont :

- les déchets agricoles
- les déchets agroalimentaires
- les déchets ménagers.

Les principales industries agro-alimentaires et leurs déchets dont l'apport organique est important sont : la transformation de la viande et du poisson, les déchets boueux de produits alimentaires provenant du lavage, du nettoyage, de l'épluchage ou encore les boues provenant de la fabrication de graisses alimentaires, ...

Les déchets agricoles sont en général du lisier de bovins, du lisier de porcs ou encore de la fiente de volaille (Cf. encadré ci-dessous). Les lisiers de bovins et de porcs constituent un bon substrat pour produire du biogaz. Les vaches laitières produisent environ 26 à 28 m³ de lisier par an. Le taux de matière sèche volatile MSV, c'est-à-dire la substance qui sert à la fermentation est d'environ 82% (Cf. encadré ci-dessous). Le pH du lisier est plutôt basique avec 7,4 et est ainsi approprié à la fermentation dont les valeurs idéales sont comprises entre 7,0 et 7,5. La teneur en méthane du biogaz produit à partir de ce genre de lisier est d'environ 60%. Ces valeurs sont identiques pour le lisier de porcs. Concernant les fientes de volaille, la teneur en matière sèche volatile est très variable à cause des systèmes d'élevages différents. Par conséquent la concentration en méthane du biogaz produit est très variable.

Le **lisier** est un mélange de déjections d'animaux d'élevage (urines, excréments) et d'eau dans lequel domine l'élément liquide. Il peut également contenir des résidus de litière (paille) en faible quantité. Il est produit principalement par les élevages de porcs, de bovins et de volailles.

MSV : La matière sèche est constituée de matières minérales et de matières organiques qui sont appelées matières volatiles sèches. La concentration en MSV est un taux par rapport à la matière sèche totale.

Les restes alimentaires, en raison de leur teneur énergétique très importante sont un excellent substrat pour produire du biogaz mais requiert cependant, à cause de leur composition chimique, beaucoup d'attention pour l'acheminement et le stockage dans l'installation. Les experts s'accordent sur un rendement de 90 à 140m³ de biogaz par tonne de substrat. Ce sont des conditions stables et optimales de croissance des micro-organismes qui garantissent un rendement énergétique maximal. Seule la part organique biodégradable importe, elle est représentée au mieux par la teneur en DCO des restes alimentaires (Cf. encadré ci-dessous). Le paramètre qui est ici décisif pour le rendement énergétique est la concentration en acides organiques. Un autre paramètre important est la teneur en azote dans les restes alimentaires et particulièrement la concentration en ammoniac NH₃. Le rapport entre la quantité de carbone et la quantité d'azote du substrat détermine la qualité de la fermentation.

La **Demande Chimique en Oxygène (DCO)** est la consommation en oxygène par les oxydants chimiques forts pour oxyder les substances organiques et minérales de l'eau. Elle permet d'évaluer la charge polluante des eaux.

La composition des substances nutritives décrites ci-dessous est caractéristique des restes alimentaires, elle sert de référence pour obtenir un rendement relativement élevé en biogaz, et ainsi une forte teneur en méthane :

Matière sèche	22%
Protéine brute	5%
Graisse brute	1%
Fibre brute	2.5%
Amidon	2%
Sucre	1.5%
Autres glucides	4.5%

Souvent ces types de déchets nécessitent un pré-traitement soit pour enlever les matériaux indésirables soit pour broyer le substrat.

PSL 2009

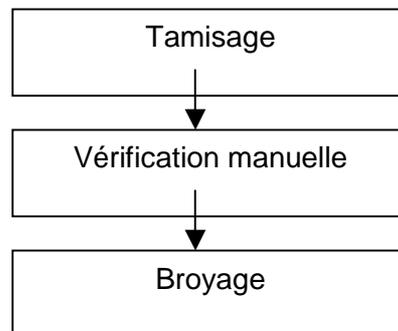
II.2. Les différents pré-traitements

Il existe deux types de pré-traitement :

- le pré-traitement à sec
- le pré-traitement humide

II.2.1 Le pré-traitement à sec :

Cette première méthode consiste à éliminer les matériaux indésirables par le tri manuel, le tri magnétique ou par tamisage. Généralement, le tamisage s'effectue en premier avec une granulométrie de 40mm, il est ensuite complété par un tri manuel. Le tri magnétique se fait si besoin. Après ce premier tri, les substrats doivent être ensuite broyés pour cela on utilise des moulins équipés de marteaux ou de couteaux.



II.2.2. Le pré-traitement humide :

Cette deuxième méthode consiste à extraire du substrat la matière organique soluble digestible grâce à un désintégrateur de matériaux, nommée encore pulpeur.

Le pulpeur est rempli d'eau et de déchets à traiter. Grâce à des hélices rapides, les cellules sont éclatées, on obtient une suspension dans laquelle les matières fermentescibles sont dissoutes. Les déchets lourds décantent au fond du pulpeur et sont évacués par un sas. Les déchets légers sont éliminés par flottation et extraits à l'aide d'un peigne hydraulique.

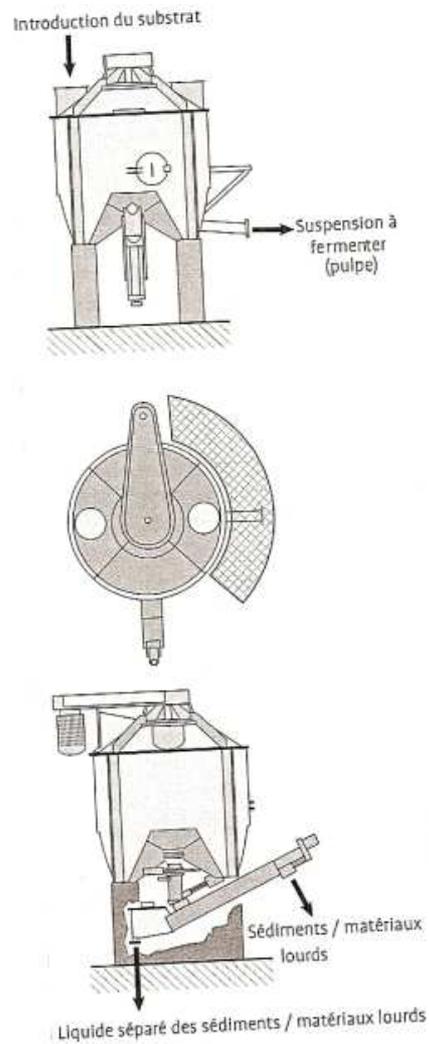


Figure 2 : Le biogaz. Procédés de fermentation méthanique

La **flottation** est une méthode de séparation basée sur les propriétés d'hydrophobie et d'hydrophilie des molécules d'un mélange.

Un composé est dit hydrophile ou polaire quand il est soluble dans l'eau. A l'inverse, un composé est dit hydrophobe ou lipophile quand il est soluble dans les corps gras, mais insoluble dans l'eau.

PSL 2009

L'inconvénient de cette méthode est sa forte demande énergétique pour son fonctionnement.

Après ces pré-traitements, il est possible d'introduire directement les déchets biodégradables dans le digesteur, lieu où se déroule la méthanisation, ou alors de les stocker dans une pré-fosse.

II.2.3. L'Hygiénisation :

L'Hygiénisation n'est pas réellement un pré-traitement ; cette étape peut se réaliser avant ou après la fermentation. Cependant, il est absolument nécessaire de la réaliser pour éliminer tous agents pathogènes potentiellement présents. Cette étape peut être réalisée de deux manières différentes : soit par un chauffage du substrat à 70°C pendant au moins 60min, soit dans de rares cas grâce à une stérilisation sous pression (133°C, 2 bar, 20 min).

Un **agent pathogène** est un germe ou une bactérie susceptible de provoquer des troubles chez un hôte c'est à dire provoquer une maladie.

II.3. Les différents digesteurs : lieu de la fermentation anaérobie

Le digesteur est une sorte de « boîte noire » dans laquelle la génération de méthane a lieu dans un processus microbien complexe se déroulant en plusieurs étapes. Dans ce processus, des groupes de bactéries très différentes sont actifs et en étroite interaction. Pour que le procédé de méthanisation fonctionne bien, il est important de connaître la cinétique des bactéries. Il est de plus, important de contrôler et réguler les différents paramètres physico-chimiques tels que la température, le pH et la composition des substances nutritives. Le biogaz est un produit métabolique des bactéries méthanogènes, il est généré lors de la décomposition d'une masse organique en l'absence d'air (anaérobie). Nous verrons les mécanismes de la fermentation anaérobie dans une partie ultérieure.

Le processus de fermentation anaérobie appelé méthanisation, se déroule en une ou deux étapes dans un digesteur, encore nommé méthaniseur ou bioréacteur. Il existe principalement deux types de digesteurs :

- digesteur infiniment mélangé
- réacteur à écoulement piston

Les différents digesteurs sont choisis en fonction de la teneur en matière sèche du substrat à valoriser.

II.3.1 Digesteur infiniment mélangés

Les digesteurs infiniment mélangés sont équipés uniquement d'un ou plusieurs mélangeurs et le cas échéant d'un chauffage. Les mélangeurs permettent d'homogénéiser le substrat, d'éviter la formation de croûtes flottantes, d'associer les micro-organismes et leur nourriture et d'empêcher le gaz de s'échapper. A cet effet, on dispose de différentes techniques de brassage :

- les agitateurs à moteur immergé

PSL 2009

- les agitateurs à palmes ou à pales
- les mélangeurs à montage central
- les réacteurs « contact »

Voici un tableau récapitulatif des avantages et inconvénients des différents digesteurs infiniment mélangés :

	Aspect technique	Consommation en énergie	Coût d'installation	Formation de croûtes flottantes	Rotation
Agitateur à moteur immergé	Agitateur placé à la surface du substrat	importante	faible	oui	rapide
Agitateur à palmes ou à pâles	Agitateur placé à la surface du substrat	faible	–	non	lente
Mélangeur à montage central	Mélangeur possède deux pâles, l'une en haut, l'autre en bas	–	élevé	non	Lente
Réacteur contact	Le contenu du digesteur est aspiré par une pompe extérieur et réinjecté à nouveau dans le système en circulation	importante	faible	non	–

Figure 3 : avantages et inconvénients des différents digesteurs infiniment mélangés

D'après les observations faites sur le terrain, pour des co-substrats hétérogènes (par exemple du maïs et des déchets liquides), les limites de la technologie des digesteurs infiniment mélangés sont atteintes lorsque la matière sèche contenue dans le digesteur atteint les 15%. Si le substrat contient beaucoup de matériaux lourds qui favorisent la sédimentation, il n'est pas possible d'utiliser ce type de digesteur en raison de la faible teneur en matière sèche autorisée.

Cf. Annexe 1 - Schéma d'un mélangeur à montage central dans un digesteur infiniment mélangé

II.3.2. Réacteur à écoulement piston

Les réacteurs à écoulement piston sont des digesteurs cylindriques horizontaux. Le substrat est introduit d'un côté, se déplace lentement vers la sortie tout en se décomposant. Contrairement au digesteur infiniment mélangé, le temps de rétention est plus long, par conséquent les taux de dégradation de la matière et de rendement en gaz sont plus élevés. De plus, ce procédé est intéressant car il est possible de réaliser l'hygiénisation en un seul processus. Ce procédé convient à des substrats riches en matière sèche.

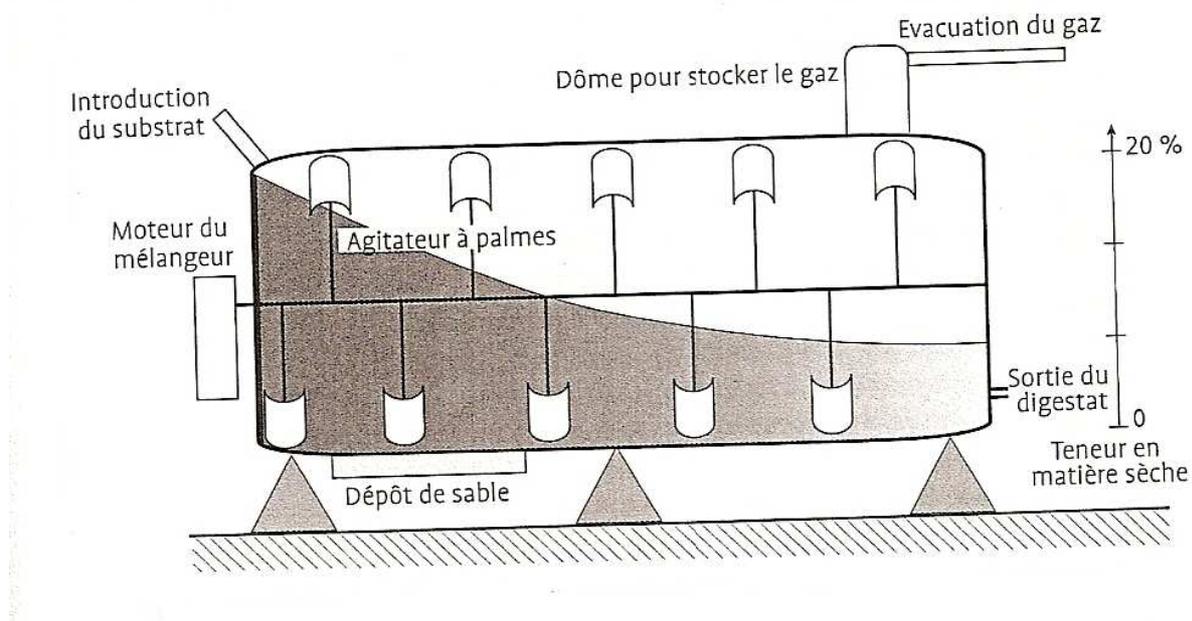


Figure 4 : Le biogaz. Procédés de fermentation méthanique

II.3.3 Récupération du gaz

La quantité de biogaz produit connaît de forte fluctuation. Les réservoirs à gaz sont donc conçus pour pouvoir faire face à ces fluctuations. En aucun cas de l'air doit pouvoir y pénétrer. Les réservoirs à gaz sont généralement installés au dessus du digesteur et sont composés d'une ou deux membranes en plastique souple. Les matériaux des membranes sont du tissu polyester recouvert de PVC (PolyChlorure de Vinyle) sur les deux faces. Ils sont résistants aux rayons Ultra-violet UV et aux phénomènes climatiques, ainsi qu'aux attaques microbiennes.

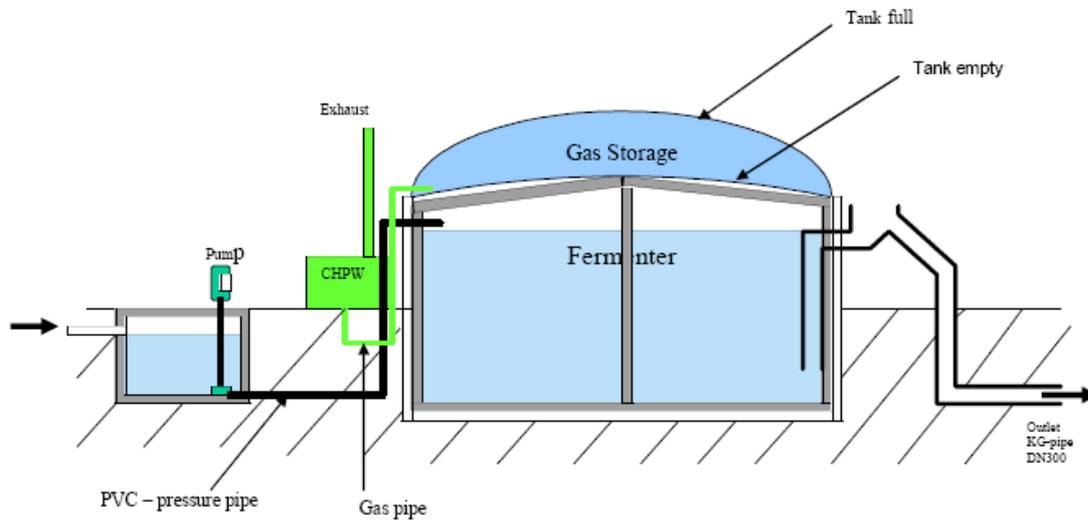


Figure 5 : schéma d'installation de récupération du gaz

Source : www.biogasmx.fr

II.4. Purification et valorisation du biogaz

Le biogaz sortant du digesteur peut directement servir à certaines utilisations. Cependant, nous nous intéressons ici seulement à l'utilisation du biogaz en tant que carburant pour le transport. Pour ce type d'emploi, il est nécessaire de purifier et valoriser ce gaz. Pour cela, les traitements à effectuer sont les suivants :

- pré-filtration
- désulfuration,
- élimination du CO₂.

II.4.1. Désulfuration

La fermentation génère un biogaz qui contient beaucoup de soufre et d'eau. Au dessus du liquide, c'est de l'acide sulfhydrique (H₂S) qui est essentiellement produit dans le digesteur. C'est un acide très toxique qui est à l'origine de nuisances olfactives, même en petite quantité. Lorsque l'on brûle de l'acide sulfhydrique H₂S dans un moteur, cela produit du dioxyde de soufre SO₂, lequel en présence d'eau, forme de l'acide sulfureux H₂SO₃ et de l'acide sulfurique H₂SO₄. Ceci provoque la corrosion dans les tuyauteries, sur les armatures et bien sûr dans les moteurs. Ainsi, il est absolument nécessaire de purifier le biogaz.

Les procédés actuellement les plus utilisés sont les procédés de désulfuration biologique ainsi que l'absorption avec des oxydes de fer.

● Désulfuration biologique

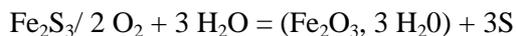
Pour procéder à la désulfuration biologique il faut ajouter 3 à 8% d'air (par rapport à la production quotidienne de biogaz) pour que le soufre se dépose. Les thiobactéries oxydent l'hydrogène sulfuré (H₂S) grâce à l'oxygène de l'air en soufre élémentaire. L'activité de ces bactéries dépend seulement de la concentration en oxygène. Le soufre élémentaire se retrouve ensuite dans le liquide (le digestat), et non plus le gaz. Ce procédé est peu coûteux et peut avoir une efficacité de 95%.

● Absorption par les oxydes de fer

Pour désulfurer le biogaz, il est possible d'utiliser des boues provenant d'installations d'assainissement où elles sont des déchets et contiennent beaucoup de fer. Il faut alors injecter ces boues au procédé ce qui provoque la création de la liaison de l'H₂S à l'atome de fer suivant la réaction suivante :



Cependant ce procédé présente un inconvénient. Un phénomène de régénération peut se produire, ce qui présente un danger d'auto-chauffage :



Bien que ce procédé soit onéreux; il est particulièrement intéressant pour la purification de gaz dont les concentrations en H₂S sont élevées. Après que le gaz soit purifié, il est impératif de le sécher. Pour rendre l'eau liquide, il est possible de simplement refroidir le gaz.

II.4.2. Séparation du CO₂

L'élimination du CO₂ est aussi appelée enrichissement en méthane. Il existe différentes méthodes, cependant nous retiendrons la plus efficace qui est l'adsorption sous pression alternante. C'est un procédé à sec, sans eau, il est donc nécessaire d'effectuer une déshumidification auparavant.

Le biogaz passe dans un compresseur pour être envoyé vers un absorbeur avec une pression de 8 à 10 bars. Le CO₂ y est alors absorbé par des charbons actifs ou par des tamis moléculaires de carbone. Il est possible d'atteindre des concentrations de plus de 96% de gaz pur par cette méthode.

II.4.3. Stockage et distribution du biogaz

Pour le stockage, les réservoirs sont sous pression. Ils possèdent généralement de grandes capacités. (Stockage à environ 300 bar destiné à alimenter des réservoirs de véhicules à 200 bar).

Sous 300 bar, le stockage de 1000 m³ de biogaz nécessite un volume de 3.000 litres de réservoirs (« capacité en eau ») sous pression, soumis à la législation sur les installations classées.

Les moteurs des véhicules sont soit des moteurs à essence soit des moteurs diesel. Dans le cas des moteurs à essence, l'allumage doit être particulièrement soigné, compte tenu de l'inflammation difficile du méthane. Pour les moteurs diesel, il est souvent réalisé avec des moteurs bicom bustibles, soit fioul, soit biogaz et fioul.

III. Quels processus biologique se déroulent dans les méthaniseurs ?

Les installations de biogaz ont pour but de générer un gaz qui contient essentiellement du méthane. Cette production de biogaz est le résultat de la méthanisation qui résulte de la décomposition de matière organique en biogaz par des micro-organismes dans des conditions anaérobies.

La fermentation anaérobie est l'un des processus qui contribue à la dégradation des matières organiques mortes en éléments simples gazeux et minéraux. L'un des processus anaérobies est la fermentation qui aboutit à la formation de « biogaz », un gaz combustible. La fermentation est le résultat de l'activité microbienne complexe qui se déroule en deux étapes essentiellement :

- Le substrat organique spécifique qui est constitué essentiellement de protéines, d'hydrates de carbone et de lipides est décomposé par hydrolyse. Il s'agit d'une liquéfaction ou d'une gazéification avec transformation des molécules en acides gras, en sels ou même en gaz.
- La deuxième étant la transformation de ses acides, sels ou gaz en méthane et autres gaz.

III.1. Fonctionnement biochimique d'un méthaniseur par digestion anaérobie

Lors de ce processus, le substrat organique spécifique qui est constitué essentiellement de protéines, d'hydrates de carbone et de lipides est dans un premier temps, décomposé par hydrolyse en acides aminés, sucres et acides gras.

Ces produits intermédiaires sont ensuite transformés en acides organiques, comme par exemple l'acide propionique, l'acide butyrique, les alcools, l'hydrogène, le dioxyde de carbone et l'eau.

A partir de ces produits, on obtient grâce à d'autres transformations biochimiques, de l'acétate et de l'hydrogène. L'acétate est ensuite directement transformé en méthane par des organismes méthanogènes. On obtient ainsi environ 70% de méthane. Les 30% restants sont formés d'hydrogènes et de CO₂.

Quel que soit le lieu, les étapes de fermentation anaérobie dont résulte le biogaz sont au nombre de quatre mais il existe une « pré-étape », la désagrégation.

III.1.1. La désagrégation

La toute première étape, la désagrégation est en étape physico-chimique principalement non biologique. Les particules composites du substrat sont décomposées en particules inertes qui sont des particules de composés carbonés, des lipides et des protéines.

Les déchets de cette réaction sont des particules inertes qui ne sont donc pas biodégradables et donc non traitables par la digestion anaérobie.

III.1.2. L'hydrolyse

L'étape d'hydrolyse est une étape enzymatique extracellulaire dans laquelle les macromolécules issues de l'étape de désagrégation sont réduites en monomères de la façon suivante :

- Les polysaccharides sont transformés en monosaccharides
- Les lipides sont transformés en longues chaînes d'acides gras
- Les protéines sont transformées en acides aminés
- Les acides nucléiques sont transformés en bases azotées

III.1.3. L'acidogénèse

Lors de cette étape, les produits de l'hydrolyse sont absorbés par les bactéries fermentaires qui métabolisent les monomères pour produire des acides gras volatils (AVG) (acétate, propionate, butyrate, isobutyrate, valérate et isovalérate), des alcools, du sulfure de dihydrogène (H₂S), responsable de l'odeur, caractéristiques des méthaniseurs, du dioxyde de carbone (CO₂), et de l'hydrogène (H₂). Ainsi, on obtient des produits fermentés simplifiés. Cette étape est très rapide et les bactéries y participant ont un temps de duplication très court par rapport aux autres étapes et un taux de duplication plus important par rapport à celui des autres populations de bactéries. Ainsi, il peut y avoir une accumulation de ces produits intermédiaires de digestion anaérobies qui peut déstabiliser et arrêter les autres étapes à cause du pouvoir inhibiteur d'une trop grande concentration de ces éléments.

III.1.4. L'acétogénèse

Lors de cette étape, les produits issus de l'acidogénèse sont transformés par les bactéries acétogènes en acétate, en dioxyde de carbone, et en hydrogène. Le temps de déroulement de ces bactéries est beaucoup plus long que ceux de l'acidogénèse

III.1.5. La méthanogénèse

Lors de cette étape, les produits des réactions précédents, principalement l'acétate, le formate, le dioxyde de carbone et l'hydrogène, sont convertis en méthane par les bactéries dites méthanogènes. Leur temps de dédoublement est un peu plus rapide que les populations de bactéries acétogènes.

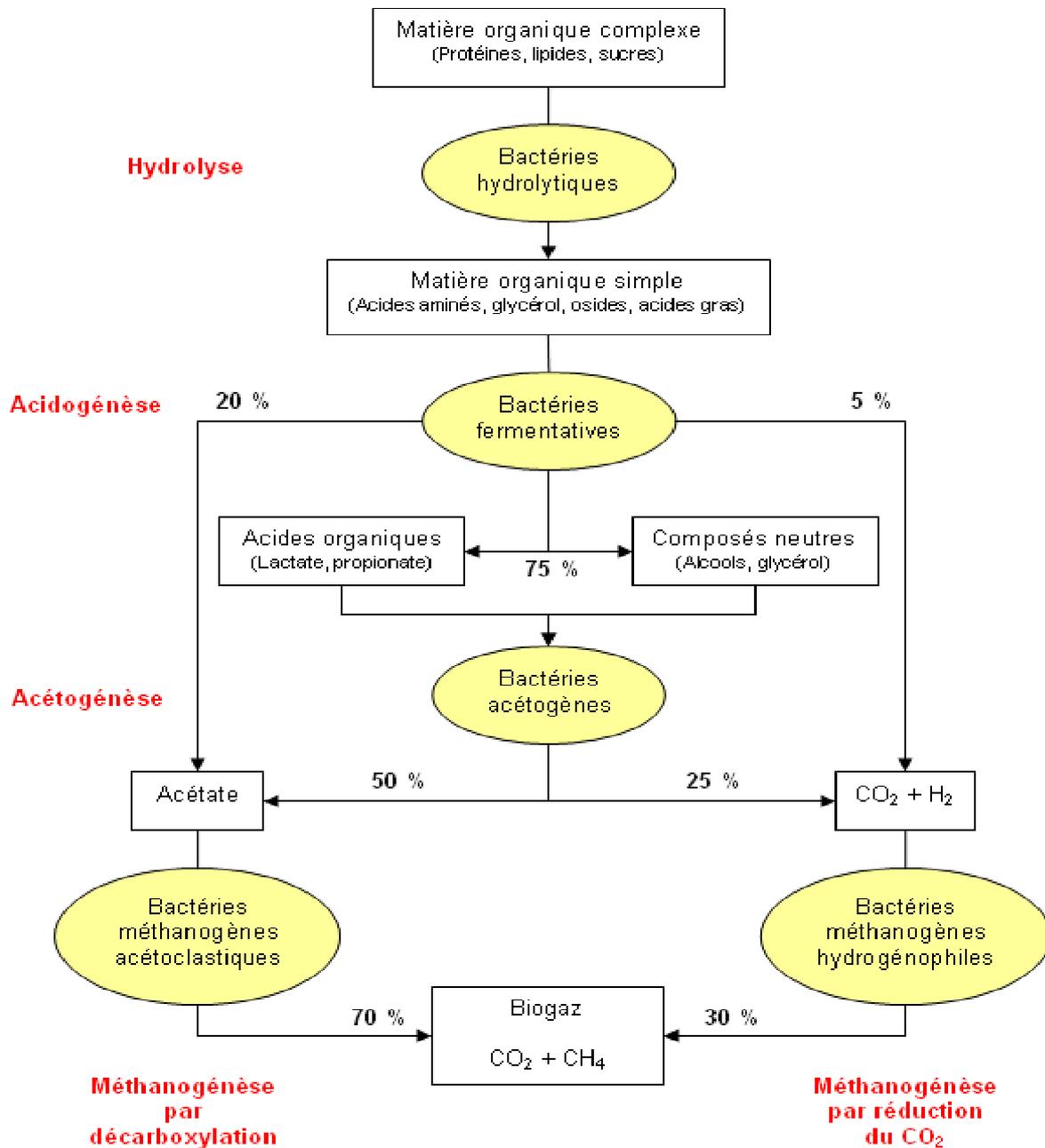


Figure 6 : les différentes étapes de la digestion anaérobie et les flux de carbones associés (en % de DCO)

Source : <http://www.methanisation.info/methanisation.html>

III.2. Les bactéries de la méthanisation

Chacune de ces quatre étapes fait intervenir différentes population microbiennes qui se développent dans des milieux de culture spécifiques.

Les micro-organismes de chacune de ces étapes vivent souvent en symbiose dans un environnement proche et forme un genre d'agrégats (floc)

Quand la matière organique est plus difficile à digérer par les micro-organismes par exemple quand elle contient beaucoup de cellulose, la première étape détermine la durée du processus de méthanisation.

Au contraire, les matières organiques faciles à digérer, telles que les céréales ou les corps gras, sont rapidement hydrolysées et les produits obtenus sont immédiatement transformés en acides organiques.

Quoiqu'il en soit, les responsables de ce processus naturel sont les bactéries méthanogènes et sont strictement anaérobies.

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

Les voies métaboliques simplifiées, décrivant le processus de cette transformation, ont été exposées dans un modèle, aujourd'hui largement accepté. Le modèle fait intervenir plusieurs types de micro-organismes classés dans trois phases distinctes :

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

Ces trois communautés doivent constituer un écosystème équilibré pour que l'essentiel des équivalents réducteurs produits comme déchets au cours de l'anabolisme bactérien se retrouve finalement dans le méthane.

III.2.1. Les bactéries hydrolytiques et fermentatives

L'étape d'hydrolyse est réalisée par plusieurs groupes d'eubactéries anaérobies strictes et facultatives dont la nature dépend de la composition qualitative et quantitative de l'alimentation. Les principales espèces appartiennent aux genres Clostridium, Bacillus, Ruminococcus, Enterobacteroides, Propionibacterium et Butivibrio. Les micro-organismes acidogènes ont des temps de génération beaucoup plus court que les méthanogènes.

Micro-organismes	Temps de génération (en jours)
Organismes acidogènes	
Bactérioides	>1
Clostridies	1,5
Bactéries acétogènes	3,5
Bactéries méthanogènes	
Methanosarcina	5-15
Methanococcus	Env. 10

Tableau 2 : temps de génération de différents micro-organismes

III.2.2. Les bactéries acétogènes

Au cours de cette étape, l'oxydation des substrats (surtout les acides propionique et butyrique et l'éthanol) est couplée à la formation d'hydrogène, de dioxyde de carbone et d'acétate. Elle représente l'activité de trois groupes de bactéries :

- Les homoacétogènes des genres Clostridium, Acetobacterium, Sporomusa, Acetogenium,...
- Les syntrophes des genres Syntrophobacter, Syntrophomonas, Syntrophus...
- Les sulfato-réductrices des genres Desulfovibrio, Desulfobacter, Desulfotomaculum, Desulfomonas...

Il est important de noter que, lorsque la pression partielle en hydrogène s'élève, cette oxydation est thermodynamiquement impossible (réaction endergonique). Par conséquent, la croissance de la flore acétogène et l'utilisation du substrat dépendent strictement de l'élimination de l'hydrogène du milieu par les microorganismes méthaniques voire les bactéries sulfato-réductrices (en présence de sulfate). Cette association syntrophique avec des bactéries méthanogènes hydrogénophiles permet de rendre les réactions endergoniques possibles. L'oxydation des substrats est seulement possible à des pressions partielles en hydrogène faibles, de l'ordre de 10⁻⁴ atm.

On distingue 2 groupes de bactéries qui participent à cette étape :

Les premières sont les bactéries productrices obligées d'hydrogène qui produisent de l'acétate, de l'hydrogène et du gaz carbonique à partir des produits de l'acidogénèse. Leur fonctionnement est défavorable d'un point de vue thermodynamique (consommation d'énergie) avec une pression d'hydrogène trop importante. Ainsi l'accumulation d'hydrogène peut conduire à l'arrêt de l'acétogénèse, ce qui implique que ce groupe de bactérie doit être associé à un groupe consommateur d'hydrogène.

PSL 2009

Voici les réactions chimiques mises en jeu lors de la dégradation :

- De l'éthanol: $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{COO}^- + 2\text{H}_2 + \text{H}^+$
- Du propionate: $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{COO}^- + 3\text{H}_2 + \text{CO}_2$
- Du butyrate: $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2\text{CH}_3\text{COO}^- + 2\text{H}_2 + \text{H}^+$

Les secondes produisent principalement de l'acétate à partir de l'hydrogène et du dioxyde de carbone comme le montre la réaction chimique suivante.



III.2.3. Les bactéries méthanogènes

Les bactéries actives de cette dernière étape sont réunies dans un groupe qui leur est propre, celui des Archae. Elles possèdent, en effet, des caractéristiques spécifiques par rapports aux eubactéries et aux eucaryotes, notamment en ce qui concerne leurs coenzymes. Les Archae constituent un des trois statuts de règne primaire, avec les eubactéries et les eucaryotes.

Deux familles principales de bactéries méthanogènes existent :

La première population comprend les méthanogènes hydrogénophiles qui produisent du méthane à partir d'hydrogène :

- et de dioxyde de carbone : $4\text{H}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$
- et de formate : $\text{HCOO}^- + \text{H}^+ + 3\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

La deuxième population comprend les méthanogènes acétoclastes qui produisent le méthane à partir d'acide acétique, de méthanol et de méthylamine. On rencontre principalement deux types de bactéries méthanogènes acétoclastes dans les digesteurs anaérobies, les premières utilisent uniquement l'acétate pour produire le méthane alors que les secondes peuvent utiliser l'acétate, le dioxyde de carbone, l'hydrogène, le méthanol, et les méthylamines comme substrat pour produire le méthane.

La réaction suivante montre la conversion de l'acétate en méthane et en dioxyde de carbone :

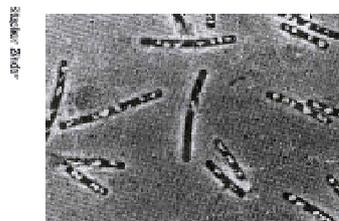


Figure 7 : bactéries du genre Méthobactérium

Source : <http://biogaz.free.fr/index.html>

III.2.4. Les bactéries sulfato-réductrices

Cependant, en marge de la digestion anaérobie, conduisant à la production de méthane, il existe une autre population de bactérie présente dans les digesteurs anaérobies. Cette population bactérienne réduit différents types de molécules sulfatées, le sulfate (SO_4^{2-}), le sulfite (SO_3^-), et le thiosulfate en sulfure (S_2). Cette population bactérienne sulfato-réductrice intervient au stade terminal de la dégradation anaérobie, tout comme les méthanogènes. L'acide sulfurique (H_2S) produit par cette réaction possède un effet inhibiteur sur les méthanogènes, soit de manière directe, soit en faisant précipiter les métaux essentiels nécessaires à la méthanogénèse.

Deux comportements de bactéries sulfato-réductrices peuvent être identifiés :

Le premier groupe utilise le lactate afin d'oxyder en acétate et en dioxyde de carbone. Ce groupe peut en outre utiliser certains produits de la première étape de fermentation tels que l'éthanol, le fumarate, le malate, le pyruvate....

Le deuxième groupe utilise l'acétate, des acides gras à longues chaînes, certains composés aromatiques qu'il oxyde entièrement jusqu'à l'obtention de dioxyde de carbone.

III.3. Les facteurs physico-chimiques

Comme tout micro-organisme, la population bactérienne qui constitue le consortium méthanogène exige des conditions particulières pour sa croissance. Les principaux facteurs physico-chimiques qui affectent le procédé de digestion anaérobie sont le pH, la température et le potentiel d'oxydoréduction.

III.3.1. Le pH

Le pH optimum de la digestion anaérobie se situe autour de la neutralité. Il est le résultat du pH optimum de chaque population bactérienne : celui des bactéries acidifiantes se situe entre 5,5 et 6, les acétogènes préfèrent un pH proche de la neutralité tandis que les méthanogènes ont une activité maximale dans une gamme de pH comprise entre 6 et 8. Toutefois, la méthanisation peut se produire dans des milieux légèrement acides ou alcalins.

III.3.2. La température

L'activité du consortium méthanogène est étroitement liée à la température. Deux plages de températures optimales peuvent être définies : la zone mésophile (autour de 35°C) et la zone thermophile (entre $55-60^\circ\text{C}$) avec une décroissance de l'activité de part et d'autre de ces températures.

La majorité des espèces bactériennes a été isolée dans des environnements mésophiles, mais tous les groupes trophiques des étapes de digestion anaérobie possèdent des espèces thermophiles utilisant les mêmes voies métaboliques que les bactéries mésophiles avec des performances analogues. Il reste possible de travailler à des températures différentes des optima avec des performances plus faibles.

III.3.3. Le potentiel d'oxydoréduction

Ce paramètre représente l'état de réduction du système, il affecte l'activité des bactéries méthanogènes. Ces bactéries exigent en effet, outre l'absence d'oxygène, un potentiel d'oxydoréduction inférieur à 330 mV pour initier leur croissance.

PSL 2009

III.3.4. Les inhibiteurs

Le processus biologique qui se déroule dans le digesteur peut être inhibé par d'importantes concentrations de NH_4 ou en NH_3 .

De plus l'accumulation d'acides organiques peut avoir aussi une action inhibitrice sur le processus de génération du biogaz et peut même provoquer l'arrêt de la digestion anaérobie

Les métaux lourds, comme par exemple le cuivre et le zinc qui sont les additifs nutritionnels, ou encore les antibiotiques, peuvent également être inhibiteurs.

Il faut également prêter attention aux produits de désinfection des étables concernant les substances actives et les dosages.

III.4. Les besoins nutritionnels

Comme tout micro-organisme, chaque bactérie constituant la flore méthanogène demande un apport suffisant de macroéléments (C, N, P, S) et d'oligo-éléments pour sa croissance.

III.4.1. Macroéléments

Les besoins en macroéléments peuvent être évalués grossièrement à partir de la formule brute décrivant la composition d'une cellule ($\text{C}_5\text{H}_9\text{O}_3\text{N}$). Pour les bactéries méthanogènes, le milieu de culture doit avoir des teneurs en carbone (exprimée en DCO), en azote et en phosphore au minimum dans les proportions DCO/N/P égale à 400/7/1.

L'ammonium est leur principale source d'azote. Certaines espèces fixent l'azote moléculaire alors que d'autres ont besoins d'acides aminés. Les besoins en azote représentant 11 % de la masse sèche volatile de la biomasse et les besoins en phosphore 1/5 de ceux de l'azote.

Les bactéries méthanogènes possèdent de hautes teneurs en protéines Fe-S qui jouent un rôle important dans le système transporteur d'électrons et dans la synthèse de coenzymes. Aussi la concentration optimale de soufre varie-t-elle de 1 à 2 mM dans la cellule. Cette flore utilise généralement les formes réduites comme le sulfure d'hydrogène. Les méthanogènes assimilent le phosphore sous forme minérale.

III.4.2. Oligo-éléments

Certains oligo-éléments sont nécessaires à la croissance des méthanogènes. Il s'agit plus particulièrement du nickel, du fer et du cobalt. En effet, ce sont des constituants de coenzymes et de protéines impliquées dans leur métabolisme. Le magnésium est essentiel puisqu'il entre en jeu dans la réaction terminale de synthèse du méthane ainsi que le sodium apparaissant dans le processus chimio-osmotique de synthèse de l'ATP.

Il existe des facteurs de croissance stimulant l'activité de certains méthanogènes : acides gras, vitamines ainsi que des mélanges complexes comme l'extrait de levure ou la trypticase peptone.

Les micro-organismes actifs sont des bactéries anaérobies. Tous les corps organiques ne se décomposent pas de manière identique : les substances peu polymérisées comme les sucres, les amidons, se décomposent rapidement donnant des acides organiques. L'accumulation de ces acides dans le milieu peut entraîner sa stérilisation : aucune autre fermentation ne peut alors se produire. Par

PSL 2009

contre, les matières fortement polymérisées se décomposent assez lentement pour que les acides formés soient à leur tour décomposés en méthane au fur et à mesure de leur production. On peut alors obtenir du méthane en quantité importante et de façon continue.

La dégradation de la matière végétale s'effectue en plusieurs étapes. La première étape est une liquéfaction : la matière végétale se présente le plus souvent sous forme solide. Elle doit d'abord être « cassée » par les enzymes produites par les bactéries. Au cours de la deuxième phase, une première population de bactéries transforme la matière organique en acides. Ces acides serviront ultérieurement de nourriture à une deuxième population de bactéries, les bactéries méthanogènes. Enfin, dans la troisième phase, ces bactéries méthanogènes entrent en action et décomposent les acides présents dans le milieu en méthane et gaz carbonique

IV. Aspect réglementaire, économique et écologique du biogaz

IV.1. Aspect réglementaire

Le cadre juridique en France est inadapté à la production de biogaz contrairement à l'Allemagne ou d'autres pays d'Europe.

L'Allemagne possède une loi spécifique dite « loi biogaz » alors que le terme reste inconnu dans notre réglementation comme dans notre politique énergétique.

En Allemagne, la méthanisation constitue le point de départ d'une filière énergétique alors qu'en France, on a plutôt l'impression qu'il s'agit d'une filière de gestion des déchets, donc un échelon ultime.

La réglementation du biogaz en France n'est pas spécifique au biogaz. Il faut considérer la réglementation sur les apports de matières premières, sur la production de biogaz, sur les produits sortant, sur la fiscalité et le financement.

Cf. Annexe 2 – La réglementation du biogaz

IV.2. Aspect économique : les freins à la valorisation du biogaz

Pour la production de carburant, la valorisation présente de grands avantages mais la distance à parcourir pour que les véhicules viennent s'approvisionner pose problème. D'autre part les surcoûts de l'épuration nécessaire et ceux de l'adaptation des véhicules restent encore élevés.

IV.3. Aspect écologique

La construction et l'exploitation d'une installation de production de biogaz sont intéressantes sur le plan écologique.

Nous ne disposerons pas toujours des énergies fossiles telles que le gaz naturel, le pétrole et le charbon. De plus leur combustion rejette des émissions dommageables pour l'environnement, comme le CO₂.

PSL 2009

La production d'électricité et de chaleur grâce au biogaz permet de contribuer à la protection de l'environnement. En effet, le CO₂ qui est émis lors de la production de biogaz ne s'ajoute pas aux émissions déjà existantes.

La combustion des carburants fossiles (essence, diesel, kérosène, gaz,...) disperse chaque année plus de 3 milliards de tonnes de CO₂ dans l'atmosphère. L'utilisation du biogaz comme carburant (biométhane) permet de supprimer les rejets de fumées dans l'atmosphère et de réduire considérablement la pollution sonore. Avec le biométhane, les composés les plus nuisibles pour l'environnement (particules, hydrocarbures non méthaniques) sont absents. Par exemple, le fait d'utiliser du biométhane pour alimenter des bus entraîne une réduction de 95 % des particules émises, 99 % de composés soufrés et 70 % des oxydes d'azote par rapport au bus diesel.

Le biogaz permet de diminuer la charge en carbone des déchets végétaux. Une fois digérés, les déchets sont moins nocifs pour l'environnement, le risque d'une pollution organique est diminué.

De plus la fermentation diminue le pourcentage de matière sèche ce qui permet de diminuer l'épandage de cette matière.

De plus l'utilisation de biométhane carburant présente un carbone positif, en comparaison avec la production de Gaz Naturel pour Véhicule (GNV). Le biométhane peut être considéré comme une énergie renouvelable car ce n'est pas un combustible fossile.

IV.4. Des projets mis en place : quelques exemples

IV.4.1. Biogasmax

Biogasmax est un projet européen du 6^e programme Cadre de Recherche et Développement. Ce programme fait partie des initiatives de l'Europe pour réduire sa dépendance aux carburants fossiles.

Partant d'expériences existantes en Europe, il montre des techniques et des réalisations prouvant l'intérêt de l'utilisation du biogaz comme carburant pour le transport terrestre.

Le projet européen Biogasmax met en réseau, sur l'ensemble du territoire européen, les différentes expérimentations liées au biométhane afin de partager les expériences et mettre en place des pratiques d'excellence pour la gestion des transports urbains.

Le projet intégré Biogasmax a pour objectif d'agir sur les problèmes urbains associés à la pollution de l'air, de l'eau et la gestion des déchets. L'idée est donc de rentrer dans le cycle vertueux qui consiste à produire du biogaz à partir de différents déchets que les villes doivent, quoi qu'il en soit, gérer.

Lors de ce processus, Biogasmax s'engage à maîtriser les impacts économiques et écologiques afin de produire du carburant pour les transports sans dommage pour l'environnement.

PSL 2009

Les activités de recherche et de développement proposées dans le cadre du projet Biogasmax sont étroitement liées aux quatre principaux domaines d'activités techniques suivants :

- Production de biogaz à partir de différents types de déchets;
- Concentration du biogaz pour qu'il atteigne la qualité de carburant (biométhane);
- Distribution pour le transport et injection dans les réseaux de gaz naturel;
- Utilisation dans les véhicules pour augmenter le nombre de véhicules roulant au biométhane.

Biogasmax regroupe comme villes : Lille (France), Stockholm et Göteborg (Suède), Rome (Italie), Berne (Suisse), Torun et Zielona Gora (Pologne).

Contenu des projets de démonstration

Contenu des projets de démonstration	Lille Métropole Communauté Urbaine (FR)	Stockholm (SE)	Göteborg (SE)	Rome (IT)	Torun et Zielona Gora (PL)
 Production	- Déchets organiques - Eaux usées	- Déchets des restaurants - Eaux usées	- Déchets municipaux - Substrats agricoles	- Décharge - Déchets organiques	- Eaux usées - Décharge - Agriculture
 Concentration	- Lavage à l'eau	- Lavage à l'eau - Adsorption par modulation de pression	- Distillation cryogénique - Absorption par solvant	- Lavage à l'eau	
 Distribution	- Stations-service pour approvisionnement direct - Intégration de dépôts - Injection dans le réseau de gaz naturel	- Caissons mobiles équipés de bouteilles de biométhane sous pression - Autoroute avec stations-service de biométhane	- Stations-service d'approvisionnement direct - Autoroute avec stations-service de biométhane - Injection dans le réseau de gaz naturel	- Stations-service - Cuves de stockage	
 Utilisation dans les véhicules	- Collecte des déchets - Véhicules de service - Bus	- Taxis et véhicules de livraison - Navettes d'aéroport - Réseau de conducteurs propres	- Réseau de conducteurs propres - Benne à ordures ménagères à moteur hybride (électrique-gaz)	- Benne à ordures ménagères	- Parcs automobiles municipaux - Véhicules de service

Figure 8 : Contenu des projets de démonstration

Source : www.biogasmax.fr

Le projet Biogasmax intègre 25 partenaires des secteurs public et privé en Europe, responsables de tâches spécifiques.

- 4 pays participent à des projets qui démontrent la pertinence technique et économique de la production de biogaz à partir de déchets urbains : France, Italie, Pologne et Suède.
- 4 partenaires ont des objectifs chiffrés inclus dans le projet Biogasmax : Göteborg, Lille, Rome et Stockholm.

PSL 2009

- 4 partenaires ont des responsabilités transversales au projet :
 - ✓ LMCU (France) : gestion du projet et de la communication,
 - ✓ ISET (Allemagne) : technologies de pointe pour la valorisation du biogaz,
 - ✓ Université de Stuttgart (Allemagne) : évaluation du projet Biogasmax,
 - ✓ ENGVA (Pays-Bas) : transfert des connaissances.

Objectifs chiffrés

	Lille (FR)	Göteborg (SE)	Stockholm (SE)	Rome (IT)
Production	<ul style="list-style-type: none"> - Centre de valorisation organique : production de 7,3 millions Nm³/an de biogaz brut. - Rénovation d'une centrale pilote pour produire 3,6 à 4 millions de Nm³/an de biogaz brut, dont au moins 0,28 million sera transformé en biométhane (pour 10 bus). 		<ul style="list-style-type: none"> - Expérimentation de la possibilité d'augmenter la production de biogaz d'au moins 10 % dans l'unité existante. 	<ul style="list-style-type: none"> - Une nouvelle unité de méthanisation sera ajoutée à la centrale de compost existant à Maccarese pour produire 10 millions de Nm³ de biogaz brut.
Valorisation	<ul style="list-style-type: none"> - Quantité : 4,38 millions de Nm³/an - Qualité : 10 kWh/Nm³ 	<ul style="list-style-type: none"> - Quantité : 6,5 millions de Nm³/an - Qualité : 11 kWh/Nm³ 		<ul style="list-style-type: none"> (estimations sujettes à l'étude de faisabilité) - Quantité : 1,8 million de Nm³/an - Qualité : 9,1 kWh/Nm³
Distribution	<ul style="list-style-type: none"> - Centre de valorisation organique : stockage dans deux cuves horizontales pour un ravitaillement optimal de 100 bus. - Mise au point d'un modèle d'injection dans le réseau de gaz. 	<ul style="list-style-type: none"> - Expérimentation de 9 stations-service avec une capacité totale de 1,5 million Nm³/an de biométhane. - Expérimentation d'une injection de 35 GWh/an dans le réseau de gaz naturel. 	<ul style="list-style-type: none"> - Construction de 3 stations-service avec une capacité totale de 0,5 million Nm³ de biométhane. - Construction d'une station-service à Rinkaby pour l'approvisionnement en carburant de la zone du lac Mälaren. 	<ul style="list-style-type: none"> - Construction d'une station de ravitaillement/cuve de stockage (sujette à l'étude de faisabilité).
Utilisation dans les véhicules	<ul style="list-style-type: none"> - Expérimentation et utilisation de 30 utilitaires légers au bio méthane dans le parc automobile (voitures de service utilisées par les employés). - Expérimentation et utilisation de 10 bennes à ordures ménagères au biométhane. 	<ul style="list-style-type: none"> - Campagnes d'incitation pour la promotion de 100 utilitaires légers au biométhane (voitures d'entreprise utilisées par les employés). 	<ul style="list-style-type: none"> - Expérimentation et utilisation de 25 poids lourds et 80 utilitaires légers roulant au biométhane. - Accueil de plus de 10 sociétés dans le réseau de conducteurs propres. 	<ul style="list-style-type: none"> - Expérimentation et utilisation de 55 poids lourds au biométhane.

Figure 9 : Objectifs chiffrés

Source : www.biogasmax.fr

IV.4.2. Veolia propreté

Veolia propreté Ile-de-France lance un projet de valorisation de biogaz en biométhane carburant sur son installation de stockage de déchets non-dangereux de Claye-Souilly (77) en collaboration avec le Centre de Recherche de la Propreté et de l'Énergie (CRPE) de Veolia environnement.

Cette installation d'unité de production de biométhane carburant permettra d'alimenter 210 véhicules en biométhane carburant.

Ce nouveau procédé produira 60 Nm³/h de biométhane carburant à partir de 200 Nm³/h de biogaz capté sur l'installation de stockage de déchets. (Ceci représente l'équivalent des besoins énergétiques pour 210 véhicules)

Sur le plan environnemental, l'utilisation du biométhane présente un bilan carbone positif en comparaison avec la production de Gaz Naturel pour Véhicule (GNV).

PSL 2009

V. Gestion de Projet

Pour réaliser ce rapport, nous nous sommes organisées autour d'une gestion de projet.

V.1. Limitation et faisabilité du projet

Le sujet du projet est précis et compris : Etude de la transformation des résidus organiques en pétrole par fermentation bactérienne anaérobie.

Ce sujet est tout à fait faisable, en effet c'est un thème d'actualité. Nous sommes de plus tout fait former pour réaliser ce type de projet.

V.2. Equipe de projet/ répartition des tâches/ acteurs extérieurs

L'équipe de projet est constituée trois personnes : Sarah Boyer, Diane Labrunie, Elodie Segard.

Elodie s'est occupée particulièrement de la première et de la quatrième partie. Tandis que Diane s'est intéressée à la seconde partie et Sarah la troisième.

Nous sommes aidées et encadrées par notre tuteur pédagogique, Mr ROUBERTY. Des réunions sont organisées tout au long de la réalisation du projet.

V.3. Objectifs du projet

Produire un document de qualité d'environ trente pages, hors annexes, ainsi qu'un poster synthétisant le sujet.

V.4. Les ressources

Nous sommes amenées à consulter beaucoup de documents via soit internet soit la bibliothèque universitaire.

V.5. Intervalle de temps de réalisation

Début du projet : 13/10/08

Rendu du projet : 30/01/09

V.6. Planification prévisionnel

Cf. Annexe 3 - Planning prévisionnel

Conclusion

Nous avons pu voir que la fabrication de biogaz carburant peut provenir de différents déchets organiques. Une fois ces déchets traités, ils doivent passer par différentes transformation et différents procédés afin d'avoir du biogaz carburant.

La récupération et la valorisation de ce biogaz permettrait de se substituer à l'énergie fossile, de réduire nos déchets organiques, de réduire leur impact sur l'effet de serre.

Depuis quelques années, on assiste à la valorisation du biogaz, qui n'était jusqu'alors considéré que comme un sous-produit du traitement des déchets.

Mais aujourd'hui, le biogaz apparaît comme une solution énergétique d'avenir rentable, qui concerne aussi bien ceux qui produisent des déchets organiques (agriculteurs, industries agro-alimentaires, papetières ou chimiques, collectivités, exploitants de décharges ou de stations d'épuration...) que les particuliers.

Cependant le coût des installations reste encore élevé, de ce fait ce procédé met du temps à se développer. Mais à l'avenir l'utilisation du biogaz s'accompagnera d'avantages économiques.

L'utilisation du biogaz est déjà bien développée en Allemagne, en Autriche, aux Pays-Bas, en Suède et en Suisse.

Bibliographie

Livres :

- 📖 La production de biogaz – Uwe Gorich/ markus Helm – Ulmer – 2006
- 📖 Le biogaz. Procédés de fermentation méthanique – Bertrand de la Farge – Masson – Ingénierie de l'environnement – 1995

Liens internet :

- 🔗 <http://www.biogasmax.fr/>
- 🔗 http://www.biogasmax.fr/media/these_potential_biogas_040742900_1518_05102007.pdf
- 🔗 http://www.biogasmax.fr/media/nsca_biogas_as_a_road_transport_084926300_1011_24042007.pdf
- 🔗 http://www.biogasmax.fr/media/2_biogas_production_utilisation_068966400_1207_19042007.pdf
- 🔗 www.ademe.fr
- 🔗 <http://www.econologie.com/biomasse-et-petrole-de-synthese-travaux-de-laigret-articles-3810.html>
- 🔗 <http://www.econologie.com/projet-laigret-faire-du-petrole-vert-biologique-nouvelle-3917.html>
- 🔗 <http://quanthomme.free.fr/qhsuite/LaigretJeanPetroleFermentation.htm>
- 🔗 <http://biogaz.atee.fr/pdfs/Recueil.pdf>
- 🔗 <http://www.lebiogaz.info/>
- 🔗 <http://www.bio-environnement.com/techniques/methanisation-industrie.php>
- 🔗 <http://www.methanisation.info/methanisation.html>
- 🔗 <http://biogaz.free.fr/index.html>

Résumé

Le traitement des déchets organiques est une réelle préoccupation des sociétés industrielles actuelles. Leur élimination passe encore presque systématiquement par l'incinération, l'enfouissement ou l'épandage sur des terres agricoles.

Dans un souci de développement durable, il est indispensable de recourir aux énergies renouvelables. La méthanisation représente une solution envisageable pour le recyclage de ces déchets, tant à un niveau individuel que collectif. Les installations de méthanisation déjà en fonctionnement en France et en Europe prouvent l'efficacité de cette technique.

Celle-ci résulte en la formation d'un gaz combustible appelé biogaz. Ce processus est la fermentation biologique anaérobie de matières fermentescibles. Il est ainsi fabriqué dans des digesteurs lieu de la fermentation anaérobie.

La valorisation de ce biogaz peut servir à différentes utilisations. Ce dossier sera ciblé sur la production de biocarburant, énergie alternative au pétrole.

Le coût des installations reste encore élevé, de ce fait ce procédé met du temps à se développer. Mais à l'avenir l'utilisation du biogaz s'accompagnera d'avantages économiques.

Abstract

The treatment of organic wastes is a real concern of current industrial societies. They are eliminated almost systematically by incineration, burial or spreading on agricultural land.

In the interest of sustainable development, it is essential to resort to renewable energy sources. Methanisation process represents a possible solution for recycling of these wastes, both on an individual level and collective.

That is result in the formation of fuel gas called "biogas". This process is the fermentation anaerobic biological materials fermentable. It is produced in digester plants place of the anaerobic fermentation.

The cost of facilities remains high, that's why this process involves time to develop. But in the future, the use of biogas will go with economic benefits.

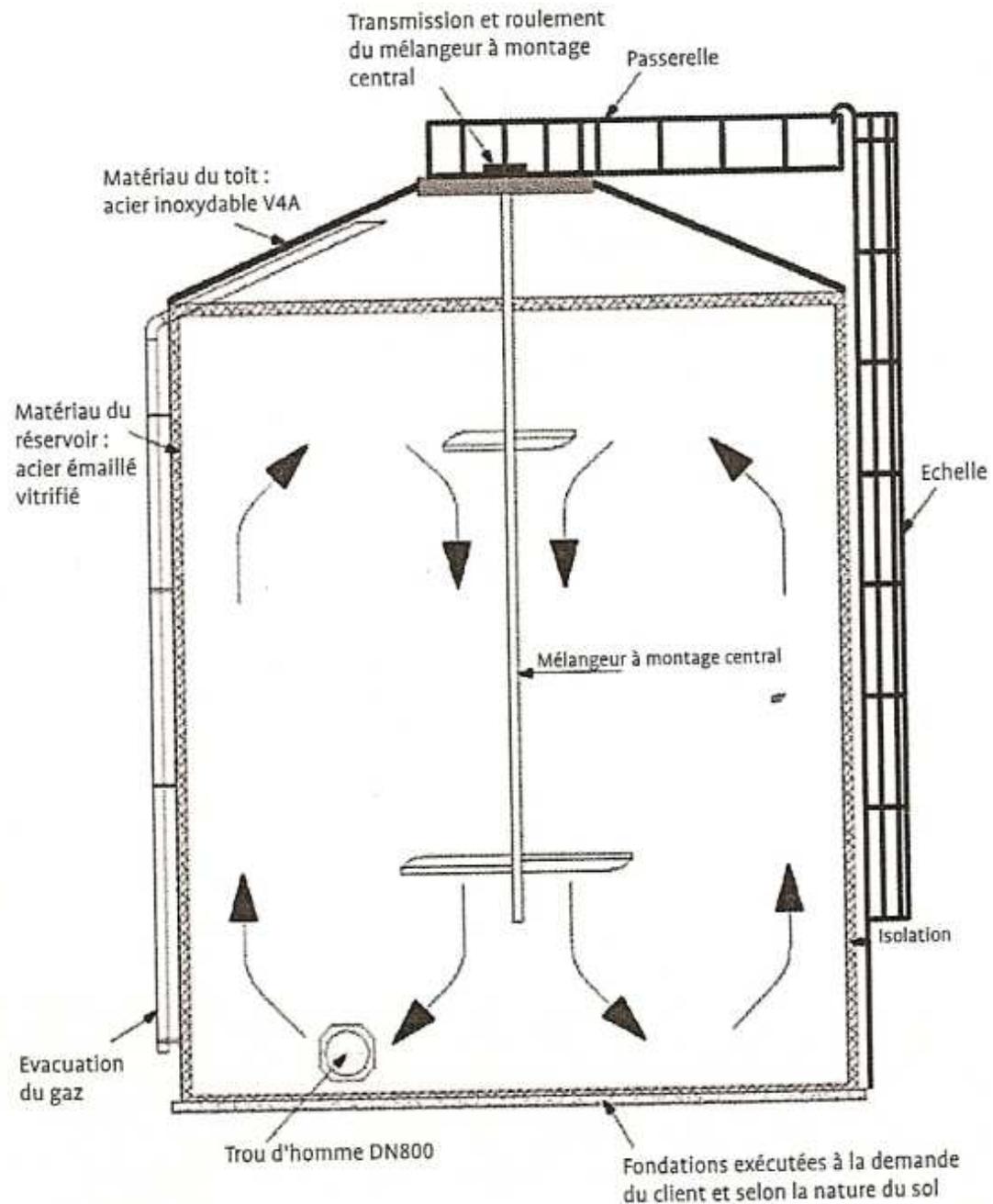
Liste des annexes

Annexe 1 - Schéma d'un mélangeur à montage central dans un digesteur infiniment mélangé

Annexe 2 – La réglementation du Biogaz

Annexe 3 - Planning prévisionnel

**Annexe 1 - Schéma
montage central
infiniment mélangé**



**d'un mélangeur à
dans un digesteur**

Annexe 2 - La réglementation du biogaz

- Textes relatifs aux apports de matières premières :

Textes relatifs aux déchets ménagers et assimilés – ordures brutes ou résiduaires triées.

Date	type	objet
	Rubrique ICPE	I322b2 et 167b relatives aux stations d'élimination des ordures ménagères
3/10/2002	Règlement européen	Sous-produit animaux non destinées à l'alimentation humaine
24/02/1994	circulaire	Plans départementaux d'élimination des déchets ménagers
20/04/1992	directive	Emballages et déchets d'emballage
01/04/1992	décret	Déchets résultant de l'abandon des emballages

Textes relatifs aux stations d'épuration des eaux urbaines domestiques et industrielles

date	type	objet
	Rubrique ICPE	2750,2751 et 2752 des ICPE relatives aux stations d'épurations
11/02/1992	Circulaire	2750,2751 et 2752 des ICPE relatives aux STEP mixtes
03/01/1992	Arrêté	Loi sur l'eau-régime et répartition des eaux et à la lutte contre leur pollution et prévoyant certaines dispositions transitoires applicables aux exploitations d'élevage.
10/07/1990	Arrêté	Rejets de certaines substances dans les eaux souterraines en provenance d'installations classées.

Textes relatifs à l'élevage et aux rejets de l'élevage.

Date	type	Objet
3/10/2002	Règlement européen	Sous-produits animaux non destinés à l'alimentation humaine, conditions pour utilisation en méthaniseur
04/01/2002	Décret	2002-26 aides pour la maîtrise des pollutions liées aux effluents d'élevage
31/10/1996	Circulaire	ICPE distances d'implantation des élevages vis-à-vis des tiers
23/10/1995	Circulaire	Capacité de stockage des effluents d'élevage et mise en œuvre du programme de maîtrise des pollutions agricoles.
BO du 30/03/1992	Arrêté	58 Arrêté type relatif aux établissements de vente, de transit, de soins, de garde, d'exposition, renferment des animaux et être vivants
22/11/1993	arrêté	Code des bonnes pratiques agricoles (épandage et conditions d'élevage)

- **Les textes relatifs à la production de biogaz**

La transformation des matières premières

Les décharges ou centre d'enfouissement technique (CET)

Date	type	N°	objet
02/02/2001	Arrêté		Installations soumises à autorisation émettant plus de 100 tonnes de CH4 par an
26/04/1999	Directive	1999/31/CE	Mise en décharge des déchets
10/11/1997	Circulaire	97-94	Décharges
09/09/1997	Arrêté		Décharges existantes et nouvelles installations de stockage de déchets ménagers et assimilés
30/12/1996	Loi	96-1236	Air et utilisation rationnelle de l'énergie
18/11/1996	Décret	96-1008	Plans d'élimination des déchets ménagers et assimilés
03/02/1993	Décret	93-139	Elimination des déchets et ICPE
13/07/1992	Loi	92-646	Etudes déchets
19/02/1992	Circulaire	92-13	Critères techniques d'évaluation de l'étanchéité des sites de décharge de classe 2

28/12/1990	Circulaire	90-98	Etudes des déchets et ICPE
29/03/1989	Circulaire		Acceptabilité des ordures ménagères en décharges de classe1 à caractère collectif
20/02/1989	Circulaire		Décharges des résidus urbains exploitées sans autorisation dites « décharge brute »
11/03/1987	Circulaire		ICPE mise en décharge contrôlée ou centre d'enfouissement technique de résidus urbains
30/08/1985	Circulaire	4311	Récupération des déchets
22/01/1980	instruction		Mise en décharge des déchets industriels

Textes relatifs aux méthaniseurs et installations associées

Date	Type	Objet
15/03/2000	Arrêté	Exploitation des équipements sous pression
13/12/1999	Décret	Equipements sous pression
29/05/2000	arrêté	Prélèvements et consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature relatives aux ICPE à autorisation

Textes relatifs à la production de carburant

Date	Type	Objet
25/06/2001	arrêté	Réglementation d'équipement, de surveillance, et d'exploitation de gaz carburant comprimé équipant les véhicules automobiles
05/05/1993	arrêté	Distributeurs de gaz liquéfiés destinés à être utilisés comme carburant

Annexe 3 – Planning prévisionnel à la date du 13/10/08

Période		Du 13 octobre 2008 au 26 janvier 2009																Affectation			
		Mois			octobre				Novembre				Décembre				Janvier				
Semaine du		13	20	27	3	10	17	24	1	8	22	29	15	5	12	19	26				Diane
n°	Taches																				
	1- Lancement du projet																				
1	Détermination du groupe de travail	■																100%	100%	100%	
2	Choix du sujet	■																			
3	Détermination du tuteur pédagogique	■																			
	2- Sujet																				
4	Définition et limitation du sujet		■																		
5	Entrevue avec le tuteur pédagogique		■																		
6	Recherches préliminaires	■	■	■														100%	100%	100%	
7	Rédaction du plan			■																	
8	Répartition des tâches			■																	
9	Réunion avec le tuteur pr approbation du plan			■																	
	3- Aspect environnemental, économique, politique et réglementaire																				
10	Recherche de documents				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			5%	90%	5%	
11	Rédaction								■	■	■	■	■	■							
	4- Installation de Biogaz																				
12	Recherche de documents				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				90%	5%	5%	
13	Rédaction								■	■	■	■	■	■							
	5- Fermentation anaérobie																				
14	Recherche de documents				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				5%	5%	90%	
15	Rédaction								■	■	■	■	■	■							
	4- Rendu																				
16	Rapport d'avancement									■											
17	Regroupement des parties													■	■						
18	Rendu du rapport final														■	■		100%	100%	100%	
19	Préparation du poster														■	■					
20	Rendu du poster														■	■					