

BIOGAZ

Introduction

Presque tous les pays en développement manquent de combustibles sûrs, bon marché et pratiques. Les populations rurales comptent sur le kérosène, le bois et la bouse de vache pour la cuisson et l'éclairage, mais le prix du kérosène est devenu prohibitif et le bois se fait rare sauf dans les grandes zones forestières. En outre, la collecte du bois de chauffage occupe une grande partie de la journée et entraîne le déboisement de vastes régions. La bouse, elle, ne manque pas dans les régions d'élevage; elle est de plus facile à entreposer et à utiliser, une fois sèche. Mais en brûlant, elle perd ses principes fertilisants et prive le sol d'une source d'humus et d'azote dont il aurait besoin.

D'autre part, l'absence de services d'hygiène collective dans les zones rurales des pays en développement, notamment pour l'évacuation des eaux usées et des déchets, favorise la propagation des maladies et la contamination des sources d'eau, offrant ainsi aux vecteurs un terrain idéal pour leur multiplication. Comment assainir l'environnement, ménager les ressources et trouver de nouveaux combustibles? Ces problèmes paraissent de prime abord n'avoir aucun lien commun. Leurs solutions sont toutefois liées, comme sont en train de le découvrir les nombreux pays qui tentent d'exploiter la technologie du biogaz. Mélange de méthane et d'anhydride carbonique, le biogaz résulte de la fermentation des substances organiques.

Plusieurs sources de biogaz sont exploitables : méthanisation naturelle des déchets urbains au sein des décharges ; méthanisation volontaire des ordures ménagères brutes ou de leur fraction fermentescible, des boues de stations d'épuration des eaux urbaines ou industrielles, des déchets solides ou liquides issus de diverses activités industrielles ou agricoles. En théorie, quelles que soient les conditions dans lesquelles s'effectue la fermentation, la quantité de méthane produite pour une même quantité de DCO "demande chimique en oxygène" dégradée est une constante égale à $0,35 \text{ m}^3/\text{kg}$. Cette quantité n'est évidemment jamais atteinte : rendement biologique, rendement technologique, taux de dégradation, durée de traitement varient largement d'un procédé à l'autre.

I. La valorisation des produits organiques par méthanisation (Biogaz)

1. Caractéristiques

Le biogaz est un gaz combustible, mélange de gaz carbonique et de méthane, qui provient de la dégradation des matières organiques mortes, végétales ou animales, dans un milieu en raréfaction d'air dit " fermentation anaérobie ". Cette fermentation est le résultat de l'activité microbienne naturelle ou contrôlée. C'est également un gaz riche en méthane, mais qui comporte des éléments difficiles à traiter, notamment les organes halogénés (chlore et fluor) provenant de la décomposition des plastiques et de la présence de déchets toxiques (bidons de lessive, piles...).

Le biogaz est produit à partir de la fermentation. Il existe donc plusieurs sources possibles d'émission suivant leurs caractéristiques :

- les boues des stations d'épuration,
- le biogaz provenant des matières organiques contenues dans les eaux. C'est un gaz riche en méthane, en hydrogène sulfuré, mais aussi en métaux lourds, provenant du recueil des eaux polluées par le lessivage des routes par la pluie,

- les biogaz industriels ou agricoles (des industries agro-alimentaires, du lisier de porc),
- les biogaz des unités spécifiques de méthanisation liée au compostage,
- le biogaz de décharge.

Les décharges produisent spontanément du biogaz car les déchets fermentescibles y sont régulièrement déposés. L'émission peut durer plusieurs dizaines d'années, d'abord à un rythme croissant, puis décroissant. Le processus peut être accéléré en humidifiant la matière, auquel cas le potentiel de production peut être récupéré entre 5 ou 10 ans. Sans installation particulière autre que le captage des gaz dans les alvéoles, on peut ainsi récupérer 60 m³ de méthane par tonne enfouie.

2. Composition du biogaz

Composition du biogaz

Méthane (CH ₄)	45 à 65 %
Gaz carbonique (CO ₂)	25 à 45 %
Eau (H ₂ O)	6 %
Oxygène (O ₂)	
Hydrogène sulfuré (H ₂ S)	traces
Organo-halogénés (chlore, fluor)	

Suivant sa provenance, le biogaz contient aussi des quantités variables d'eau, d'azote, d'hydrogène sulfuré (H₂S), d'oxygène, d'aromatiques, de composés organo-halogénés (chlore et fluor) et des métaux lourds, ces trois dernières familles chimiques étant présentes à l'état de traces.

Le biogaz est produit par un processus de fermentation anaérobie (en absence d'air) des matières organiques animales ou végétales, qui se déroule en trois étapes (hydrolyse, acidogénèse et méthanogénèse) sous l'action de certaines bactéries.

Ce processus est naturel et l'on peut l'observer par exemple dans les marais ("gaz de marais"). Il se déroule spontanément dans les centres d'enfouissement des déchets municipaux, mais on peut le provoquer artificiellement dans des enceintes appelées "digesteurs" où l'on introduit à la fois les déchets organiques solides ou liquides et les cultures bactériennes. Cette technique de méthanisation volontaire peut s'appliquer aux ordures ménagères brutes ou à leur fraction fermentescible, aux boues de stations d'épuration des eaux usées urbaines ou industrielles, aux déchets organiques industriels tel que industrie agro-alimentaire (IAA), cuirs et peaux, chimie, parachimie,...), ainsi qu'aux déchets de l'agriculture et de l'élevage (fientes, lisier, fumier,...).

3. Dépollution et production d'énergie

La méthanisation spontanée ou provoquée est donc avant tout par un processus de dégradation des déchets organiques et participe de ce fait à la dépollution et à la protection de l'environnement. Exprimé en "demande chimique en oxygène" (DCO), le taux de réduction atteint 50 à 60% pour les déchets d'élevage et 75 à 99% pour les déchets des IAA. De même,

le taux de dégradation de la matière sèche volatile se situe entre 6 et 85% pour les ordures ménagères et aux environs de 70% pour les boues de stations d'épuration des eaux urbaines.

Cette technique de traitement des déchets et effluents polluants présente la caractéristique très particulière de produire de l'énergie au lieu d'en consommer. Le méthane produit est évidemment le même que celui du gaz naturel et il possède donc la même valeur technique et commerciale. Mais le biogaz ne contient pas que du méthane.

Le tableau ci-dessous indique la composition moyenne de trois sortes de biogaz issues de trois filières de production différentes : la fermentation spontanée au sein d'une décharge équipée d'une aspiration du biogaz (Biogaz 1), une installation de méthanisation d'ordures ménagères brutes, type Valorga (Biogaz 2), une installation de méthanisation d'effluents industriels, ici ceux d'une distillerie (Biogaz 3).

Composition	Biogaz 1	Biogaz 2	Biogaz 3
CH₄	45%	60%	68%
CO₂	32%	33%	26%
N₂	17%	1%	1%
O₂	2%	0%	0%
H₂O	4%	6%	5%
H₂S₅	20 mg/m ³	100-900 mg/m ³	400 mg/m ³
AROMATIQUES	1mg/m ³	0-200 mg/m ³	0
ORGANO-HALOGENES	0-100 mg/m ³	100-800 mg/m ³	0
PCI (kWh/(n)m³)	4,5	6,0	6,8

Comme on le voit, le biogaz est bien loin d'être du méthane pur. Mais après tout, le gaz naturel tel qu'il sort de la terre ne l'est pas plus et doit être traité avant d'être injecté dans les gazoducs.

4. La méthanisation ou le processus industriel de fabrication de biogaz

La méthanisation est la production d'un gaz à haute teneur en méthane qui provient de la décomposition biologique des matières organiques. La méthanisation réduit de moitié environ le taux de matières organiques de nombreux déchets et sous-produits organiques biodégradables : boues d'épurations urbaines et industrielles, déchets municipaux, déchets et résidus de l'agriculture. La fermentation anaérobie est un processus naturel qui se produit chaque fois que des matières biologiques se décomposent. Ainsi est-il possible, en enfermant les matières dans un digesteur ou une usine de biogaz, d'emprisonner le gaz combustible et de l'utiliser pour l'éclairage et la cuisson. Les boues déposées peuvent ensuite servir à l'amélioration et à la fertilisation des terres.

La production industrielle de biogaz consiste à stocker la matière organique (en l'espèce les déchets) dans une cuve hermétique ou "digesteur", ou "méthaniseur", dans laquelle les matières organiques sont soumises à l'action des bactéries. Un brassage des matières, éventuellement un apport d'eau, mais surtout un chauffage, accélèrent la fermentation et la production de gaz qui dure environ deux semaines. La production peut alors être de 500 m³ de gaz par tonne de déchets.

L'usine de biogaz consiste essentiellement en une grande chambre, partiellement souterraine. Les déchets animaux, humains ou végétaux sont d'abord mélangés avec de l'eau et introduits dans la chambre par le tuyau d'entrée. Pendant la décomposition les déchets glissent vers le tuyau de sortie. Le processus dure généralement de 30 à 50 jours, temps suffisant pour produire 18 % du gaz et détruire la plupart des agents pathogènes. Le gaz est recueilli dans un cylindre renversé placé à la surface du liquide et qu'on retire pour usage. La quantité de méthane et le rythme de production dépendent du type et de la teneur en humidité des déchets. En outre, plus le contenu d'azote par rapport au carbone est élevé, plus la production de méthane est grande (les déchets humains, par exemple, ont une teneur relativement élevée en azote si on les compare aux bouses de vache). Il a été calculé que les déchets de deux animaux seulement suffisent à alimenter une usine domestique.

La production de méthane est possible au-dessus de 10°C, mais il est recommandé de maintenir la température entre 30°C et 40°C.

Le biogaz généré par la décomposition de la matière organique issue des déchets d'ordures ménagères (OM) est une source de nuisance olfactive. C'est aussi un risque en raison de la présence de méthane, qui représente 60% de la composition du biogaz, gaz explosif à l'air dans un seuil compris entre 5 et 15%. Il est donc nécessaire d'éviter tout risque de migration hors de son lieu de formation.

La méthanisation peut être conduite dans des digesteurs, enceintes confinées à l'intérieur desquelles les réactions de fermentation sont optimisées. Un digesteur peut traiter des substrats homogènes (mono-substrat) ou des mélanges, ce qui offre des opportunités pour traiter à l'échelle d'un bassin de vie divers types de déchets (municipaux, agricoles, industriels). C'est pour certaines catégories de déchets, une alternative à l'incinération.

La technologie la plus courante et la plus ancienne est celle du digesteur "infiniment mélangé" dans lequel le brassage est assuré par un moyen hydraulique ou, mieux, par recirculation du biogaz. Ce type de digesteur fonctionne généralement vers 35°C (mésophile). Il a connu un certain nombre d'améliorations au cours de ces dernières années. Degremont, par exemple, le fait précéder d'un "hydropulpeur", cuve métallique équipée d'une hélice centrale qui fait éclater les cellules végétales et met le déchet en suspension dans l'eau recyclée du process (procédé BTA). Les déchets légers (plastiques, textile,) flottent à la surface et sont récupérés par un peigne hydraulique ; les éléments lourds minéraux (verre, cailloux, os, ...) décantent et sont extraits par le bas. La pulpe liquide ainsi produite passe ensuite dans un hydrocyclone qui enlève les particules fines sableuses et abrasives.

En Allemagne et en Autriche, on a vu apparaître des digesteurs de forme ovoïde construits en béton précontraint selon le procédé mis au point par l'ingénieur-conseil suisse Peter Jäger. Cette forme occupe moins de surface au sol, permet un brassage plus homogène et plus régulier, en supprimant les zones mortes ou de fermentation préférentielle, et facilite la décantation.

Entre temps sont arrivés les digesteurs dits de seconde génération qui utilisent la technique des cellules fixées (ou encore "Filtre anaérobie"). La vitesse de fermentation étant proportionnelle à la masse de bactéries présentes, elle est limitée dans la technique précédente par le fait que ces bactéries ne peuvent se fixer que sur les parois du réacteur. D'où l'idée - venue de France et d'Irlande - d'augmenter la surface de vie des bactéries en introduisant un support de grande surface spécifique. Le procédé proposé par exemple par Proserpol comprend un support constitué d'anneaux de plastique en vrac et l'arrosage s'effectue par le haut ; aux Pays-Bas, on trouve aussi le procédé UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) dans lequel le support est biologique et le flux ascendant. Les avantages sont identiques, par rapport à l'ancienne technique : fermentation beaucoup plus rapide (quelques heures à quelques jours au lieu de deux semaines), possibilité d'accélérer encore le processus en adoptant la fermentation thermophile, productivité supérieure, multipliée par 4 à 10, biogaz plus riche en méthane (jusqu'à plus de 80%), taille réduite et donc investissement moindre.

Ajoutons que pour certaines matières organiques, le processus doit se dérouler en deux étapes, acidification préalable puis méthanisation proprement dite, qui font appel à des familles de bactéries différentes et qui doivent donc se dérouler dans des cuves distinctes.

II. Production de biogaz

1. Production de biogaz par biodigester en polyéthylène

Matériel nécessaire

- Tube de film plastique (polyéthylène) de diamètre 80 cm (par exemple), calibre 800 à 1 000 (film épais). Le meilleur des films plastiques est celui qui est utilisé pour les serres, puisqu'il est suffisamment épais, il filtre les rayons Ultra-Violet, et est très résistant. Pour 10 cochons, il faut une longueur d'environ 30 m (2 x 11,5 m pour le digesteur + 4 m pour le réservoir de gaz et 3 m pour les imprévus)
- 2 tubes en céramique, 15 cm de diamètre environ et 90 à 100 cm de longueur
- 2 adaptateurs en PVC (mâle et femelle), diamètre intérieur 12,5mm
- 2 mètres de tube PVC, diamètre intérieur 12,5mm
- Tuyau plastique (PVC) diamètre intérieur 14,5mm (vérifier qu'il s'adapte bien sur le tube PVC), prendre la longueur nécessaire pour aller du biodigester jusqu'au(x) brûleur(s).
- 2 rondelles de caoutchouc (provenant de chambre à air), de 7 cm de diamètre, 1mm d'épaisseur, avec un trou au centre de 12,5mm de diamètre.
- 2 rondelles de plastique rigide de 10 cm de diamètre avec un trou central de 12,5 mm de diamètre. Ce plastique peut provenir d'un vieux seau, ou tout autre objet en plastique dur,
- 4 chambres à air usées (mais pas trop !) de moto ou voiture, coupées en bandes de 5 cm de largeur,
- 1 bouteille de plastique transparent,
- 1 coude en PVC (diamètre intérieur 12,5mm)
- 3 « T » en PVC (diamètre intérieur 12,5mm)
- 1 tube de colle spéciale PVC.

2 Préparation de la tranchée

Le digesteur doit être installé à un endroit assez proche de la porcherie et du lieu où est utilisé le gaz (cuisine par exemple). Cependant, il faut savoir qu'il est facile de transporter le biogaz

par tuyau, alors qu'il est plus difficile de le faire pour le lisier. Ainsi, le mieux est de trouver un endroit où le lisier puisse s'écouler par gravité dans le digesteur. Un canal d'écoulement du lisier pourra être aménagé par la suite.

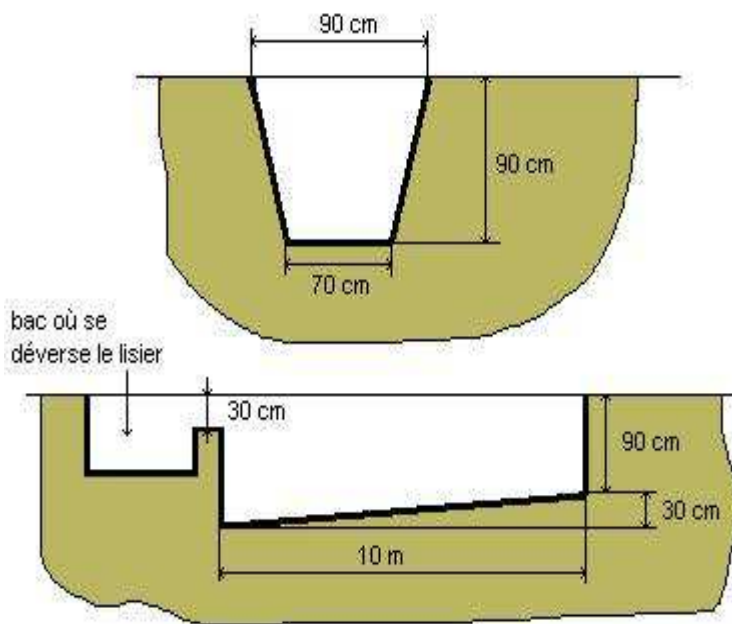
Dimensions :

L'exemple traité ici correspond au cas d'un élevage de 10 cochons. Il faut un digesteur de capacité 4m^3 de liquide, comme 80% du volume du digesteur est pris par le liquide, il faut donc 5m^3 de volume au total. Si le tube de plastique a un diamètre de 80 cm, cela fait donc une longueur de 10 m.

Diamètre du tube	80 cm	120 cm	160 cm	200 cm
5 cochons	5 m	2.3 m	Trop petit	Trop petit
10 cochons	10 m	4.5 m	2.5 m	Trop petit
15 cochons	15 m	6.7 m	3.8 m	2.4 m
20 cochons	20 m	9 m	5 m	3.2 m

Longueur du digesteur suivant le nombre de cochons et le diamètre du tube de plastique.

Plan de la tranchée (pour 10 cochons)



Il faut avoir un accès facile au bac où se déverse le lisier, pour le vider au fur et à mesure.

Remarques importantes :

- La tranchée doit avoir une pente de 3 %, pour que le lisier puisse s'écouler naturellement tout en ayant un temps de séjour dans le digesteur assez long. C'est ainsi que sont obtenus les 30 cm.
- IL faut que les parois de la fosse soient lisses, de façon à ne pas trouser le plastique. Ainsi, toutes les pierres, racines ... doivent être enlevées de la tranchée.
- Lors des travaux, la terre enlevée doit être entreposée assez loin de la fosse. En effet, il ne faut pas qu'elle retombe dans la fosse ou sur le digesteur lors d'une forte pluie ou de vent violent.
- Pour résumer, il faut éloigner tout ce qui peut trouser ou endommager le digesteur !



3 Fabrication du digesteur

a. Tube de plastique

Longueur à prendre : $10\text{ m} + 2 \times 0,75\text{ m}$, soit 11.5 m. Les 2 x 75 cm serviront pour fixer les tubes d'entrée et de sortie.

Puisque le digesteur doit avoir une double épaisseur (pour des raisons de solidité), il faut couper 2 longueurs : les insérer l'une dans l'autre, en faisant attention à ce que les 2 films plastiques ne fassent pas de plis entre eux, qu'ils soient bien ajuster ensemble. Ainsi, on obtient un tube d'une longueur de 11.5 m et ayant une double épaisseur de plastique.

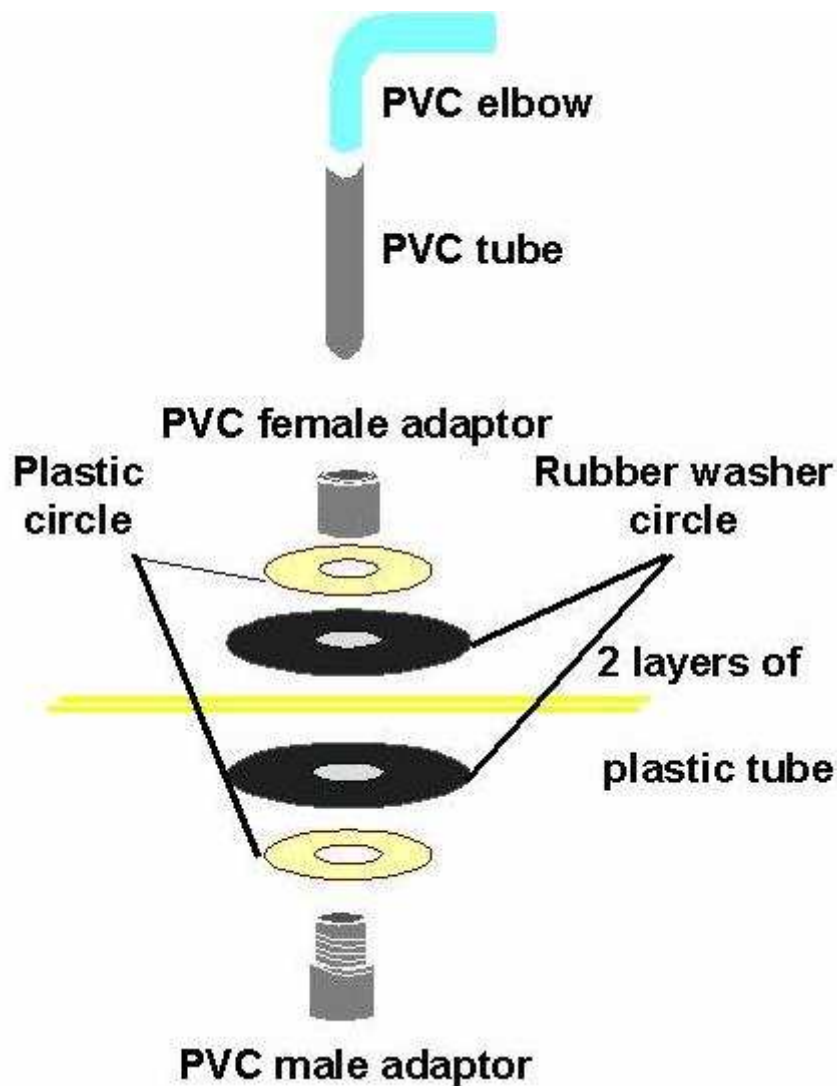


b. Sortie des gaz

A 1.5 m de ce qui sera l'entrée du biodigester, faire une marque, et percer les deux épaisseurs de plastique d'un trou de diamètre 12,5 mm.



Ensuite, assembler la sortie des gaz comme indiqué sur la photo (sans les tubes et coude pvc) :



(Rubber washer circle : rondelles de caoutchouc et Elbow : coude)

Remarques :

- tous les composants de la sortie gaz doivent être bien ajustés ensemble, pour des raisons d'étanchéité et de sécurité,
- bien visser l'adaptateur femelle sur le mâle, ne pas utiliser de colle.



c. Fixation du tube d'entrée

Remarque préalable : mettre un sac plastique rembourré, ou plusieurs épaisseurs de tissus sous la zone de travail, de façon à éviter tout dommage au plastique du digesteur, lors de la manipulation du tube céramique.



Insérer la moitié de la longueur du tube céramique à l'intérieur du tube plastique (au milieu des deux épaisseurs de film), et plier le film autour de la céramique. Le pliage doit être régulier : il ne doit pas y avoir de grosses différences d'épaisseur de plastique autour du tube.



Ensuite, pour faire le joint entre le digesteur et le tube de céramique, il faut les envelopper d'une bande de caoutchouc de 5 cm de largeur (coupée dans une chambre à air). Procéder comme pour un bandage lors d'une blessure : on commence sur le plastique (à 25 cm du bord), en enroulant la bande de caoutchouc de façon à ce que chaque tour recouvre le précédent. Cela doit s'arrêter sur la céramique, sinon, recommencer en serrant plus fort le caoutchouc ou en prenant une bande plus longue. Le bout restant est coincé sous le dernier tour. Assurez le tout en enroulant du fil de fer (attention à ce qu'il ne perce pas le plastique du digesteur) ou du ruban adhésif solide autour.



d. gonflage du digesteur

Le but de cette opération est de donner la forme au biodigesteur. Une fois que l'installation sera finie, il faudra le dégonfler et vider le circuit gaz de l'air, pour des raisons de sécurité (le mélange biogaz-air est explosif, alors autant l'éviter)!

Dans un premier temps, il faut boucher hermétiquement la sortie des gaz et le tube d'entrée, grâce à des sacs plastique. Ensuite, forcer l'air à entrer dans le digesteur par le côté non bouché. Cela paraît difficile, mais puisque l'on dégonflera le digesteur une fois l'installation finie, ce n'est pas la peine de s'attarder de trop à son gonflage.

Il est aussi possible de gonfler le digesteur par les gaz d'échappement d'un moteur, ce qui est plus simple et plus sécurisant (puisque les gaz d'échappement n'explosent pas avec le biogaz). Pour cela, il faut installer le tube de sortie, boucher le tube d'entrée et fixer le tuyau amenant les gaz d'échappement au tube de sortie, de façon hermétique. Faire attention à ce que les gaz ne soient pas trop chauds, pour qu'ils n'endommagent pas le plastique.



Une fois le digesteur gonflé, il faut lier celui-ci à environ 1.5m de la sortie avec un morceau de caoutchouc ou autre chose, de façon à ce que l'air ne s'échappe pas lorsque le tube céramique de sortie sera mis.



e. Fixation du tube de sortie

Procéder comme pour le tube d'entrée.

f. Finir de remplir le digesteur d'air

Découper 4 mètres du tube de film plastique, et en sceller un côté avec une bande de caoutchouc (chambre à air). Ensuite, il faut remplir d'air ce gros ballon, puis le connecter au digesteur par l'intermédiaire du tube de sortie (qui vient d'être installé). Enfin, vider le ballon d'air dans le digesteur en enlevant les liens qui sont à 1,5 m et le retirer.



Faire attention en enlevant le ballon à boucher le tube de sortie, sous peine de dégonfler tout le digesteur !

Remarque

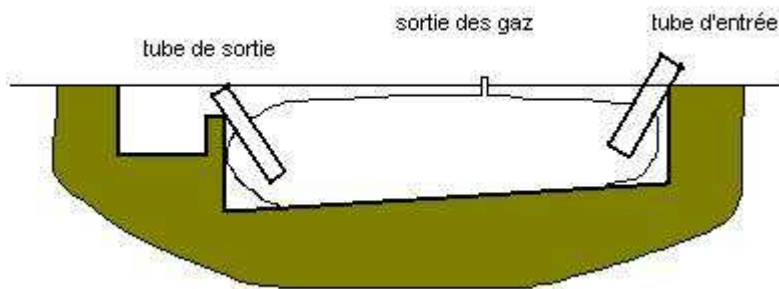
Le ballon de 4 mètres servira de réservoir de gaz, il faut donc le garder et ne pas l'abîmer.

Ainsi, nous avons un digesteur de 10 mètres, gonflé d'air et hermétiquement clos, avec un tube d'entrée, un de sortie et une sortie de gaz.



g. Installation dans la tranchée

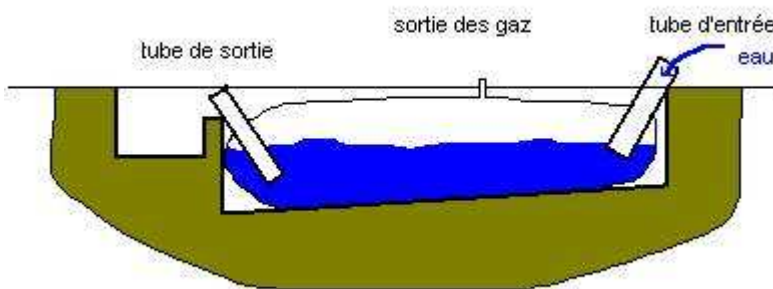
Installer le biodigesteur (gonflé d'air et avec les tubes d'entrée et sortie ainsi que la sortie gaz bouchés) dans la tranchée comme l'indique le schéma ci-après :



Il faut faire attention à ce que les tubes ne soient pas bouchés par le bas (les maintenir à un angle de 45° éventuellement).

Faire aussi attention à ce que la sortie gaz soit au-dessus du digesteur.

Ensuite, remplir d'eau le digesteur, jusqu'à ce que les extrémités des tubes soient noyées (en veillant bien à ce que l'air ne parte pas), comme sur le schéma :



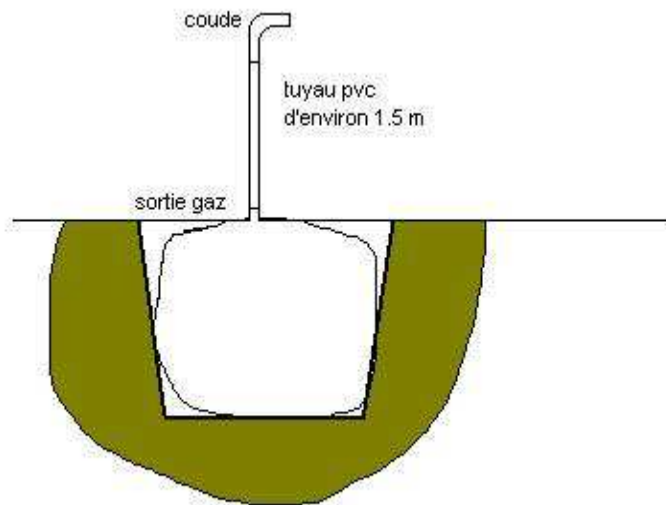
Après, on peut enlever les bouchons des tubes, mais pas celui de la sortie gaz.

Il est conseillé de faire un toit au-dessus du digesteur pour le protéger du soleil et le maintenir à l'abri d'éventuelles chutes.

h. Circuit gaz

Il faut d'abord préparer un support au-dessus de la sortie des gaz, pour soutenir les tuyaux de pvc.

Le schéma donne les dimensions :



Le tuyau et le coude seront connectés avec de la colle pvc, ainsi que le tuyau sur la sortie gaz. Faire attention à ce que le minimum d'air s'échappe du digesteur. Pour cela, assembler en premier coude et tuyau, et boucher le coude avec un morceau de plastique, puis ensuite, connecter l'ensemble à la sortie gaz.

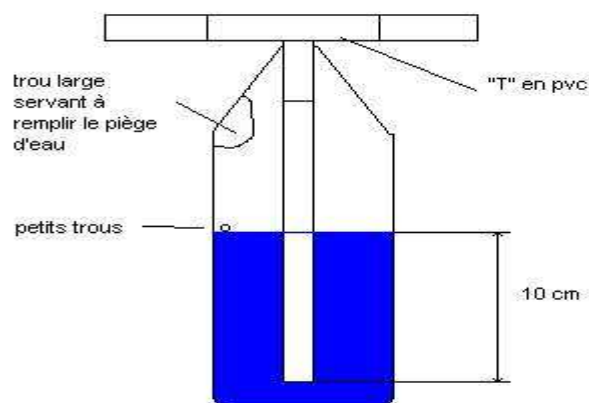
Installer le tuyau souple qui transportera le gaz du digesteur jusqu'à l'endroit où il est utilisé, sans le brancher au coude.

Ce dispositif sert de vanne de sécurité : si la pression dans l'installation devient trop grande, le gaz s'échappera par le piège à eau.

i. Piège à eau

Il faut d'abord fabriquer un grand « T » en PVC à partir d'un petit auquel on colle 3 morceaux de tuyau pvc (2 petits et un grand).

On insère ce grand « T » dans une bouteille en plastique. Dans cette bouteille, on fait un large trou qui permettra de la remplir aisément d'eau (3*3 cm, par exemple). Ensuite, on la remplit d'eau, et on fait des petits trous à 10 cm dans la bouteille de l'extrémité du « T » pour maintenir le niveau d'eau constant :



Il faut suspendre ce piège dans un endroit du circuit de gaz qui soit facile d'accès, et où l'eau (présente sous forme de vapeur d'eau dans le gaz) du circuit s'accumule (point bas du circuit), de façon à l'observer, à le remplir d'eau facilement et à piéger la condensation. Ensuite, connecter le tuyau de gaz aux extrémités du « T ».



j. Réservoir de gaz

Prendre le ballon de 4 mètres qui nous a servi précédemment. A l'extrémité encore ouverte, connecter un « T » (fabriqué de la même façon que précédemment).



Ce réservoir est suspendu dans un endroit assez près du lieu d'utilisation du biogaz, mais il faut le mettre dehors, pour des raisons de sécurité (s'il y a des fuites, ...). Faire aussi attention à ne pas fumer ni faire de feu dessous.

Connecter le tuyau des gaz au « T ». Une des branches récupère le gaz et l'autre l'envoie vers la gazinière.

k. Finitions

Brancher le tuyau de gaz au coude (au-dessus du biodigesteur). Puis, vider l'air du digesteur en appuyant doucement dessus, de façon à ce que l'air passe par le circuit du gaz, pour aller remplir le réservoir. En profiter pour voir s'il le circuit n'a pas de fuites. Ensuite, vider le réservoir de gaz de l'air qu'il contient en appuyant dessus, en pinçant le tuyau de gaz en amont du réservoir (pour que l'air ne retourne pas dans le digesteur) et en ouvrant les robinets de la gazinière.

4. Aspects pratiques

Placer une ficelle autour du réservoir de gaz en son milieu. Cette ficelle servira à suspendre une pierre (de 1 à 2 kg), et donc à augmenter la pression du gaz.

Lorsque l'on veut se servir du biogaz, il faut d'abord pincer le tuyau en amont du réservoir (entre le réservoir et le piège à eau). Ensuite, suspendre la pierre pour augmenter la pression à l'intérieur du réservoir. Puis enfin, ouvrir le robinet du brûleur et allumer le gaz.

Une fois l'utilisation finie, après avoir fermé le robinet du brûleur, enlever la pierre et dépinçer le tuyau, sous peine de perdre du gaz.

Attention !

- A la première utilisation, le biogaz risque d'être mélangé avec l'air, surtout si l'air n'a pas été totalement enlevé du circuit. Ce mélange est explosif, il convient alors de faire très attention et d'éviter les retours de flamme dans le réservoir. Le mieux étant de vider le réservoir du gaz qui a été produit, sans le brûler, même si cela fait perdre quelques jours de production de gaz.
- Tester les brûleurs avant de s'en servir, en faisant attention.
- Utiliser le gaz dans un milieu ventilé : il n'est pas bon pour la santé de respirer le biogaz.

5. Quelques Remarques

On peut aussi mettre dans le digesteur les excréments des autres animaux que les porcs (sauf lapins, chèvres, moutons), ainsi que tous les déchets pouvant fermenter (végétaux ...)

- Penser à ajouter de l'eau dans le digesteur si l'intérieur est trop sec.
- Vérifier souvent le circuit gaz, le réparer si nécessaire. En profiter pour ajouter de l'eau au piège à gaz s'il le faut.
- S'il y a du gaz dans le digesteur mais pas dans le réservoir, vérifier si le circuit n'est pas bouché. De l'eau peut s'être accumulée par condensation et avoir bouché le circuit. Dans ce cas, faire un trou dans le circuit à l'endroit où se serait accumulée l'eau, évacuer l'eau et reboucher le circuit avec du ruban adhésif.
- Faire très attention au digesteur : ne pas le trouer.
- Un digesteur se change tous les 2 ou 4 ans, suivant l'utilisation.

6 Quelques chiffres

Exemple de chiffres obtenus après l'installation de biodigesteurs en polyéthylène dans des petites fermes au Vietnam (d'après EPA) :

	moyenne	Min~Max
taille de la famille	5,9	3 ~ 12
lisier introduit (kg/jour)	16	2 ~ 27
rapport eau/lisier	5,1	2,9 ~ 8,1
température de chargement (°C)	26,4	25,7 ~ 28,5
température du digestat (°C)	27	26,0 ~ 29,1
pH de chargement	6,7	6,4 ~ 7,1
pH du digestat	7,2	6,8 ~ 7,5
production de gaz (litres/digesteur/ jour)	1 235	689 ~ 2 237
volume de gaz par personne (litres/personne)	223	68 ~ 377
part de méthane dans le gaz (%)	56	45 ~ 62

Calcul de la quantité de biogaz moyenne produite par 1kg de lisier :

$1\ 235 / 16 = 77$ litres biogaz / kg lisier. Ce chiffre est nettement plus élevé que les ordres de grandeur que nous avons donnés au chapitre I (40 l / kg lisier pour une vache). Il illustre bien les variations qui peuvent exister d'un troupeau à l'autre. Il peut être expliqué par une chaleur élevée de digestion, un temps de digestion important, la présence de matières organiques autres que lisier de vache et cochon etc.

Problèmes techniques avec les bio digesteurs (d'après EPA) :

Endommagé par :	Dégradation			Total
	du digesteur	du réservoir gaz	autres	
soleil	4	1	1	6
chute d'objets	2	1		3
personnes	2	1		3
animaux	1	2		3
qualité du matériel	1			1
vent	1			1
surcharge			1	1
total	11	5	2	18
auto réparation (agriculteurs sur place)	6	5	1	12

En général 70% des problèmes peuvent être corrigés par les agriculteurs eux même sans l'aide de techniciens (noté auto réparation dans le tableau).

La valorisation du maïs à l'échelon villageois

La recherche n'a pas travaillé directement sur les pailles de maïs. On peut cependant, sans risque, extrapoler les résultats obtenus sur les pailles de sorgho (CIRAD-IRAT et ISRA) (FARINET et SARR, 1989). Les expérimentations ont eu lieu au Sénégal, dans le cadre d'une exploitation type intégrant l'élevage, l'irrigation, la technologie Transpaille et la petite motorisation pour la production d'énergie et de compost. Les équipements de l'unité expérimentale comprennent ;

- un fermenteur continu Transpaille d'une capacité utile de 9 m³;
- un dispositif de stockage de biogaz d'une capacité de 10 m³;
- un groupe électrogène biogaz-gasoil d'une puissance de 6,5 kVA qui alimente une électropompe immergée ;
- un foyer amélioré alimenté au biogaz.

Les résidus de récolte et d'élevage sont utilisés pour alimenter le fermenteur sous la forme d'un fumier très pailleux dont les caractéristiques moyennes sont les suivantes :

- 35 % de matières sèches (m.s.)
- 80 % paille et 20 % fécès bovins.

Les produits de la fermentation méthanique de ce fumier sont, d'une part, un gaz combustible (biogaz), d'autre part, un compost, après finition des effluents de fermentation.

Le rendement se situe en moyenne à 170 litres de biogaz par kilo de matières sèches pour une charge d'environ 45 kg de matières sèches par jour (soit environ 130 kg de biomasse-fumier).

La quantité de compost final est équivalente à 60 % de la biomasse initiale (en m.s.), avec un taux de nitrate de 7 % de l'azote total et une réserve en azote nitrifiable proche de 60 % de l'azote total.

III Les nouvelles techniques de production

1. L'hydropulpeur

L'hydropulpeur est développé par une société allemande. Il s'agit d'une méthanisation après traitement liquide composé de trois étapes :

- un prétraitement mécanique au cours duquel les sacs papiers (le procédé est en vigueur en Allemagne, et les déchets fermentescibles sont collectés en sacs papiers) sont ouverts par un broyeur, et les plus gros éléments sont éliminés.
- le passage dans l'hydropulpeur. Il s'agit d'une cuve métallique équipée d'une hélice centrale qui entraîne l'éclatement des cellules végétales. Les déchets sont mélangés à l'eau formant une pulpe liquide. Les déchets légers sont éliminés par flottation (plastiques, textiles), et extraits par peigne hydraulique. Les déchets lourds (verre, cailloux...) décantent au fond du " pulpeur " et sont évacués par un sas. Cette phase de " pulpage " et de décantation permet d'éliminer les indésirables. Les flottants sont pressés et incinérés. Les lourds inertes sont mis en décharge.
- la digestion de la " pulpe ". Une fois débarrassée des indésirables, la pulpe alimente un " digesteur ", chauffé (35/37° C). La matière reste deux semaines, et permet de dégager deux sous-produits. Tout d'abord, la matière organique génère un biogaz qui peut être valorisé sous forme de production d'énergie (électricité et/ou chaleur) utilisée en autoconsommation (broyeur, chauffage du " pulpeur ") ou revendue. Ensuite, après deux semaines, la pulpe est retirée, puis renvoyée en centrifugeuse permettant de séparer l'eau (recyclée dans le process au niveau de " l'hydropulpeur "), d'une partie solide, le " digestat ". Ce résidu, mélangé avec des structurants (broyats de déchets verts, écorces...), est stabilisé, et forme un compost exempt de toute impureté d'excellente qualité.

2. Les "digesteurs" de seconde génération par "filtre anaérobie"

Il s'agit d'augmenter l'efficacité et la longévité des bactéries en leur permettant de se fixer sur des particules mélangées aux déchets. Selon ce procédé, la fermentation serait considérablement accélérée (quelques jours au lieu de deux semaines), et la productivité serait améliorée dans une proportion de 1 à 4.

3. Les recherches sur les utilisations nouvelles

Il s'agit, d'une part de l'injection de biogaz dans les réseaux de gaz naturel, d'autre part, de l'utilisation de biogaz en carburant. La méthanisation produit avec le biogaz, une énergie riche (60 % environ) en méthane renouvelable, et de ce fait valorisable sous forme de chaleur, vapeur, électricité, co-génération, gaz naturel, gaz carburant. Il est épuré, stocké dans des bouteilles et alimente des pompes où viennent s'approvisionner les véhicules techniques des collectivités locales.

IV - Champ d'application

1. Boues d'épurations urbaines et industrielles

Premier maillon de la chaîne de traitement après les phases de décantation, la méthanisation est utilisée depuis plus d'un siècle pour traiter les boues d'épurations urbaines, et depuis deux à trois décennies, les boues d'épurations industrielles. Un tiers des boues d'épuration urbaines sont aujourd'hui préalablement traitées par méthanisation dans une double optique : réduire la charge organique polluante - et donc les volumes à épandre, à incinérer ou à enfouir, en fin de traitement et cela quels que soient les traitements intermédiaires : déshydratation, chaulage, séchage thermique, compostage...

L'intérêt économique de la méthanisation des boues doit être étudiée au regard des investissements et des frais d'exploitation, mais aussi des bénéfices induits : réduction des frais afférents au traitement des boues, autonomie énergétique totale ou partielle des sites.

Si l'opportunité de recourir à la méthanisation des boues s'étudie au cas par cas, les contraintes croissantes d'évacuation ouvrent de nouvelles perspectives à cette filière.**2. Récupérer le biogaz des décharges**

Les décharges produisent spontanément du biogaz ; encore faut-il le capter, comme la loi en fait d'ailleurs l'obligation. Dans les centres d'enfouissement modernes, organisés en alvéoles, la solution est relativement simple. Chaque alvéole doit être étanchéifiée, au fond, sur les côtés et, lorsqu'elle est pleine, sur sa face supérieure, grâce à des films de plastique. Le biogaz est ainsi piégé, mais aussi protégé de l'air, ce qui évite d'avoir ultérieurement besoin de séparer l'oxygène et l'azote en excès.

L'alvéole fermée va produire du biogaz pendant plusieurs décennies, à un rythme d'abord croissant, puis décroissant. Il est évidemment très important de connaître l'évolution dans le temps de cette production, afin de dimensionner correctement les installations d'épuration et de valorisation - c'est une affaire de spécialistes - sachant qu'à la fin de la période d'activité de l'alvéole, on aura récupéré environ 60 m³ de méthane par tonne d'ordures ménagères enfouies. On peut laisser faire la nature ; on peut aussi penser à réinjecter les lixiviats (récupérés par un autre réseau de captage) dans l'alvéole. En humidifiant, on accélère le processus de fermentation et il est ainsi possible de récupérer tout le potentiel de production de biogaz en 5 ou 10 ans au lieu de 20 ou 30, ce qui peut s'avérer intéressant au plan économique. Le deuxième avantage serait d'éviter qu'il subsiste au sein de l'alvéole des poches sèches, dont la fermentation se déclencherait accidentellement 50 ou 100 ans après la fermeture du site, ce qui pourrait présenter des risques.

La captation elle-même s'effectue par un réseau de drains horizontaux posés sur le fond et reliés à des puits d'extraction verticaux. L'adaptation de ces derniers pose un problème logistique et la question n'est pas tranchée. Soit on pose les puits dès que l'alvéole est ouverte et on les monte au fur et à mesure que les déchets s'entassent, ce qui permet de commencer immédiatement à capter une partie du biogaz et des odeurs et de tester le réseau de captage ; soit on les installe à la fin, ce qui réclame une grande précision dans la profondeur de perçage, un montage assez délicat, mais évite le risque de voir ces puits détériorés par le passage des compacteurs de 40 tonnes sur le dépôt. Malgré ses difficultés, c'est la deuxième solution qui semble être la plus couramment adoptée par les exploitants.

3. Biogaz agricole

Dans les années 40, puis durant la crise de pétrole (1973-1985), la méthanisation a été appliquée aux déjections d'élevage. La chute des cours du pétrole fin des années 80 annule toute perspective de rentabilité des installations, dont beaucoup furent abandonnées. On assiste aujourd'hui à un renouveau de cette application.

Le fumier pourrait être utilisé pour la production de biogaz. Il contient des matières organiques qui, sous des conditions anaérobies (comme dans les puits de stockage de fumier et dans les lagunages), se transformeront en méthane et en dioxyde de carbone.

Le méthane et le dioxyde de carbone sont des gaz à effet de serre. Les émissions de dioxyde de carbone provenant du fumier sont le résultat de la décomposition de matières organiques des plantes et ne contribuent donc pas au réchauffement de la planète, contrairement aux émissions de dioxyde de carbone provenant de la combustion de combustibles fossiles. Lorsque le méthane est relâché dans l'atmosphère, il contribue au réchauffement de la planète.

Il est possible de capturer le méthane provenant du fumier dans des installations spécialement conçues (installations pour biogaz) et de l'utiliser (biogaz) comme source d'énergie. La production et l'utilisation de biogaz au niveau des foyers, de l'élevage ou de l'industrie réduira le besoin d'utilisation de combustible fossile et les émissions de dioxyde de carbone provenant du combustible fossile.

4. Traitement des déchets ménagers

Il existe désormais de nombreux procédés en course (Kompogas suisse, Dranco belge, BTA déjà cité, Avécon, Biocel, ...), mais le premier d'entre eux est le procédé français Valorga, appliqué dès 1988 à Amiens. Détruisons immédiatement une idée largement répandue, mais fautive : l'usine d'Amiens n'est pas un échec, bien au contraire. Son image reste marquée par les difficultés rencontrées au début de son exploitation (c'était une première mondiale) mais le fait est que l'usine a toujours fonctionné et que ses performances se sont améliorées avec le temps.

Le "procédé Valorga" est en réalité une filière complète et intégrée de traitement des déchets ménagers, qui inclut (ou peut inclure suivant les cas) un tri des déchets à l'entrée, une méthanisation de la part fermentescible, un compostage du résidu de fermentation, une incinération des refus de tri combustibles et une mise à la décharge des résidus ultimes (refus de tri non combustibles, résidus d'incinération). Outre son caractère intégré, l'originalité du procédé repose sur le digesteur sans pièce mobile interne, qui assure l'hydrolyse et la méthanisation dans une seule enceinte et qui permet de traiter des déchets presque secs (digestion en milieu concentré), ce qui réduit l'encombrement, le coût et l'autoconsommation d'énergie des équipements.

5. Méthaniser les matières organiques

Un digesteur, ou méthaniseur, est une enceinte fermée dans laquelle les matières organiques sont soumises à l'action des bactéries. Ce n'est pas un procédé nouveau : la première installation connue date de la fin du siècle dernier et traitait les boues de la station d'épuration d'Exeter en Grande-Bretagne. C'est d'ailleurs cette application qui est aujourd'hui la plus répandue en France où l'on compte plus de 150 méthaniseurs équipant des stations d'épuration urbaines.

La technologie la plus courante et la plus ancienne est celle du digesteur "infiniment mélangé" dans lequel le brassage est assuré par un moyen hydraulique ou, mieux, par recirculation du

biogaz. Ce type de digesteur fonctionne généralement vers 35°C (mésophile). Il a connu un certain nombre d'améliorations au cours de ces dernières années. Degrémont, par exemple, le fait précéder d'un "hydropulpeur", cuve métallique équipée d'une hélice centrale qui fait éclater les cellules végétales et met le déchet en suspension dans l'eau recyclée du process (procédé BTA). Les déchets légers (plastiques, textile, ...) flottent à la surface et sont récupérés par un peigne hydraulique ; les éléments lourds minéraux (verre, cailloux, os, ...) décantent et sont extraits par le bas. La pulpe liquide ainsi produite passe ensuite dans un hydrocyclone qui enlève les particules fines sableuses et abrasives.

En Allemagne et en Autriche, on a vu apparaître des digesteurs de forme ovoïde construits en béton précontraint selon le procédé mis au point par l'ingénieur-conseil suisse Peter Jäger. Cette forme occupe moins de surface au sol, permet un brassage plus homogène et plus régulier, en supprimant les zones mortes ou de fermentation préférentielle, et facilite la décantation.

Entre temps sont arrivés les digesteurs dits de seconde génération qui utilisent la technique des cellules fixées (ou encore "Filtre anaérobie"). La vitesse de fermentation étant proportionnelle à la masse de bactéries présentes, elle est limitée dans la technique précédente par le fait que ces bactéries ne peuvent se fixer que sur les parois du réacteur. D'où l'idée - venue de France et d'Irlande - d'augmenter la surface de vie des bactéries en introduisant un support de grande surface spécifique. Par un procédé proposé par exemple par Proserpol, le support est constitué d'anneaux de plastique en vrac et l'arrosage s'effectue par le haut ; aux Pays-Bas, on trouve aussi le procédé UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) dans lequel le support est biologique et le flux ascendant. Les avantages sont identiques, par rapport à l'ancienne technique : fermentation beaucoup plus rapide (quelques heures à quelques jours au lieu de deux semaines), possibilité d'accélérer encore le processus en adoptant la fermentation thermophile, productivité supérieure, multipliée par 4 à 10, biogaz plus riche en méthane (jusqu'à plus de 80%), taille réduite et donc investissement moindre.

Ajoutons que pour certaines matières organiques, le processus doit se dérouler en deux étapes, acidification préalable puis méthanisation proprement dite, qui font appel à des familles de bactéries différentes et qui doivent donc se dérouler dans des cuves distinctes.

V - La valorisation du biogaz

Lorsque le biogaz est produit dans un digesteur, il en est captif et donc facilement récupérable et valorisable. Ce n'est pas le cas des décharges à ciel ouvert qui émettent spontanément du biogaz et le relâche dans l'atmosphère. Or, le méthane est un gaz à effet de serre 25 fois plus "nocif" que le gaz carbonique.

La valorisation du biogaz a un double effet positif sur l'environnement, en amont en tant que traitement des déchets et effluents organiques, en aval pour réduire le risque climatique global. Une fois le biogaz capté ou produit, autant le valoriser le plus efficacement possible. Différentes voies sont envisageables : chaleur seule, électricité seule, cogénération, carburant automobile, injection dans le réseau de gaz naturel.

1. La production de chaleur :

Brûler du biogaz sous chaudière ou en four est la voie de valorisation la plus ancienne, la mieux maîtrisée et la plus courante. La teneur en CH₄ du biogaz peut descendre jusqu'à 20% et les contraintes d'épuration sont légères. En général, on peut se contenter d'une déshydratation par dévésiculation et séparation de phases. Une désulfuration peut cependant s'avérer nécessaire si la teneur en H₂S conduit à des rejets soufrés excessifs dans les fumées.

Elle s'effectue généralement par passage sur charbon actif ou traitement à l'hydroxyde ferrique, à l'aspiration du surpresseur.

On utilise des brûleurs spéciaux adaptés à la combustion du biogaz, alimentés avec une surpression supérieure ou égale à 300 mbar. Ces brûleurs, qu'on trouve couramment sur le marché, ont des injecteurs de plus grand diamètre que les brûleurs à gaz habituels et leur fonctionnement est moins souple. Mais le problème le plus délicat est celui que posent les risques éventuels de corrosion dus à la présence conjointe de vapeur d'eau, d'hydrogène sulfuré et de composés organo-halogénés. Dans ce cas, il est indispensable de prévoir des canalisations en PEHD et de protéger le surpresseur (aubages en inox, corps revêtu de matériau inerte), ainsi que les purges, les compteurs et les brûleurs.

2. Le biogaz carburant

Pour cette application, les spécifications de pureté du gaz sont beaucoup plus sévères que pour les précédentes, puisque le biogaz utilisable comme carburant doit contenir un minimum de 96% de méthane. Il faut en outre que le point de rosée soit inférieur à -20°C , ce qui correspond à une teneur en eau inférieure à $15 \text{ mg}/(\text{n})\text{m}^3$. D'autres exigences sont à respecter : teneur en H_2S inférieure à $100 \text{ mg}/(\text{n})\text{m}^3$, en huile inférieure à 70- 200 ppm, en hydrocarbures liquides inférieure à 1 %, avec une taille de poussières limitée à 40 microns.

3. L'injection dans le réseau

La composition finale du biogaz injectable ainsi que sa pression dépendent évidemment des spécifications imposées par le gestionnaire du réseau. Ces dernières portent principalement sur les teneurs en méthane, en gaz carbonique, en hydrogène sulfuré et en oxygène, avec des contraintes supplémentaires sur la teneur en composés organohalogénés. Le gaz injecté doit en outre être odorisé avant l'injection.

4. La production d'électricité :

Le biogaz, comme toute énergie, peut se transformer en électricité. Le biogaz doit cependant comporter au moins 40% de méthane, et avoir un débit minimum de $500 \text{ m}^3/\text{heure}$. La production d'électricité peut être couplée avec celle de chaleur dans le cas de co-génération.

Le pouvoir calorifique d'un mètre cube de biogaz épuré (après traitement, évacuation de l'eau, de l'acide sulfuré...) est équivalent à celui d'un litre de fuel domestique.

La production d'électricité seule ou en cogénération peut s'effectuer avec une chaudière au biogaz, suivie d'une turbine à vapeur. Cette voie très classique pose peu de problèmes techniques et les contraintes d'épuration du biogaz sont celles que réclament les chaudières. L'autre voie, explorée depuis quelques années, consiste à installer des moteurs à gaz, soit à étincelles, soit dual-fuel. Ces derniers sont plus lents, plus souples, plus durables, mais ils sont aussi environ deux fois plus chers. Les moteurs exigent un biogaz contenant au moins 40% de méthane.

Les possibilités de valorisation du biogaz dépendent de la nature du gisement et des débouchés pour l'énergie. Les centres de stockage de déchets s'orientent majoritairement vers la production d'électricité seule du fait de l'absence de débouchés thermiques locaux. Le biogaz issu d'effluents industriels quant à lui, est très souvent utilisé directement pour les besoins de l'établissement. La situation est plus contrastée pour les unités de méthanisation

des biodéchets ou des déjections d'élevage, qui ont plus fréquemment recours à la cogénération.

a. cogénération avec autoconsommation de la chaleur

La production d'électricité avec utilisation de l'énergie thermique pour le chauffage des digesteurs seulement est :

majoritaire en stations d'épuration urbaines, digesteurs agricoles

fréquente pour les stations d'épurations industrielles et les unités centralisées ou de méthanisation des biodéchets municipaux.

b. Cogénération avec usage externe de la chaleur

Il s'agit de la production d'électricité avec valorisation de l'énergie thermique, d'une part pour le chauffage des digesteurs, d'autre part pour un autre usage. La valorisation est soit interne au site de production, mais sans qu'elle ne soit liée au procédé de méthanisation (déshydratation des boues, des lixiviats de décharge ou du digestat...), ou externe (réseau de chaleur...).

Elle est majoritaire sur les unités centralisées ou de méthanisation des biodéchets, fréquente en stations d'épuration urbaines ou en centres de stockage.

VI - Valorisation du biogaz à l'échelle internationale

On imagine facilement un industriel de l'agro-alimentaire ou une station d'épuration urbaine se lancer dans la méthanisation de leurs déchets respectifs. On sait que des industriels peuvent se regrouper pour traiter ensemble leurs déchets par cette voie : c'est l'exemple célèbre de REVICO en France, qui méthanise les vinasses de plusieurs producteurs de cognac (voir Energie Plus n° 97 du 15/12/97). Mais il existe d'autres filières et d'autres stratégies, dont certaines sont encore peu explorées en France.

1. Méthaniser les ordures ménagères

Il existe désormais de nombreux procédés en course (Kompogas suisse, Dranco belge, BTA, Avécon, Biocel, ...), mais le premier d'entre eux est le procédé français Valorga, appliqué dès 1988 à Amiens. Détruisons immédiatement une idée largement répandue, mais fautive : l'usine d'Amiens n'est pas un échec, bien au contraire. Son image reste marquée par les difficultés rencontrées au début de son exploitation (c'était une première mondiale) mais le fait est que l'usine a toujours fonctionné et que ses performances se sont améliorées avec le temps.

Le "procédé Valorga" est en réalité une filière complète et intégrée de traitement des déchets ménagers, qui inclut (ou peut inclure suivant les cas) un tri des déchets à l'entrée, une méthanisation de la part fermentescible, un compostage du résidu de fermentation, une incinération des refus de tri combustibles et une mise à la décharge des résidus ultimes (refus de tri non combustibles, résidus d'incinération). Outre son caractère intégré, l'originalité du procédé repose sur le digesteur sans pièce mobile interne, qui assure l'hydrolyse et la méthanisation dans une seule enceinte et qui permet de traiter des déchets presque secs (digestion en milieu concentré), ce qui réduit l'encombrement, le coût et l'autoconsommation d'énergie des équipements.

Après plusieurs changements de portage, l'usine d'Amiens appartient aujourd'hui au District du Grand Amiens et la partie méthanisation et compostage est exploitée par la société Valorga Picardie, filiale d'Idex. Elle s'est agrandie plusieurs fois et un quatrième digesteur de 3 500 m³ a été ajouté en 1996. Elle traite aujourd'hui 86 000 t/an de déchets en provenance d'Amiens, du district d'Abbeville et du sud du département et sa capacité devrait prochainement passer à 100 000 t/an. Le seul problème technique vraiment grave a conduit à l'abandon de l'incinération des refus de tri combustibles, les fours en place n'étant pas capables de résister au pouvoir calorifique élevé de ces refus. Quant au biogaz, il a commencé par être injecté dans le réseau de gaz naturel après purification mais, GDF n'ayant pas reconduit son accord de coopération, il est désormais brûlé en chaudière pour alimenter en vapeur haute pression des industriels proches (puissance de 5 500 kW).

Il est vrai que les résultats économiques ne sont pas à la hauteur des espoirs initiaux : part plus importante que prévu mise en décharge, valorisation moins intéressante du biogaz, et surtout valorisation nulle du compost qui contient encore des résidus divers ayant échappé au tri, ce qui le rend impropre à une bonne commercialisation. La solution serait de trier les déchets à la source de façon à n'introduire dans l'usine que des matières fermentescibles (déchets de cuisines et de jardin). C'est celle qui a été adoptée pour les deux "unités filles" d'Amiens, l'usine de Tilburg aux Pays-Bas (1994, 52 000 t/an) et celle d'Engelskirchen en Allemagne (1998, 35 000 t/an). Dans la première, le méthane produit est introduit dans le réseau de gaz de la ville ; dans la seconde, il est valorisé sous forme d'électricité (940 kWe). Grâce au tri à la source, toutes deux produisent un compost de haute qualité. En régime de croisière, l'usine de Tilburg produit 4 millions de (n)m³ par an de biogaz à 56% de méthane, contenant très peu d'hydrogène sulfuré, et 31 000 t/an d'amendement organique valorisable en agriculture. Le procédé Volorga a davantage de succès chez nos voisins qu'en France : une unité est en construction à Fribourg (Suisse), d'autres projets sont à l'étude en Belgique (Mons), en Italie et en Espagne.

2. La co-méthanisation centralisée

L'idée de la codigestion collective et centralisée de biomasses agricoles est née au Danemark et a été mise en application dès 1988 grâce au soutien du gouvernement. Elle consiste à collecter dans le voisinage des lisiers et fumiers agricoles ainsi que des déchets organiques industriels divers, éventuellement des boues de stations d'épuration et des ordures ménagères, et à les méthaniser ensemble. Les fermes qui fournissent la matière première récupèrent une partie du lisier digéré en tant qu'amendement organique, le reste étant vendu comme engrais à des cultures céréalières. Le biogaz produit est valorisé sous plusieurs formes (chaleur, électricité, gaz de réseau).

Prenons l'exemple de l'unité de Lintrup, dans le sud du pays, construite en 1990 par une coopérative regroupant 62 agriculteurs situés dans un rayon de 7 km. Chaque jour, elle reçoit 360 m³ de matières organiques composés de 300 m³ de lisiers (vaches et porcs), 10 m³ de boues de stations d'épuration, 20 m³ de déchets de poissons, 25 m³ de déchets d'abattoirs et 5 m³ de déchets d'industries pharmaceutiques. Le biogaz produit (33 m³ par tonne de déchets traitée) est épuré puis vendu au réseau de chaleur de la ville voisine de Rodding (environ 2,5 F/m³) où il est valorisé sous forme de chaleur et d'électricité. Il assure ainsi 60% des besoins d'électricité et 40% des besoins de chaleur des 4200 habitants. Le digestat "solide"(25 m³/i) est transformé en compost dont une partie est redistribuée aux agriculteurs adhérents et l'autre vendue. Quant aux effluents liquides, constitués de lisier digéré (donc homogénéisé et désodorisé), ils sont eux aussi redistribués en partie aux adhérents, chacun n'en recevant que la quantité qui lui est nécessaire selon le plan d'épandage. Le reste est vendu comme engrais (3 à 5 F/m³ en automne, 12 à 16 F/m³ au printemps).

Le bilan économique de l'opération est mitigé. Avec un investissement de départ de 40 MF et des frais d'exploitation de 3 MF/an, l'installation n'est amortissable en 8-10 ans que grâce à la subvention de 15 MF accordée par le ministère danois de l'Energie. L'essentiel des revenus provient de la vente du biogaz (4 à 5 MF/an) et du coût d'enlèvement que paient les industriels pour se débarrasser de leurs déchets (environ 1 MF/an). Ce bilan, cependant, ne tient pas compte des économies d'engrais commerciaux réalisées par les agriculteurs adhérents, qui ont signé un contrat de dix ans.

Les dix premières unités construites ont fait l'objet, en 1995, d'une évaluation technico-économique de la part des ministères danois de l'Energie, de l'Agriculture et de l'Environnement. L'objet ultime de cette étude était de savoir si ces unités allaient pouvoir bientôt se passer de subventions. Ce n'est pas encore le cas, mais le taux d'aide a quand même été abaissé à 20% en 1997. Il convient néanmoins d'ajouter qu'au Danemark, les sources d'énergies renouvelables sont exemptées de taxes et que leurs producteurs perçoivent même une partie des taxes pesant sur les combustibles fossiles, ce qui confère au biogaz une valeur marchande de l'ordre de 1,50 F/m³ (à 65% de méthane). L'étude a montré que les performances des unités allaient croissant, que la production de méthane augmentait et que la productivité (production de méthane par m³ de réacteur et par jour) dépassait largement les chiffres prévus. Ces performances sont cependant liées à la présence des déchets industriels à forte teneur en matières organiques fermentescibles, ce qui pose le problème de la pérennité de leur fourniture. Le gouvernement danois se repose donc la question du "biogaz à la ferme", qui éviterait en outre les transports de matières pénalisants pour l'économie des projets.

3. La méthanisation à la ferme

Ce fut, en Europe du moins, un rêve des années 70 qui, comme beaucoup d'autres en matière d'énergies renouvelables, a abouti à un échec. En résumé, on a voulu aller trop vite, sans avoir acquis au préalable la culture technique nécessaire. Sur la centaine d'installations construites en France, par exemple, une dizaine seulement ont survécu. La situation est la même dans les autres pays d'Europe ; les programmes internationaux lancés en Afrique et en Amérique Latine n'ont pas eu le succès escompté, malgré un argument convaincant : la production de biogaz devait y ralentir la déforestation et la désertification.

Le biogaz à la ferme ne serait donc qu'un rêve "écologique" ? Ce n'est pas le cas en Chine, en Inde, ni au Népal, où des millions de digesteurs sont en fonctionnement. Il faut dire que la Chine et l'Inde possédaient une culture technique de la méthanisation depuis les années 30 et que les recherches sur ce thème n'y ont jamais été interrompues (le Népal a adopté la technologie indienne. Il faut ajouter que, dans ces trois pays, les gouvernements se sont impliqués en apportant des aides : subventions à l'investissement et prêts à taux préférentiels en Inde et au Népal, allocation de main d'œuvre gratuite en Chine (la "Time Tax"). Le développement de la méthanisation à la ferme s'est pourtant déroulé de façon très différente d'un pays à l'autre.

En Chine, l'affaire a failli tourner court, comme en Europe, et pour la même raison. Les quelque 7 millions d'installations familiales construites au début des années 80 par les paysans eux-mêmes à coût très faible étaient d'une qualité insuffisante et leur durée de vie ne dépassait guère un an ou deux. Depuis la fin des années 80, le gouvernement chinois a rectifié le tir et les digesteurs sont désormais construits par des équipes compétentes et selon des techniques éprouvées. Le programme a pris du retard, mais il se poursuit. Le gouvernement indien s'est montré plus sage. Dans les années 60, il a lancé un programme de recherches avec la Khadi and Village Industries Commission (KVIC) qui a abouti à la mise au point d'unités de méthanisation, certes plus chères que les chinoises, mais de bien meilleure qualité. Ce n'est qu'ensuite, au début des années 80 qu'il a mis sur pied le programme de diffusion en y

associant des organismes publics, des sociétés privées et des associations. Cette phase de développement est encore en cours, sous le contrôle de la planification de l'Etat.

Au Népal, c'est un événement extérieur qui a servi de "starting block". La Banque du développement agricole (ADB/N) avait lancé un programme en 1977 en coopération avec la société gazière locale, la Gabor Gas Company, avec un succès notoire, mais lent. Mais au début des années 90, une tension politique grave avec l'Inde a raréfié brutalement l'approvisionnement en bouteilles de gaz et en carburant pendant six mois. Le gouvernement des Pays-Bas s'est intéressé au problème et, par le biais de son agence de coopération, la SNV, a cofinancé en 1992 un programme de développement du biogaz à la ferme. L'objectif était la construction de 20 000 unités en 5 ans et il fut largement dépassé. Durant la même période, la filière industrielle s'est constituée (26 constructeurs privés) et un organisme de contrôle de la qualité des équipements a été mis en place. Ce programme a été reconduit, toujours avec le soutien des Pays-Bas, pour la période 1998-2003, avec cette fois un objectif de 100 000 unités à construire.

La technologie utilisée a fait ses preuves : les premières unités construites par KVIC en Inde fonctionnent sans problème depuis plus de 30 ans. Passant outre leur amour propre, les pays européens pourraient s'en inspirer. Bien entendu, les conditions sociales et économiques sont très différentes d'un pays à l'autre. Mais les bonnes raisons ne manqueraient pas de relancer le "biogaz à la ferme" si l'on réfléchissait en termes de protection de l'environnement local (suppression des mauvaises odeurs) et de lutte contre l'effet de serre (transformation du méthane en CO₂).

VII - Consommation énergétique et utilisation du biogaz à Madagascar

Madagascar est par ses espèces végétales et animales inconnues ou disparues sur les autres continents classé comme un patrimoine international. Aussi il est une réserve inestimable pour la recherche, si l'on ne fait allusion qu'aux plantes médicinales. Ce réserve se trouve actuellement en grand danger de dégradation par des pratiques ancestrales sans soucis sur l'efficacité et la dégradation très sensible de l'environnement vécue journalièrement par le recul des zones d'approvisionnement. La pauvreté, l'analphabétisme, les difficultés d'accès par la manque d'infrastructure accentuent la difficulté des problèmes de réglementation, de contrôle et de mesures de substitution. Une exploitation rationnelle des ressources pour les besoins en énergie est devenue une des priorités du pouvoir public. L'instauration d'un développement humain durable est un défi pour les années à venir sous un contexte difficile et très dynamique.

1. Interactions énergie & environnement

En Afrique, dans les pays en voies de développement importateurs de pétrole comme Madagascar, les problèmes de pollutions s'ajoute le problème d'interaction énergie-environnement.

Les effets de la crise de l'énergie de 1973/74, de la détérioration des marchés internationaux liés aux prix d'achat des produits tropicaux comme café, vanille, etc..., de l'accroissement rapide de la population se traduisent par une pression considérable sur les ressources naturelles: la ressource forestière et l'énergie humaine, qui sont les seules sources d'énergie facilement accessibles et à bon marché pour les paysans malgaches.

La production, le transport, le traitement et l'utilisation des combustibles fossiles ont des impacts environnementaux : certains sont substantiels et les autres insignifiants, certains de

courte durée et autres avec effets à long terme et ils peuvent avoir lieu dans des différentes régions géographiques et peuvent affecter plusieurs communautés par différentes façons.

- Le potentiel énergétique de Madagascar est considérable, mais aucune étude approfondie sur leurs impacts environnementaux n'a pas encore été effectuée.

- La combustion du bois et du charbon de bois représente 50 % de la pollution atmosphérique. Les polluants gazeux dégagés sont le monoxyde de carbone, le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote, les carbures d'hydrogène, le goudron, les aldéhydes et parfois la radio-nucléide. Leurs impacts sur la santé des personnes exposées sont : la bronchite chronique, les maladies cardio-vasculaires, et les cancers pulmonaires.

- Les émissions des véhicules à moteur essence ou diesel représentent 30 % de la pollution atmosphérique urbaine. Les effluents gazeux dégagés sont l'oxyde de carbone, l'oxyde de soufre, l'oxyde d'azote, le plomb, le dioxyde d'azote. D'après les trois scientifiques Malagasy les affections prédominantes chez les personnes exposées sont l'atteinte des voies respiratoires : rhinite, bronchite, pharyngite. Les affections concernent les céphalées, la fatigabilité et la conjonctivite.

- Les effluents gazeux de la raffinerie de Toamasina sont : SOX , composés organiques, NOX , CO, Ammoniac, et les effluents liquides sont les chlorures azote d'ammoniaque, phosphate, solides en suspension, solides solubles et trace des métaux (Cr, Pb, Zn, Cu).

- Le défrichement est la menace la plus importante qui pèse sur la biodiversité. Ils sont occasionnés pour la pratique de la culture itinérante sur brûlis. Cette pratique est destructrice, car elle ne repose pas sur une rotation parcellaire, mais sur une avance continue sur de nouvelles parcelles forestières. La surface moyenne annuelle défrichée à Madagascar est 24.997 ha - 12.193 ha.

- Les feux de brousse affectent principalement les Domaines de l'Ouest et du Sud et plus marginalement certains secteurs du Domaine du Centre. Les incendies ont pour origine des feux de pâturage non contrôlés ou sont d'origine criminelle. La surface moyenne annuelle des feux de brousse est 910.982,71 ha dont 95.51 % feux de prairie et 4,70 % feux de forêts.

- Madagascar dispose des personnels de conception, de réalisation capable d'assurer la mise en fonctionnement et de suivi des installations utilisant l'énergie solaire, éolienne et du biogaz.

L'état actuel de la connaissance et de la technologie à Madagascar pourrait permettre seulement une évaluation qualitative de certains impacts environnementaux de la production, du transport, du traitement et de l'utilisation de quelques sources d'énergie.

Par conséquent, il est impératif de développer des outils de décision pour orienter efficacement les efforts en vue de satisfaire des besoins toujours croissant de la population. Si ces besoins sont connus et pris en compte dans les politiques de développement qui se sont succédées, force est de constater que: l'électricité reste encore inconnue pour de nombreuses régions. Si le potentiel hydraulique est considérable, paradoxalement l'électricité produite provient à 30% des centrales thermiques. Les différentes sortes d'énergie restent inexploitées ou non accessibles par le manque d'investissement ou par une politique inadaptée avec le

désengagement de l'état du secteur productif et de l'arrivée en force du secteur privé qui souhaite avoir la maîtrise de toutes les phases d'exploitation et de production.

Madagascar possède des gisements d'énergie qui constituent une garantie pour son avenir: de l'uranium, du charbon, du pétrole, de la biomasse, des énergies renouvelables comme le solaire, l'éolienne, la géothermie et la bioénergie. Ces ressources constituent une assurance pour une indépendance énergétique mais qui ne sont pas, en cas d'exploitation, totalement sans danger pour l'environnement.

Par conséquent, la politique de développement durable est nécessaire aussi pour le secteur énergie comme pour les autres secteurs de l'économie.

La demande reste largement supérieure à l'offre, l'approvisionnement des combustibles traditionnels se trouvent freiner par la faiblesse du pouvoir d'achat de la population et les difficultés d'accès. Le bois qui couvre 82% de la consommation totale brute restera pour les prochaines décennies le combustible principal du pays. Même si la consommation par habitant est de 214 kep/an, parmi les plus faible du monde, l'énergie importée engloutit 52% des recettes d'exportation.

Volume de l'importation totale de Madagascar

GROUPE	1988		1991	
	VALEURS	%	VALEURS	%
D'UTILISATION				
Matières premières	128531,9	25,1	164469,4	20,9
Energie	93245,6	18,2	129655,0	16,5
Moyens d'équipement	187474,4	36,6	299756,6	38,2
Alimentation	24433,6	4,8	65316,3	8,3
Consommation	78377,6	15,3	126492,2	16,1
TOTAL	512063,1	100,0	785689,5	100,0

Source : Banque de données de l'Etat.

L'énergie occupe une part importante dans les importations. Elle occupe 60% en quantité ou 18% en valeur.

Les consommations finales d'énergie dans l'ensemble du pays sont réparties comme suit :

- 84% bois et dérivées de bois
- 11% produits pétroliers
- 5% électricité et autres

2. Impacts positifs des installations de biogaz

La politique énergétique d'aujourd'hui est influencée par des nombreux facteurs : la pression démographique, le niveau et la nature des activités socio-économiques, les coûts relatifs de l'énergie, la fiabilité de l'approvisionnement, la disponibilité des technologies et de l'infrastructure, le succès du programme de conservation de l'énergie et ceux qui concernent aussi les aspects environnementaux et sécurité de la production et utilisation de l'énergie.

Au niveau national, ou dans certains cas régional, les aspects environnementaux de la production et de utilisation de l'énergie deviennent le sujet d'un large débat. Les campagnes de la conscience environnementale et antipollution doivent affecter la formulation de la politique énergétique de Madagascar.

Dans les grandes villes, chaque jour, les résidus des ménages, des établissements, des voies publiques et des marchés sont estimés à 500 m³ à Antananarivo et 170 m³ à Mahajanga.

Les quantités récupérables des déchets d'élevage sont estimées à 135.000.000 t pour les bovins, 1.100.000 t pour les porcins et 11.000.000 t pour les volailles. La valorisation de ces déchets par bio-méthanisation est une solution pour résoudre des demandes ponctuelles.

La fermentation anaérobie des ordures ménagères et des déchets agricoles et des excréments animaux permet de :

- réduire les contaminations par pollution tellurique :

- des nappes phréatiques et des eaux de surface ;
- de la surface du sol par certaines substances toxiques ;
- des plantes et de certains animaux destinés à l'alimentation de l'homme,

- réduire la prolifération des maladies telluriques généralement rencontrées:

- d'origine bactérienne : tétanos, salmonelloses, shigellose ou dysenterie bacillaire, staphylococcie pathogène ;
- d'origine parasitaire ; helminthiases, amibiase ;
- d'origine virale : les antroovirus poliomyélitiques et non poliomyélitiques.

- réduire la prolifération des mouches, des rongeurs et des moustiques :

- diminuer le dégagement d'odeur très désagréable.

- avoir le biogaz pour les usagers domestiques :

- substitution des produits pétroliers par le biogaz dans les zones isolées.

3. Organisation de la recherche universitaire malgache sur les énergies renouvelables

- Groupe des Energies Nouvelles et Renouvelables (G.E.R.N) de l'Université Nord de Madagascar (Antsiranana);

- Centre National de Recherche Industriel et Technique (C.N.R.I.T.) du Ministère de la Recherche Appliquée au Développement- HERY VAO

- MADISTRIBUTION

- ENERGIE TECHNOLOGIE

- ANGOVO

- TRANSENERGIE

Conclusion

Cette étude a révélé qu'il existe des modèles satisfaisants d'usines de biogaz mais que des constructions de mauvaise qualité et des modes d'exploitation peu fonctionnels conduisaient

souvent à des échecs. Les chercheurs ont donc recommandé que soient établies des normes techniques "de bon fonctionnement" pour la conception, la construction et l'exploitation de ces usines, et que l'information soit plus largement diffusée. Ils ont aussi découvert qu'on avait quelque peu négligé l'efficacité des brûleurs et de leurs accessoires, qui en conséquence ne donnaient guère satisfaction.

Selon les chercheurs, les modèles actuels des usines sont beaucoup plus coûteux qu'ils ne devraient l'être et ils sont donc inaccessibles à la plupart des ruraux. Il arrive même que le coût d'une usine domestique soit plus élevé que celui d'une maison familiale.

Les obstacles économiques et sociaux à l'adoption du biogaz vont du manque de ressources - en capital, terrain, temps, eau - nécessaires au fonctionnement efficace des usines à l'organisation spatiale des communautés, qui rend difficile le transport des boues jusqu'au champ. Il existe aussi dans certaines régions des barrières psychologiques et religieuses : en Indonésie, par exemple, les musulmans refusent d'utiliser le fumier du porc ; dans certaines parties de l'Inde, l'interdiction porte sur l'utilisation des déchets humains et du gaz qui en provient.

Cependant, toujours d'après les chercheurs, même si les usines de biogaz peuvent fournir du combustible et de l'engrais, recycler les déchets, diminuer la pollution et améliorer les conditions sanitaires, il est difficile de connaître l'importance de ces avantages. Tout investissement dans ces usines devrait donc viser à une meilleure distribution des revenus en desservant un large éventail de groupes sociaux. De grandes usines communautaires répondraient mieux à cet objectif, mais leur exploitation se heurte à de nombreux problèmes sociaux et techniques.

Pour conclure l'efficacité d'un système de production de biogaz et les économies qu'il permet de réaliser sont fonction de l'environnement dans lequel il s'inscrit. Pour bien des régions rurales de pays en développement, le biogaz pourrait néanmoins constituer une solution viable à leurs besoins en énergie et en engrais.

WEBLIOGRAPHIE

<http://www.energie-plus.com/news/fullstory.php/aid/93>

http://webep.insa-rouen.fr/francais/projets/Stroh_ZabotEP4/SITE/biogazII.htm

<http://perso.wanadoo.fr/hespul/biogaz.html>

<http://www.solagro.org/site/055.mv>

<http://www.energie->

[plus.com/news/fullstory.php/aid/93/Biogaz_:_MOYENS_ET_STRATEGIES_DE_PRODUC_TION_.html](http://www.energie-plus.com/news/fullstory.php/aid/93/Biogaz_:_MOYENS_ET_STRATEGIES_DE_PRODUC_TION_.html)

<http://lead.virtualcentre.org/fr/dec/toolbox/Indust/ManBioPr.htm>

http://webep.insa-rouen.fr/francais/projets/Stroh_ZabotEP4/SITE/biogazII.htm

<http://www.fao.org/inpho/vlibrary/x0158f/x0158f0c.htm>

<http://www.enviro2b.com/guides/energy/biogaz/filieres.html>

<http://www.sar.admin.ch/fat/f/publi/fb/fatb512f.html#mi2>

<http://www.solagro.org/site/092.mv>

<http://energie->

[plus.com/news/fullstory.php/aid/92/Biogaz_CHARACTERISTIQUES_INCITATIONS_et_RE_SOURCES_.html](http://www.energie-plus.com/news/fullstory.php/aid/92/Biogaz_CHARACTERISTIQUES_INCITATIONS_et_RE_SOURCES_.html)

<http://www.senat.fr/rap/o98-415/o98-41510.html>

<http://216.239.39.100/search?q=cache:VZscx40vQtsC:idrinfo.idrc.ca/Archive/ReportsINTRA/pdfs/v7n3f/110022.pdf+production+de+biogaz&hl=fr&ie=UTF-8>

<http://www.confederationpaysanne.fr/cs/153dosbiogaz.htm>

http://www.energie-plus.com/news/fullstory.php/aid/93/Biogaz_:_MOYENS_ET_STRATEGIES_DE_PRODUC_TION_.html
http://216.239.53.100/search?q=cache:EU1gt5gvdewC:www.c3ed.uvsq.fr/c3ed/sem-trans/seminaire_transv8.doc+exploitation+du+biogaz+%C3%A0+Madagascar&hl=fr&ie=UTF-8