

REPUBLIQUE DU SENEGAL
UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



GM 0507

Ecole Supérieure Polytechnique
Centre de THIES

DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR DE CONCEPTION

**ETUDE TECHNIQUE D'UNE UNITE DE BIOMETHANISATION
DESTINEE A L'ELECTRIFICATION RURALE :
APPLICATION AU MONASTERE DE KEUR MOUSSA**

Année : 2007

Auteur : Trazié Guy-Maxime IRJE BI
Directeur interne : Dr. Salif GAYE
Directeur externe : Frère Léon Marie CISS

DEDICACES

- ✓ A mon très cher Père, pour les sacrifices qu'il ne cesse d'endurer afin de nous assurer une très bonne éducation ;

- ✓ A ma très chère Mère, le monde entier ne saurait contenir les remerciements venant du fond de mon cœur ;

- ✓ A mes frères et sœurs ;

- ✓ A toute la famille TIEMTORE au Burkina Faso ;

- ✓ A toute la famille FAYE à Thiès ;

- ✓ A tous les autres membres de ma famille ;

- ✓ A tous ceux et celles à qui je pense chaleureusement mais que les limites de cette page ne me permettent pas de citer.

REMERCIEMENTS

Tout travail est perfectible et n'est jamais le fruit d'une seule personne. J'adresse des sincères remerciements à mon Professeur encadreur Monsieur Salif GAYE, sa patience n'a pas faillis durant l'exécution ce projet. Au Frère Moine Léon Marie CISS, Responsable de la ferme du monastère qui n'a cessé de me fournir les informations utiles. A mon Beau-frère Charles, il m'a guidé pas à pas tout au long de ma formation d'ingénieur. A ma marraine Philomène, son soutien m'a aidé à surmonter plusieurs difficultés, seul DIEU pourra lui révéler ma reconnaissance. A mon ami Karmel, nous avons travaillé d'arrache-pied afin de boucler l'évaluation financière du projet.

Au Directeur de l'école, à tous les professeurs, à tout le Personnel Administratif de Technique et de Service de l'école, au Père Abbé du monastère de Keur Moussa et à tous les Frères moines, à mes camarades de l'école qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	I
LISTE DES TABLEAUX	V
LISTE DES FIGURES	VI
LISTE DES ANNEXES	VIII
LISTE DES SYMBOLES ET ABBREVIATIONS	IX
INTRODUCTION	1
1^{ERE} PARTIE : SOURCES DE LA BIOMASSE, PROCESSUS DE LA BIOMETHANISATION	3
1. SOURCES DE LA BIOMASSE, VALORISATIONS ET AVANTAGES DU BIOMETHANE EN ZONE RURALE	3
1.1. Les sources de la biomasse.....	3
1.2. Valorisations et avantages du biométhane en zone rurale.....	8
1.2.1. Valorisations du biométhane	8
1.2.2. Avantages de la vulgarisation du biométhane en zone rurale	8
1.2.2.1. Bilan énergétique.....	8
1.2.2.2. Bilan agronomique	8
1.2.2.3. Bilan environnemental.....	9
1.2.2.4. Bilan économique.....	9
2. MISE EN PLACE DE L'UNITE DE BIOMETHANISATION	10
2.1. Définition de la biométhanisation	10
2.2. La composition du biométhane et ses caractéristiques.....	10
2.3. Matériel nécessaire à la mise en place de l'unité de biométhanisation	11
2.4. Fonctionnement et exploitation des différents ateliers.....	11
2.4.1. Atelier 1 : le stockage et la préparation des matières organiques avant leur admission dans le digesteur	11
2.4.1.1. Composition des matières organiques	12
2.4.1.2. Taux de dilution des matières premières dans l'eau.....	12
2.4.1.3. Caractéristiques des matières premières.....	13

a.	La matière sèche (M.S.).....	13
b.	Le rapport C/N des matières organiques	13
2.4.2.	Atelier 2 : le digesteur	16
2.4.2.1.	Constitution et paramètres techniques du digesteur	16
2.4.2.2.	Les technologies de conception d'un digesteur	16
a.	Les digesteurs discontinus.....	18
b.	Les digesteurs semi-continus conventionnels	21
c.	Les digesteurs continus.....	23
2.4.2.3.	Les étapes de production du biométhane au sein des digesteurs.....	27
a.	Les étapes d'hydrolyse et d'acidogenèse	28
b.	L'étape d'acétogenèse	29
c.	L'étape de la méthanogénèse.....	30
2.4.2.4.	Conditions d'optimisation de la production du biométhane au sein des digesteurs.....	31
a.	Condition anaérobie et potentiel d'oxydoréduction.....	31
b.	L'agitation des substrats dans le digesteur	32
c.	La température des substrats dans le digesteur.....	32
d.	Maintien d'un pH adéquat	35
e.	L'élimination de substances inhibitrices à la biométhanisation	35
f.	Emploi de levains et Prétraitement des substrats	37
g.	Durée d'un cycle de production de biométhane	37
h.	Taux de Charges en matière organique	38
3.3.	Atelier 3 : l'épuration et le stockage du biométhane.....	38
3.3.1.	Le système d'épuration.....	39
3.3.1.1.	Les méthodes de traitement et d'épuration du biométhane.....	39
a.	La biofiltration.....	39
b.	L'adsorption	39
c.	L'absorption	40
d.	L'épuration par circulation du biométhane sur une masse de limaille de fer	40
e.	La cryo-condensation	40
f.	La séparation membranaire	41
3.3.2.	Le système de stockage	41
4.4.	L'atelier 4 : Les utilisations du biométhane	41

4.5. L'atelier 5 : le stockage, le traitement et l'utilisation du digestat	41
4.5.1. Valeur fertilisante du digestat.....	42
4.5.2. Valeurs structurantes pour le sol	42
2^{EME} PARTIE : ETUDE EN VUE DU CHOIX DES ELEMENTS	
TECHNOLOGIQUES	43
1. ETAT DES LIEUX	43
1.1. Situation géographique du site	43
1.2. Examen des infrastructures existantes.....	45
1.3. Estimation du besoin en énergie électrique.....	45
1.4. Estimation de la quantité journalière de biométhane	53
1.5. Estimation du gisement minimum de matières organiques.....	53
2. CONCEPTION TECHNOLOGIQUE DE L'UNITE DE BIOMETHANISATION.	56
2.1. L'atelier 1 : le stockage et la préparation des matières organiques avant l'admission dans le digesteur (figure 26).....	57
2.2. L'atelier 2: le digesteur.....	57
2.2.1. Paramètres techniques du digesteur.....	57
2.2.2. Analyse thermique du digesteur	62
2.2.2.1. Chauffage des matières organiques.....	62
2.2.2.2. Quantité de chaleur récupérable au niveau de la centrale électrique.....	63
2.3. Atelier 3 : épuration et le stockage du biométhane (figure 27)	63
2.3.1. Choix du procédé d'épuration du biométhane brute	63
2.3.2. Choix du réservoir de stockage du biométhane.....	63
2.4. Atelier 4 : La centrale électrique (figure 28).....	64
2.5. Atelier 5 : le stockage, le traitement et l'utilisation du digestat	64
2.6. La gestion des risques.....	67
3^{EME} PARTIE : ETUDE FINANCIERE ET ECONOMIQUE	69
1. ETUDE FINANCIERE	69
1.1. Détermination des coûts des facteurs de production	69
1.1.1. Les investissements	70
1.1.2. Le fonds de roulement	72
1.1.3. Les charges d'exploitation.....	72
1.2. Détermination des recettes d'exploitation.....	73

1.3. Les amortissements	73
1.3.1. L'amortissement linéaire ou constant.....	74
1.3.2. L'amortissement accéléré.....	74
1.3.3. L'amortissement dégressif.....	74
1.4. Le compte d'exploitation prévisionnel.....	74
1.5. Evaluation de la rentabilité financière du projet.....	75
1.5.1. Valeur actuelle nette du projet (VAN)	75
1.5.2. Délai de récupération du capital investi (DRC)	76
1.5.3. Le taux de rendement interne (TRI)	76
1.5.4. Le taux de rendement externe (TRE)	76
1.5.5. Indice d'enrichissement (IR)	77
2. DISCUSSION SUR L'ETUDE FINANCIERE	77
CONCLUSION GENERALE	79
RECOMMANDATIONS.....	80
REFERENCES	81
APPENDICE	82
BIBLIOGRAPHIE	81
ANNEXES.....	96

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Sources de la biomasse.....	4
Tableau 2 : Production indicative en méthane de différentes matières.....	5
Tableau 3 : Production de gaz de différents substrats.....	6
Tableau 4 : Déjections animales journalières.....	6
Tableau 5: Composition chimique moyenne du biométhane.....	10
Tableau 6 : Rapport C/N par portion (kg) de diverses matières premières.....	16
Tableau 7 : Paramètres techniques pour le dimensionnement des digesteurs.....	17
Tableau 8 : Concentrations maximales admissibles de certaines substances inhibitrices.....	35
Tableau 9 : Consommation électrique par bimestre des Bâtiments d’habitation (Zone H)....	45
Tableau 10 : Consommation électrique par bimestre de l’infirmierie (Zone I) et les coûts bimestriels.....	46
Tableau 11 : Consommation électrique par mois du forage (Zone F) et les coûts mensuels...	47
Tableau 12 : Bilan cumulé de la consommation énergétique.....	48
Tableau 13 : Taux d’alimentation– Estimation de la puissance utile du monastère – A.....	49
Tableau 14 : Taux d’alimentation– Estimation de la puissance utile du monastère –B.....	50
Tableau 15 : Résistance des matériaux au biométhane.....	67
Tableau 16 : Projection financière du projet d’électrification.....	77
Tableau 17 : Programme des investissements.....	84
Tableau 18 : Estimation du besoin en fonds de roulement.....	85
Tableau 19 : Charges salariales.....	86
Tableau 20 : Autres charges d’exploitation.....	87
Tableau 21 : Frais de Formation des responsables de l’unité de biométhanisation.....	88
Tableau 22 : Les charges immobilisées.....	88
Tableau 23 : Annuités des immobilisations Corporelles.....	89
Tableau 24 : Prévision du Chiffre d’Affaire.....	90
Tableau 25 : Compte de résultat prévisionnel.....	91
Tableau 26 : Les flux financiers – partie 1.....	92
Tableau 27 : Les flux financiers –B –partie 2.....	93
Tableau 28 : Fiche synoptique du projet CBB.....	94

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Production en m ³ de biométhane par tonne de matière fraîche	7
Figure 2 : Schéma synoptique de l'unité de biométhanisation	15
Figure 3 : Vue en perspective d'un digesteur DUCELIER-ISMAN	19
Figure 4 : Digesteur type expérimenté au CIEH.....	19
Figure 5 : Digesteur type CIEH et gazomètre indépendants	20
Figure 6 : Digesteur à couvercle flottant avec joint d'eau - VD = 7,4 m ³	21
Figure 7 : Digesteur à couvercle flottant	22
Figure 8 : Digesteur à couvercle fixe avec cuve de régulation de pression accouplée	22
Figure 9 : Coupe schématique d'un digesteur).....	23
Figure 10 : Schéma de principe de l'installation d'une unité de biométhanisation.....	24
Figure 11 : Schéma de fonctionnement d'une unité de biométhanisation.....	25
Figure 12 : Ensemble schématique d'une unité de biométhanisation	26
Figure 13 : Les étapes biochimiques de la production du biométhane ou méthane biologique	27
Figure 14 : Vue de bactéries méthanogènes du type *Methanotrix thermophila en activité..	28
Figure 15 : Etapes de la réduction du gaz carbonique (CO ₂) en méthane (CH ₄).....	29
Figure 16 : Vue interne d'un digesteur industriel	34
Figure 17 : Comportement des micro-organismes vis-à-vis du facteur température	34
Figure 18 : Influence du pH du milieu de culture sur le taux de croissance des micro-organismes (Courbe adaptée aux bactéries mésophiles du type Escherichia coli).....	35
Figure 19 : Vue de la situation géographique du monastère de Keur Moussa	44
Figure 20 : Tracé de la Puissance Apparente Totale en fonction du temps d'alimentation T _m en heures	52
Figure 21 : Scénario d'approvisionnement en matières organiques	55
Figure 22 : Scénario d'approvisionnement en matières organiques	55
Figure 23 : Figure 2 3 : Vue d'ensemble de l'unité de biométhanisation	58
Figure 24 : Schéma d'assemblage des digesteurs	59
Figure 25 : Schéma d'Implantation d'un digesteur.....	60
Figure 26 : Vue de l'atelier 1.....	61
Figure 27 : Vue de l'atelier 3.....	65
Figure 28 : Vue de l'atelier 4.....	66
Figure 29 : Vue en coupe d'un digesteur.....	97

Figure 30 : Coupe longitudinale d'un digesteur	97
Figure 31 : Représentation d'un digesteur DUCELIER.....	98
Figure 32 : Coupe A-A' de la figure 31	98
Figure 33 : Coupe B-B' de la figure 31	99
Figure 34 : Digesteur à couvercle en caoutchouc - $V_D = 1 \text{ m}^3$	100
Figure 35 : Digesteur à couvercle fixe en dôme sphérique	100

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1	Les digesteurs discontinus du type DUCELIER ISMAN	98
Annexe 2	Les digesteurs semi-continus du type chinois	101
Annexe 3	Les concentrations inoffensives limites des principaux composants du biométhane	102
Annexe 4	Effets du sulfure d'hydrogène sur les humains, selon sa concentration	103
Annexe 5	Les effets des autres composants du biométhane	104
Annexe 6	Propriétés physiques du méthane	105
Annexe 7	Température de l'air et de l'eau froide de l'année 2006 (Région de Dakar et environs)	106
Annexe 8	Quelques données sur les gaz	107
Annexe 9	Population des collectivités administratives de la région de Thiès Année 2004	108
Annexe 10	Vue de la ferme d'élevage du monastère de Keur Moussa	109
Annexe 11	Vue de quelques appareillages annexes à l'unité de biométhanisation.....	110
Annexe 12	Appel à manifestation d'intérêt paru dans un quotidien national (mardi 3 juillet 2007)	111

LISTE DES SYMBOLES ET ABBREVIATIONS

B	Production spécifique de biométhane (m_g^3 / kg)
Bo	Nombre de bovins
BIO	Biomasse microbienne
C	Carbone
CH ₄	Méthane
CIEH	Centre Interafricain d'Etudes Hydrauliques
CO ₂	Gaz carbonique
CV	Taux de charge du digesteur ($\text{kg. MO} / \text{m}_f^3 \cdot \text{j}$)
C/N	Rapport carbone / azote
DCO	Demande chimique en oxygène (%)
E	Taux d'épuration des MO (%)
ESPT	Ecole Supérieure Polytechnique de Thiès
G	Production du biométhane (m_g^3 / j)
H	Hydrogène
h	Hauteur (m)
H ₂	Dihydrogène
H ₂ O	Eau
H ₂ S	Hydrogène sulfuré
i	Taux d'actualisation (%)
IR	Indice d'enrichissement
M	Charge journalière de MO (kg de M.O)
M _{in}	Masse totale de lisier entrante dans le digesteur (kg.MO)
M _{out}	Masse totale de lisier sortante du digesteur (kg.MO)
MO	Matières organiques
MPS	Matières premières solides
MS	Matière sèche (%)
N	Azote
O	Oxygène
O ₂	Dioxygène
Patm	Pression atmosphérique (Pa)
Po	Nombre de porcs

PCI	Pouvoir calorifique inférieur (kW/m^3 ou kcal/m^3)
PCS	Pouvoir calorifique supérieure (kW/m^3 ou kcal/m^3)
PV	Production volumique de biométhane ($\text{m}_g^3 / \text{m}_f^3 \cdot \text{J}$)
PVC	Polychlorure de Vinyle
Q	Débit volumique de l'influent (m_i^3)
Qd	Quantité de chaleur minimale à fournir au digesteur (joules par jour)
SENELEC	Société nationale d'électricité
STEP	Station d'épuration des eaux usées
TRE	Taux de rendement externe (%)
TRI	Taux de rendement interne (%)
TSH	Temps de séjour hydraulique (jours)
V	Volume du digesteur (m_f^3)
VAN	Valeur actuelle nette (F.CFA)
ΔH	Variation d'enthalpie (kcal)
μm	Micromètre
μ	Taux de croissance népérien ou vitesse de croissance des micro-organismes (heures^{-1})

INTRODUCTION

L'électricité contribue inéluctablement au confort et au bien être de la société humaine. Son rôle est essentiel dans le développement d'une nation et il demeure indispensable à de nombreuses technologies. La production d'électricité exige un combustible adéquat. Les matières premières fossiles (pétrole, gaz naturel) sont largement disponibles dans certaines régions, elles sont stockables à un coût relativement bas et elles sont faciles à transporter. Ces matières énergétiques offrent la souplesse requise pour satisfaire les besoins énergétiques d'un pays. Néanmoins, cette dépendance vis-à-vis du pétrole et de ses dérivés n'est pas sans conséquences car l'inégalité naturelle de la répartition des ressources fossiles, leur coût de transport et surtout la volatilité intrinsèque du mécanisme de fixation du prix du baril sont à l'origine des chocs pétroliers depuis des décennies à travers le monde.

En particulier dans les pays en voie de développement, cette situation entraîne de graves crises énergétiques. Encore que, dans nos pays, l'insuffisance des moyens de production d'électricité et les difficultés de gestion des entreprises productrices, les difficultés de distribution d'électricité, la vétusté des réseaux de distribution et la vulgarisation très faible des énergies alternatives et renouvelables limitent l'accès à l'électricité principalement dans les zones rurales. De surcroît, la population mondiale est estimée environ à six (06) milliards et plus de la moitié vit en zone rurale. Singulièrement, près de 90 % de cette population rurale mondiale, soient 2,8 milliards se retrouvent dans les pays en voie de développement. Il résulte de cette situation que les besoins fondamentaux d'éclairage des populations rurales sont à peine satisfaits¹. A l'échelle d'un pays, s'il est vrai que les énergies nouvelles et renouvelables ne sont en général pas compétitives par rapport aux sources d'énergie conventionnelles (pétrole, gaz naturel) et qu'elles ne peuvent les remplacer sans bénéficier de fortes subventions, il n'en demeurent pas moins que la valorisation de ces énergies alternatives : pour l'essentiel la biomasse, l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie géothermique et la petite hydroélectricité puissent réduire significativement la gravité du problème de l'accès à l'électricité. Cette solution peut s'inscrire dans le cadre d'une véritable stratégie de diversification des ressources et dans la visée de l'autonomie énergétique des zones rurales. Dans cette optique, le recyclage de la biomasse permet de produire le biométhane ; une matière énergétique riche en gaz méthane. La biomasse est largement disponible en milieu

¹ Conseil Mondial de l'Énergie, ONU. - L'énergie pour le monde de demain, le temps de l'action - Editions TECHNIP. 2000

rural. La production industrielle du biométhane s'effectue par le processus de la biométhanisation. La valorisation énergétique de la biomasse en zone rurale renferme également d'autres avantages : elle permet de freiner la déforestation en zone rural, elle représente un moyen de gestion efficace des déchets organiques, elle est une stratégie de lutte contre l'émission des gaz à effet de serre ².

Ce travail qui porte sur l'étude technique d'une unité de biométhanisation destinée à l'électrification rurale, s'applique au monastère de Keur Moussa situé géographiquement dans la région de Thiès. Ce monastère est habité environ par cinquante (50) personnes. Elles pratiquent des activités agro-pastorales dont l'élevage de porcs et de bovins. Les consommations d'électricité et du gaz combustible butane sont importantes. La crise énergétique actuelle posent de nombreux problèmes : les délestages intempestifs d'électricité, les pénuries du gaz butane et l'augmentation de leur prix d'achat. Le problème de l'accès à l'électricité est résolu temporairement par l'installation d'un groupe électrogène, ce qui entraîne également une consommation importante de gasoil. Ainsi, la valorisation de la biomasse existante à travers la mise en place d'une unité de biométhanisation pourrait résoudre le problème de l'accès à l'électricité. Elle permet en conséquence d'optimiser les dépenses financières.

La première partie de notre travail présente les différentes sources de la biomasse. Elle décrit aussi le processus de la biométhanisation, les diverses utilisations du biométhane et les avantages liés au développement du biométhane dans les zones rurales.

La deuxième partie est consacrée à l'étude en vue du choix des éléments technologiques de l'unité de biométhanisation du monastère de Keur Moussa. Dans cette partie, la démarche de conception consiste à faire l'inventaire des consommations électriques du monastère à partir des factures d'électricité, ensuite d'estimer la quantité journalière de biométhane pouvant satisfaire les exigences énergétiques et de définir le gisement minimum de matières organiques provenant de la biomasse. Enfin de réaliser les schémas technologiques des différents ateliers de l'unité de biométhanisation et de dimensionner ses principaux éléments.

La troisième partie étudie la faisabilité financière et économique de cette unité de biométhanisation.

² Nations Unies, apport du protocole de Kyoto à la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, 1998

Le processus de la biométhanisation aboutit à la production d'une source d'énergie renouvelable ; le biométhane ou biogaz. Cette partie comporte deux divisions principales, la première présente les sources de la biomasse, elle indique les valorisations et les avantages liés à la vulgarisation du biométhane en zone rurale. La deuxième division traite de la mise en place de l'unité de biométhanisation.

1. SOURCES DE LA BIOMASSE, VALORISATIONS ET AVANTAGES DU BIOMETHANE EN ZONE RURALE

1.1. Les sources de la biomasse

La majorité des ressources anthropiques sont transformables en biométhane, aussi certains milieux naturels libèrent des quantités de biométhane.

Les milieux anthropiques regroupent les biomasses primaires et secondaires. Ces biomasses renferment des matières organiques dont les composants essentiels sont les glucides, les protéines, les lipides. Elles sont variables suivant leurs natures et leurs potentiels de production de biométhane (Tableau 1 à 4, figure 1) :

- Elevage et déjections animales (lisiers et fumiers) ;
- Des biodéchets issus de l'exploitation agricole et forestière ;
- Biodéchets municipaux : Déchets ménagers et assimilés, ordures brutes ou résiduares triées ;
- Boues de stations d'épuration des eaux urbaines d'origine domestique et industrielle...

Parmi, les sources naturelles, nous pouvons citer :

- les rizières ;
- les fonds des marais
- les panses des ruminants, etc

Tableau 1 : sources de la biomasse ³

Végétaux	canne à sucre, herbes, pailles asséchées, déchets céréaliers (riz, maïs...)
Déchets d'origine animale	Lisier de bétail (vache, cheval, bœuf, mouton, porc...), lisier de volailles, déchets d'abattoir (caillot de sang, rejet de viande), déchets de pêche fourrure et laine
Déchets d'origine Humaine	Matières fécales, urine, ordures domestiques, déchets papiers
Sous produits agricoles et effluents industriels	Huiles végétales, bagasse, rejets des cultures de thé, déchets des industries de tabac, déchets des usines agro-alimentaires, Rejets (coton) des industries textiles, boues des usines sucrières et des stations d'épuration
Sous produits Forestiers	Feuilles mortes, branches, écorces
Déchets aquatiques	Algues marines, jacinthes, herbes marines

³ National Academy of Sciences, Methane generation from human, animal, and agricultural Wastes, Board on science and technology for international development, Washington, D.C, 1977

Tableau 2 : Production indicative en méthane de différentes matières ⁴

M.F.	% M.S.	% M.O. (de la M.S.)	% M.O. (de la M.F.)	C/N	Litres CH ₄ /kg M.O.
------	--------	------------------------	------------------------	-----	------------------------------------

Effluents d'élevage

Lisier bovin	8,5 (6 - 11)	76,5 (68 - 85)	6,5	10 - 17	230 (200 - 260)
Fumier bovin frais	18,5 (12 - 25)	75 (65 - 85)	13,9	14 - 25	250 (200 - 300)
Lisier porcin	6,1 (2,5 - 9,7)	72,5 (60 - 85)	4,4	5 - 10	355 (260 - 450)
Lisier de poules	19,5 (10 - 29)	76 (75 - 77)	14,8		300 (200 - 400)
Fientes de poules diluées	10,3 (7 - 13,5)	74,9 (70 - 80)	7,7		350 (250 - 450)
Fumier de mouton (frais)	27,5 (25 - 30)	80	22	14	450 (400 - 500)
Fumier équin (frais)	28	75	21	18	350 (300 - 400)

Déchets agricoles

Ensilage d'herbe	44 (26 - 62)	82,5 (67 - 98)	36,3		500
Trèfle	20	80	16	12	450 (400 - 500)
Paille de céréales	87,5 (85 - 90)	87 (85 - 89)	76,1	70 - 165	450 (300 - 600)
Paille de maïs	86	72	61,9	30	650 (600 - 700)
Feuilles de betteraves	16,5 (15 - 18)	79 (78 - 80)	13	15 - 16	450 (400 - 500)
Fanes de pommes de terre	25	79	19,8	16 - 25	550 (500 - 600)

Déchets agro-industriels

Pulpe de pommes	2,9 (2 - 3,7)	94,5 (94 - 95)	2,7	6	330
Pulpe de pommes de terre	13,5 (12 - 15)	90	12,2	3 - 9	250
Fruits broyés	45 (40 - 50)	61,5 (30 - 93)	27,7	30 - 50	400
Drêches de brasseries	18 (15 - 21)	90	16,2	9 - 10	380 (370 - 390)
Méasse	80	95	76	14 - 27	300
Déchets de légumes	12,5 (5 - 20)	83 (76 - 90)	10,53	12 - 27	600

Déchets communaux

Déchets ménagers organiques	27,5 (40 - 75)	50	28,8	25 - 80	400 (200 - 600)
Herbe fauchée (laîche...)	29,5 (22 - 37)	94,5	27,9	23	500
Boues flottantes (station d'épuration)	14,5 (5 - 24)	90,5	13,1		700 (600 - 800)

⁴ Bureau d'étude en environnement, énergie et mobilité - Sprl - Facilitateur en Biométhanisation, Rapport Vade mecum, Suisse

Tableau 3 : Production de gaz de différents substrats ⁵

Catégorie de Matières / lisiers	Production de biométhane Litre / kg Matière Organique	Méthane (CH₄) en %
Hydrate de carbone	790	50
Graisses	1250	68
Protéines	700	71
Lisier de bovins	350	62
Lisier de porcs	400	62

Tableau 4 : Déjections animales journalières ⁶

	Poids de l'animal en kg	Déjections (kg/ jour)	kg de M.O / jour
Vache Laitière	580	48	4,9
Porc engraisé	90	5,8	0,45
Poulet	1,8	0,135	0,022

⁵, ⁶ Bureau d'étude en environnement, énergie et mobilité -Sprl -Facilitateur en Biométhanisation, Rapport Vade mecum, Suisse

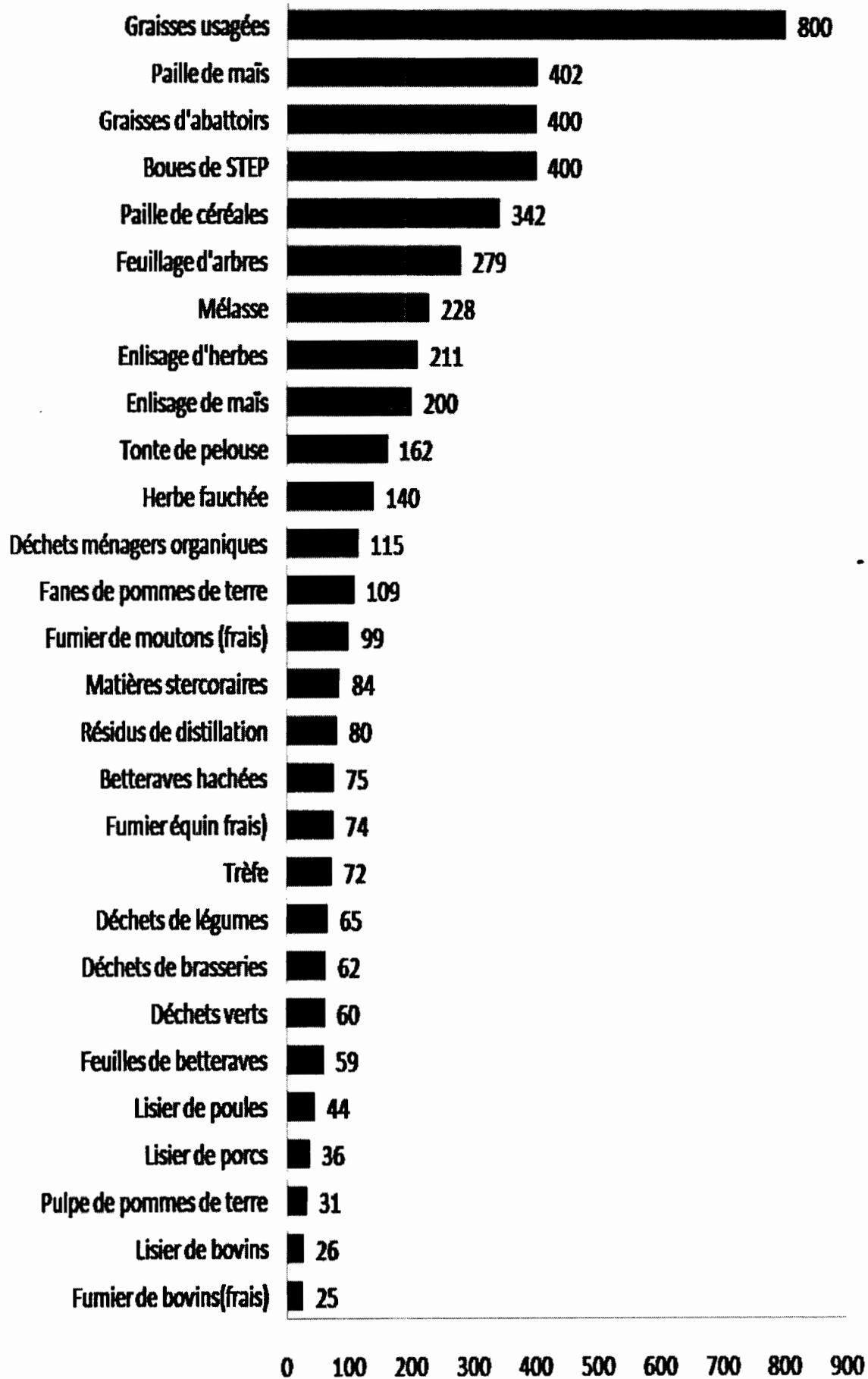


Figure 1 : Production en m³ de biométhane par tonne de matière fraîche

1.2. Valorisations et avantages du biométhane en zone rurale

1.2.1. Valorisations du biométhane

Les valorisations du biométhane sont multiples. Le choix des équipements est conditionné par le besoin prioritaire de l'utilisateur :

- La production d'électricité ;
- La production de chaleur ;
- gaz combustible pour la cuisson des aliments ;
- l'éclairage ;
- La carburation pour les engins agricoles etc.

L'utilisation du biométhane à une pression de plus de 4 bars nécessite au préalable une phase d'épuration (élimination de l'hydrogène sulfuré et l'eau).

1.2.2. Avantages de la vulgarisation du biométhane en zone rurale

L'installation d'une unité de biométhanisation en milieu rural renferme des avantages énergétique, environnemental, agronomique, et économique.

1.2.2.1. Bilan énergétique

Le biométhane apporte une solution au problème de l'énergie dans les zones rurales. Il est un gaz combustible qui peut remplacer le charbon de bois conventionnel destiné à la cuisine. Il permet ainsi de faire de substantielles économies de charbon. Dans un sens plus large, cette diminution de la demande de bois est un moyen de sauvegarder les forêts. Aussi, le biométhane peut être employé comme carburant dans des moteurs pour faire fonctionner des engins agricoles et mécaniser l'agriculture (pompe d'irrigation, etc.), ou encore alimenter les moteurs thermiques des générateurs d'électricité.

1.2.2.2. Bilan agronomique

Le développement du biométhane est un moyen efficace pour stimuler la production agricole, non seulement parce qu'il permet de restituer à l'agriculture les résidus de récolte mais également parce qu'il augmente la quantité et la qualité de l'engrais organique. Les matières organiques (les déchets animaux et humains, les résidus de récolte et les résidus végétaux, les feuilles mortes etc.) se décomposent après fermentation dans les digesteurs. L'azote contenu dans ces matières se retrouve en concentration relative souvent très élevée et se transforme en une forme ammoniacquée plus facilement assimilable par les plantes, tandis

que les éléments minéraux nutritifs persistent. A titre indicatif, l'ammoniac contenu dans un engrais organique fermenté 30 jours en anaérobiose s'accroît de 19,3 % et le contenu utile de phosphate s'accroît lui de 31,8 % ⁷.

1.2.2.3. Bilan environnemental

Le développement du biométhane est également un facteur d'amélioration de l'hygiène et de la santé dans les zones rurales. Il assure l'hygiénisation, la désodorisation, la limitation des risques de pollution organique et la limitation de l'émission des gaz à effet de serre :

- Pour l'hygiénisation ; la biométhanisation détruit une part importante des agents pathogènes, environ 99 % des germes pathogènes tels que les œufs de schistosome, les vers et les autres parasites, sont éliminés par digestion mésophile et 99,99% par digestion thermophile ⁸,
- Pour la désodorisation ; la fermentation limite fortement les odeurs olfactives émises par les effluents lors de leur épandage sur une terre agricole. A la fin du processus de la biométhanisation, les déchets organiques ne possèdent plus d'odeur gênante. cet intérêt est surtout déterminant pour des exploitations agricoles proches des lieux d'habitation,
- Pour la limitation des risques de pollution organique ; les modifications biochimiques effectuées lors du processus de méthanisation transforment le produit fermenté en un substrat moins polluant,
- Pour la limitation de l'émission des gaz à effet de serre ; le méthane contenu dans le biométhane est un gaz à effet de serre. Son utilisation dans des systèmes mécaniques évite qu'il soit naturellement émis dans l'atmosphère par les déchets organiques.

Enfin la valorisation énergétique des déchets organiques permet de résoudre en même temps le problème de l'évacuation des ordures.

1.2.2.4. Bilan économique

Le développement du biométhane permet de réduire les charges financières d'un exploitant agricole :

- L'utilisation des déchets organiques méthanisés comme engrais agricoles évite les achats

⁷ Héduit Michèle, La filière biométhane dans les pays en développement, éd. de l'institut de l'Energie des pays ayant en commun l'usage du français, publications du Québec, I 993. 82p

⁸ Bureau d'étude en environnement, énergie et mobilité -Sprl -Facilitateur en Biométhanisation, Rapport Vade mecum, Suisse

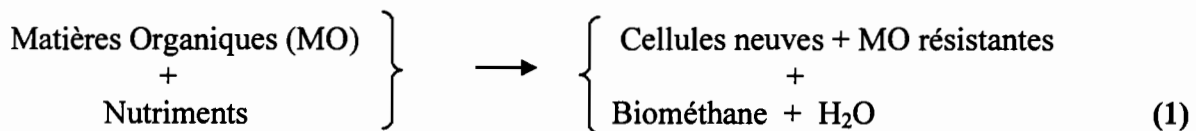
d'engrais minéraux ;

- l'autonomie en éclairage et en production d'électricité évite les dépenses relatives aux règlements des factures d'électricité ;
- l'utilisation du biométhane comme gaz combustible évite les dépenses liées à l'achat régulier du « gaz combustible standard butane » ;
- des redevances peuvent être perçues pour le traitement des déchets extérieurs à son site.

2. MISE EN PLACE DE L'UNITE DE BIOMETHANISATION

2.1. Définition de la biométhanisation

La biométhanisation, aussi appelée digestion anaérobie, fermentation méthanique ou méthanisation consiste à la dégradation par des microorganismes des MO. Cette dégradation conduit à la production du méthane biologique ou biométhane lorsqu'elle survient dans un milieu clos dépourvu d'oxygène (à l'abri de l'air) et sous certaines conditions de température, d'humidité et d'acidité :



2.2. La composition du biométhane et ses caractéristiques

Le biométhane est un mélange gazeux composé essentiellement de méthane combustible (50 à 90 % suivant la nature des MO) et de gaz carbonique (inerte). Le biométhane contient aussi d'autres gaz en faibles proportions tels que l'hydrogène sulfuré (0,1 à 0,5 %), l'azote (0,5 à 2 %), l'hydrogène (1 à 3 %), le monoxyde de carbone (moins de 0,1 %), l'argon, le nitrogène, l'ammoniac, et d'autres hydrocarbures de faible poids moléculaire (Tableaux 5).

Tableau 5 : Composition chimique moyenne du biométhane

Gaz	Concentration en %
Méthane (CH ₄)	50 – 90
Gaz carbonique (CO ₂)	10 – 40
Dihydrogène (H ₂)	1 – 3
Di-azote (N ₂)	0,5 – 2
Hydrogène sulfuré (H ₂ S)	0,1 – 0,5
Monoxyde de carbone (CO)	0,0 – 0,1

La présence conjointe d'eau et d'hydrogène confère au biométhane un caractère corrosif important. Le méthane pur est inodore. Lorsque le biométhane n'est pas soumis à une phase d'épuration, il a une odeur caractéristique « d'œuf pourri ». Cette odeur gênante est due principalement à la présence de l'hydrogène sulfuré (H₂S).

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) est un paramètre important de classification des combustibles. Il désigne la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une quantité de combustible considéré. Comme le méthane est le composant majoritaire :

PCI biométhane \approx teneur en méthane (en %) \times PCI méthane,

A la pression atmosphérique :

$$\blacksquare \text{ PCI biométhane } \approx \% \text{ en méthane } \times 9,965 \text{ kWh / m}^3 \quad (2)$$

A 20°C et à 10 kPa de pression, la solubilité du méthane est faible : uniquement 3 m³ de CH₄ peuvent être dissous dans 100 m³ d'eau. Le masse moléculaire du méthane est de 16,04 g/mole. La combustion d'une molécule de méthane libère 212 kcal, selon la réaction chimique suivante : $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \quad \Delta H = - 212 \text{ kcal} \quad (4)$

2.3. Matériel nécessaire à la mise en place de l'unité de biométhanisation

La mise en place de l'unité de biométhanisation nécessite cinq (5) ateliers (figure 2) :

- L'atelier de stockage et de préparation des matières organiques (atelier 1);
- Le digesteur (atelier 2);
- L'atelier d'épuration et de stockage du biométhane (atelier 3);
- L'atelier d'utilisation du biométhane (atelier 4) ;
- L'atelier de traitement aérobie et de stockage du digestat (atelier 5).

2.4. Fonctionnement et exploitation des différents ateliers

2.4.1. Atelier 1 : le stockage et la préparation des matières organiques avant leur admission dans le digesteur

L'atelier 1 sert au broyage et au mélange homogène des matières premières avant leur admission dans le digesteur (atelier 2) sous forme de boue. Au niveau de l'atelier 1, il faut s'assurer de disposer d'une réserve suffisante en matières organiques pour permettre une alimentation journalière du digesteur. Cette réserve de matières organiques devrait permettre

une autonomie au moins de 30 jours. L'atelier 1 est relié au digesteur par une tuyauterie en PVC. Une pompe permet le transfert des matières organiques de l'atelier 1 vers le digesteur.

2.4.1.1. Composition des matières organiques

Quelle que soit leur origine, les matières organiques contiennent principalement des lipides, des glucides, des protéines, auxquels s'ajoutent des composés plus ou moins dégradables telle que la lignine. Ces éléments possèdent des teneurs variables en Carbone (C), en Hydrogène (H), en Oxygène (O), en Azote (N) dont dépendent directement la quantité et la qualité du biométhane (tableau 7). Il faut tout de suite préciser que les glucides représentent souvent jusqu'à 75 % de la matière sèche organique et ils se retrouvent sous forme de cellulose libre, d'hémicellulose ou de complexes ligno-cellulosiques. La cellulose libre est aisément et totalement transformable en méthane tandis que les complexes ligno-cellulosiques échappent pour une bonne part à la fermentation méthanique. La lignine quant à elle, n'est pratiquement pas digestible par les micro-organismes. Il en résulte même que 25 à 35 % de la matière organique hydrocarbonée n'est pas utilisable directement par les bactéries cellulolytiques anaérobies⁹. De ce fait, il est clair que les quantités de biométhane obtenues, seront très différentes selon le type de déchet organique introduit dans le digesteur.

2.4.1.2. Taux de dilution des matières premières dans l'eau

Le mélange de produits organiques admis dans le digesteur doit être sous forme pâteuse (boue) et homogène avec une concentration de 1 kg de matière organique par litre d'eau (1 kg de M.O. / 1 d'eau)¹⁰, ou bien avec une teneur en eau telle que le poids de l'eau représente 90 % du poids des matières premières solides¹¹. L'excès, ou le défaut d'eau sont également préjudiciables. Car un excès d'eau entraîne la chute de la production par unité de volume dans

⁹ Demeyer, A., Jacob, F., Jay, M., Menguy, G., Perrier, J. , La conversion bioénergétique du rayonnement solaire et les biotechnologies, Technique et documentation Lavoisier, 1982

¹⁰ National Academy of Sciences, Methane generation from human, animal, and agricultural Wastes, Board on science and technology for international development, Washington, D.C, 1977

¹¹ Jack W., White, W., McGrew & M. R. Sutton, Symposium Papers: energy from biomass and wastes, Institute of Gas technology volume 1, USA, 1978

la cuve de fermentation, à l'inverse un manque d'eau provoque l'accumulation d'acide acétique, et peut freiner le processus de la biométhanisation.

2.4.1.3. Caractéristiques des matières premières

Avant la mise en place de l'unité de biométhanisation, il serait intéressant pour obtenir des résultats fiables de définir grâce à des tests biochimiques, la composition particulière des échantillons de matières organiques. Ces tests permettent de vérifier certains critères.

a. La matière sèche (M.S.)

Les matières premières doivent renfermer au moins 10% de Matière Sèche (M.S.), et Cela est possible grâce à l'apport de matières organiques riches en matières grasses (graisses végétales, tontes de pelouses, déchets végétaux, etc.). L'apport de celles-ci va non seulement favoriser la production de méthane et de surcroît réduire la teneur en soufre du biométhane.

b. Le rapport C/N des matières organiques

Les matières premières doivent comporter des teneurs spécifiques en carbone, en azote et en sels minéraux. Le rapport carbone/ azote (C/N) est un paramètre très important et Il doit se maintenir au niveau optimum de 30/1 ; c'est-à-dire 30 parties de carbone par partie d'azote, et il ne doit jamais être supérieure à 35 /1¹². Si le rapport C/N devient élevé, la production de biométhane se réduit à cause du manque de nitrogène, aussi si ce rapport est trop bas, la quantité excessive d'ammoniac peut devenir toxique à la survie des micro-organismes anaérobies¹³. Ce rapport varie également selon le type de déchet organique (tableau 6). Alors pour optimiser la production de biométhane, il est nécessaire que les matières premières pauvres en carbone soient combinées avec les matières riches en nitrogène, et vice-versa afin de conserver un rapport C/N adéquat. De manière pratique, le rapport C/N d'un mélange de MO peut se calculer approximativement par la formule suivante ¹⁴:

^{12, 14} Intermediate technology, Manuel du biogaz chinois, London, 1981

¹⁴ Petit Jacques, Le compost : théorie et pratique, 3 éd, Mandeville, Québec : Editions L'oiseau moqueur, 1988, c 1976

$$R_m = \frac{n_1 \times R_1 + n_2 \times R_2 + \dots + n_i \times R_i}{n_1 + n_2 + \dots + n_i} \quad (5)$$

R_m : Rapport C/N du mélange

R_1 : Rapport C/N du composant 1

R_2 : Rapport C/N du composant 2

R_i : Rapport C/N du composant 2

n_1 : Quantité du composant 1

n_1 : Quantité du composant 2

n_i : Quantité du composant i

Quel que soit le type de déchet organique pris isolément, il n'est pas capable de respecter tous les critères. C'est pour cette raison que pour optimiser la production de biométhane, il serait intéressant de pratiquer une co-digestion c'est-à-dire l'apport d'autres déchets organiques (tels que les déchets domestiques, des déchets de jardin, le fumier de bovin, le fumier de cheval etc. qui sont largement disponibles).¹⁵

¹⁵ Petit Jacques, Le compost : théorie et pratique, 3 éd, Mandeville, Québec : Editions L'oiseau moqueur, 1988, c 1976

*Atelier 3 : L'épuration et stockage du
Biométhane*

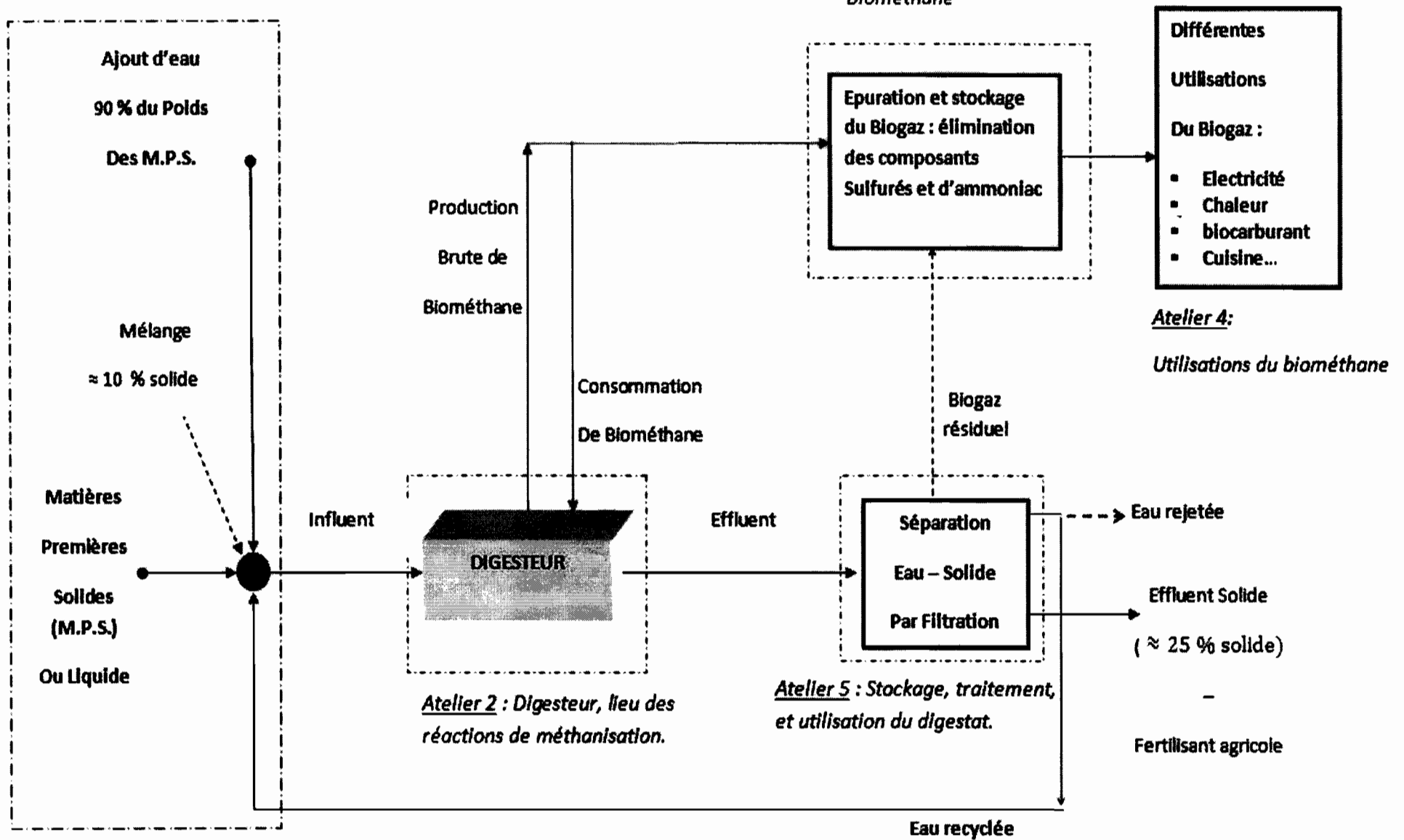


Figure 2 : Schéma synoptique de l'unité de biométhanisation

2.4.2. Atelier 2 : le digesteur

L'atelier 2 reçoit les matières organiques qui proviennent de l'atelier 1. A l'intérieur du digesteur, les matières organiques subissent une décomposition bactérienne en anaérobiose. Il en résulte une émission de gaz. Le digesteur est le cœur de l'unité de biométhanisation, il nécessite une attention particulière depuis sa conception jusqu'à son exploitation.

2.4.2.1. Constitution et paramètres techniques du digesteur

Un digesteur se caractérise par plusieurs paramètres techniques (tableau 7). Il comporte principalement les éléments suivants:

- une cuve de fermentation ou réacteur ;
- un système de régulation de température ;
- un système de brassage et de mélange ;
- une sortie et d'une entrée de substrat ;
- une sortie de gaz.

2.4.2.2. Les technologies de conception d'un digesteur

A l'heure actuelle, la classification des digesteurs permet de distinguer 3 grandes familles :

- les digesteurs discontinus ;
- les digesteurs semi-continus conventionnels ;
- les digesteurs continus.

La fermentation est dite continue lorsque le contenu du digesteur est renouvelé par portion, la fermentation est dite discontinue lorsque le digesteur est chargé en une seule fois et que la fermentation est prolongée jusqu'à épuisement des matières organiques.

Tableau 6 : Rapport C/N par portion (kg) de diverses matières premières ¹⁶

Matières premières	Rapport C/N
Urine	0.8
Purin	2 - 3
Sang séché	3
Lisier de porc	5 - 7
Matières fécales	6 - 10
Matières végétales vertes	7
Poudre d'os	8
Lisier de bovins	8 - 13
Humus, terre noire	10
Vieux compost de fumier	10
Fumier frais de poule	10
Résidus de curage des fossés	10 - 15
Boues d'épuration domestique	11
Déchets de cuisine	12 - 20
Gazon	12 - 25
Déchets de légumes	13
Déchets de brasserie	15
Fanes de légumineuses	15
Luzerne	16-20
Marc de café	20
Fumier de bovins	20
Herbe	20
Déchets de jardin	20-60
Fanes de pommes de terre	25
Fumier de cheval	25
Aiguilles de pin	30
Tourbe noire	30
Ordures domestiques	30-40
Tourbe brune ou blonde	30-50
Feuillages	30-60
Résidus de culture de champignons	40
Paille de légumineuses	40-50
Feuilles mortes	45
Paille d'avoine	50-60
Paille de seigle	65
Paille de millet	70
Paille de blé	70-150
Écorce	100-130
Bois de taille	100-150
Sciure fraîche	100-500
Sciure en voie de décomposition	200

¹⁶ Petit Jacques, Le compost : théorie et pratique, 3 éd, Mandeville, Québec : Editions L'oiseau moqueur, 1988, c 1976

Tableau 7 : Paramètres techniques pour le dimensionnement des digesteurs¹⁷

Symbole	Définition	unité
V	Volume utile du digesteur	m_f^3
G	Production de biométhane par jour	m_g^3 / j
Q	Débit volumique de l'influent	m_i^3 / j
M	Charge initiale : concentration en kg de Matière Sèche (M.S.), de Matière Organique (M.O.) ou de Demande Chimique en Oxygène (D.C.O.) dans l'influent	kg/ MS ou, kg/ MO ou kg/ DCO
TRH ou TSH	Temps de rétention (ou de séjour) hydraulique moyen de l'effluent dans le Réacteur = V/Q	j
CV	Taux de charge : quantité d'effluent par m^3 de fermenteur et par jour = M / V	$kg/mf^3.j$
PV	Production volumique : production de biométhane par m^3 de fermenteur et par jour = G/V	$mg^3 / mf^3.j$
B	Production spécifique : production de biométhane par kg d'effluent = G / M	mg^3 / kg
E	Taux d'épuration ou rendement : quantité dégradée par quantité d'influent = $(Mout/Min) * 100$	%

a. Les digesteurs discontinus

Dans cette gamme, ils existent 2 principaux types de digesteur :

- Le réacteur Ducellier-Isman (figure 3, annexe –figure 29 à 33-);
- Le digesteur du CIEH ou « puits » (figure 4,5) ;

Ces digesteurs s'adaptent aux produits solides. Ils sont caractérisés par un fonctionnement par cycle c'est-à-dire :

- Une opération de chargement ;
- La période de fermentation jusqu'à épuisement du substrat ;
- Une opération de déchargement.

¹⁷ Bureau d'étude en environnement, énergie et mobilité -Sprl -Facilitateur en Biométhanisation, Rapport Vade mecum, Suisse

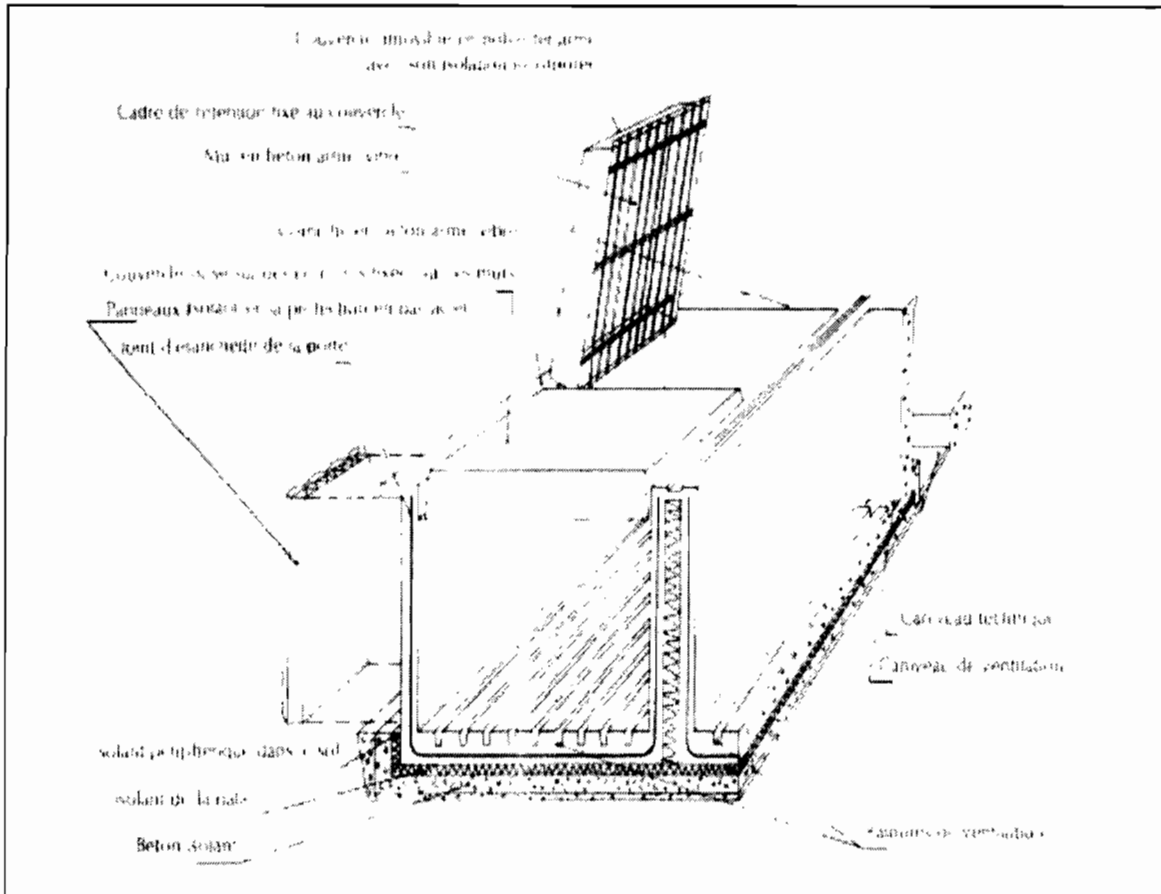


Figure 3 : Vue en perspective d'un digesteur DUCELIER-ISMAN

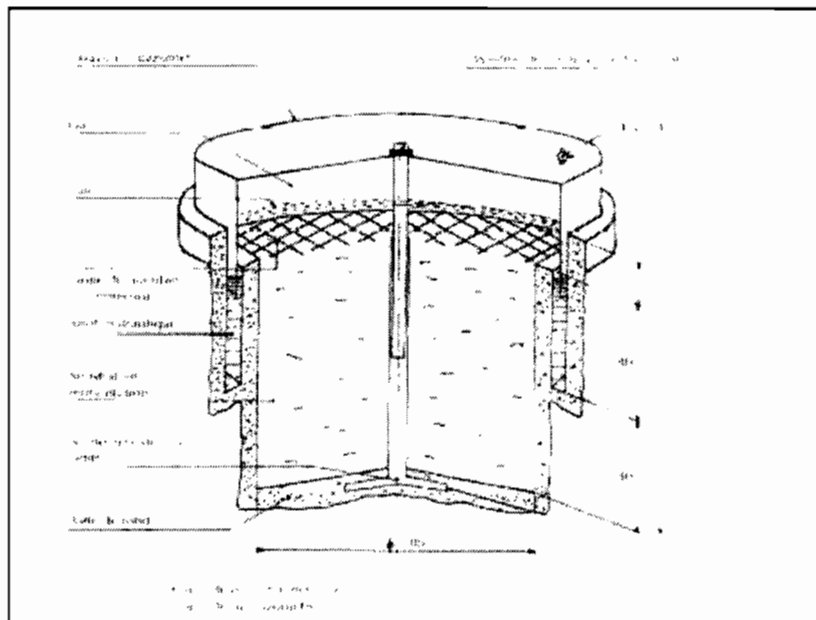


Figure 4 : Digesteur type expérimenté au CIEH

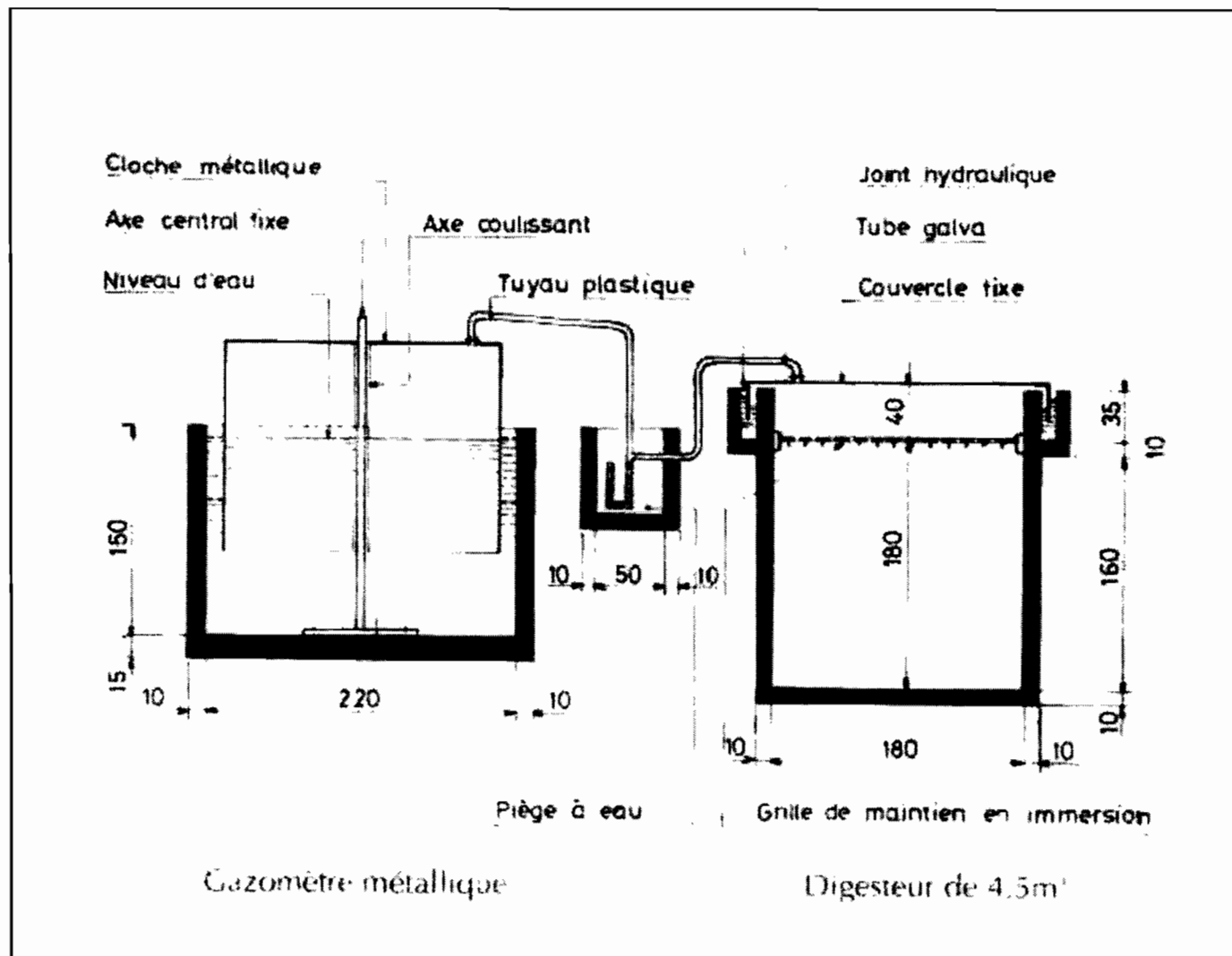


Figure 5 : Digesteur type CIEH et gazomètre indépendants

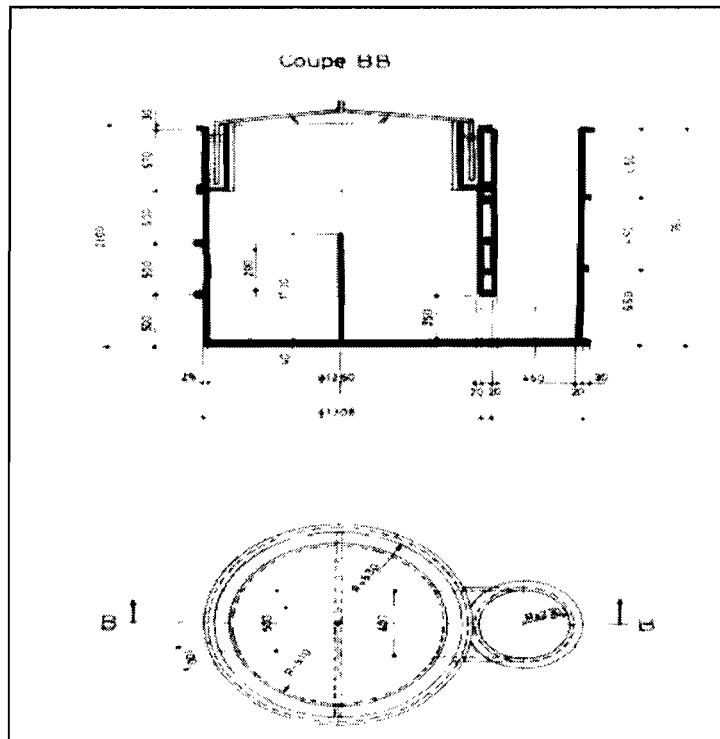


Figure 7 : Digesteur à couvercle flottant avec joint d'eau en ciment armé de grille d'acier - $V_D = 2,4 \text{ m}^3$.

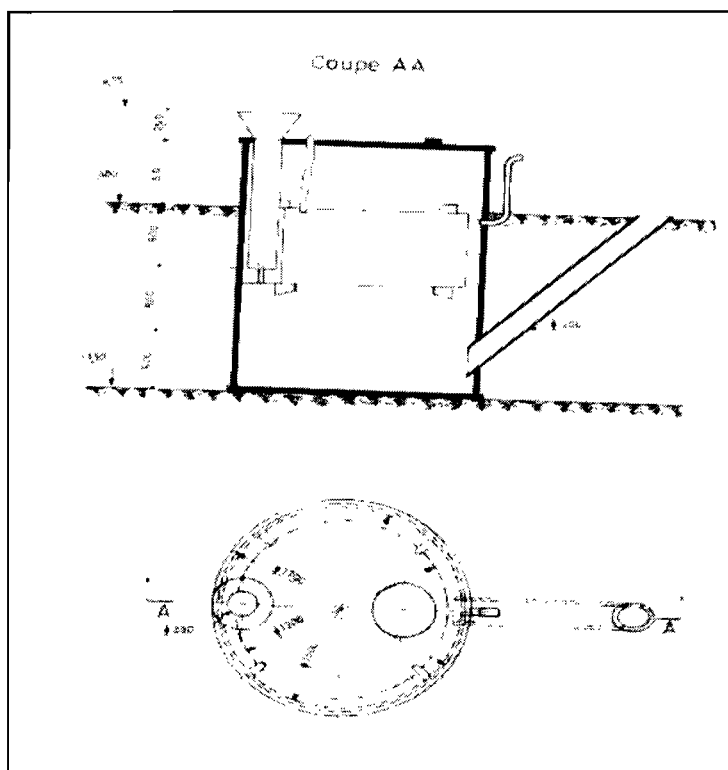


Figure 8 :

Digesteur à couvercle fixe avec cuve de régulation de pression accouplée avec cuve de digestion en béton armé de grilles d'acier - $V_D = 3 \text{ m}^3$.

c. Les digesteurs continus

Cette famille comprend 4 principaux types de digesteurs :

- Procédé à piston (figure 9);
- Procédé infiniment mélangé (figure 10);
- Cellule fixées ou lit fixé (figure 11);
- Procédé contact (figure 12).

Ces digesteurs sont caractérisés par une alimentation et une évacuation régulière des matières organiques. Ils sont plus particulièrement adaptés à des effluents liquides, excepté le procédé piston. Le procédé piston s'adapte à la fois aux effluents liquides et aux effluents solides.

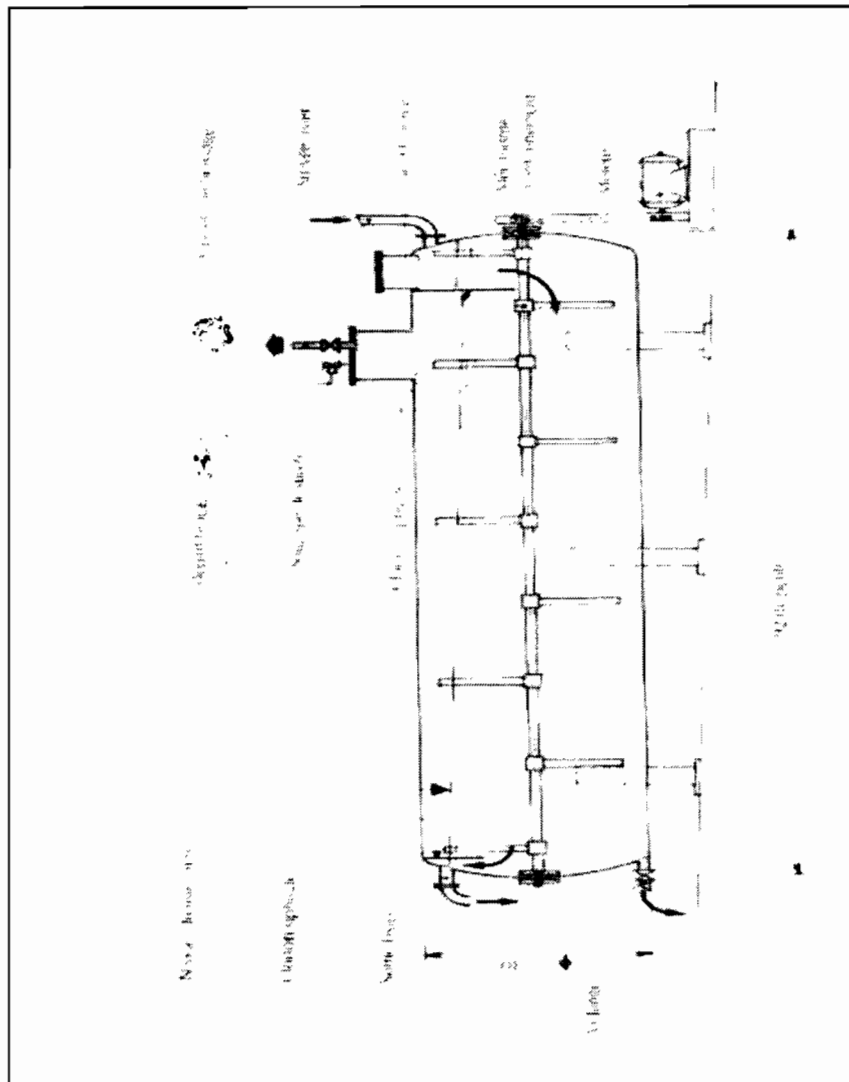


Figure 9 : Schéma de principe d'un digesteur

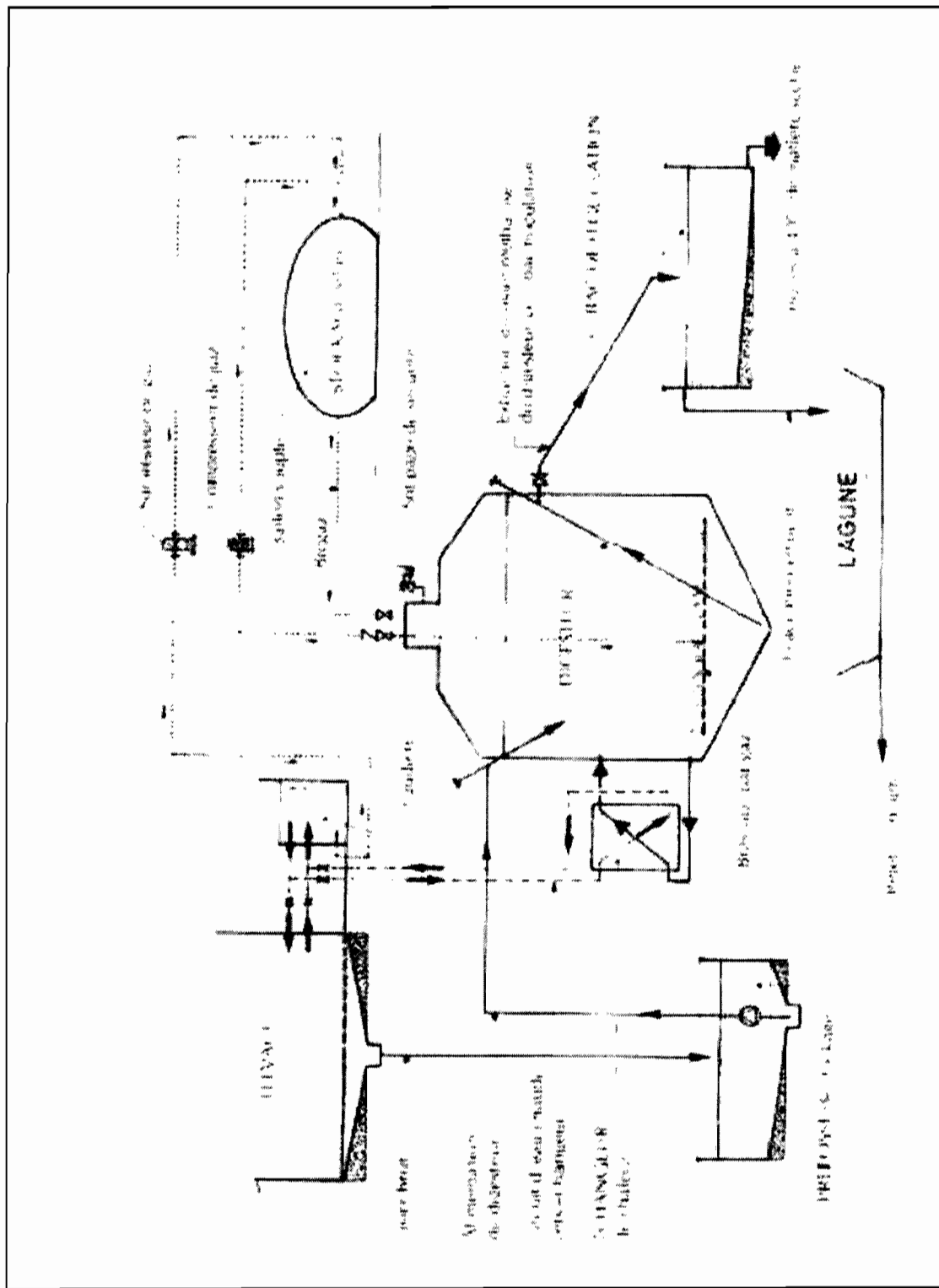


Figure 10 : Schéma de principe de l'installation d'une unité de biométhanisation

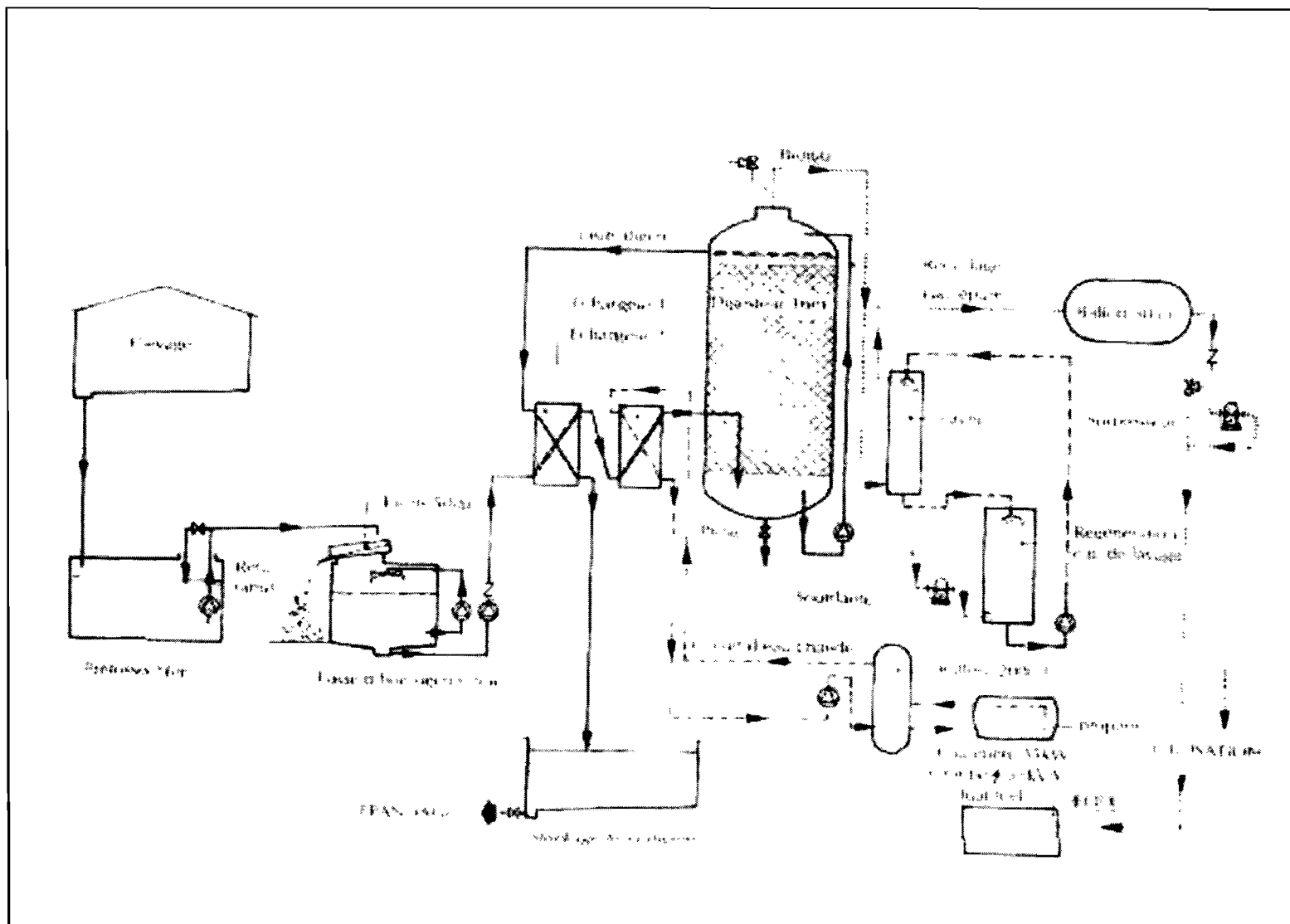


Figure 11 : Schéma de fonctionnement d'une unité de biométhanisation –Digesteur à cellules fixes

2.4.2.3. Les étapes de production du biométhane au sein des digesteurs

La production du biométhane (méthane CH_4 + gaz carbonique CO_2) se déroule suivant des processus microbiologiques et biochimiques complexes (figure 13).

Les matières organiques contiennent principalement des lipides, des glucides, des protéines, auxquels s'ajoutent des composés plus ou moins dégradables tel que la lignine. Ces éléments possèdent des teneurs variables en Carbone (C), en Hydrogène (H), en Oxygène (O), en azote (N) dont dépendent directement la quantité et la composition du biométhane.

Le processus microbiologique de la production de biométhane peut se résumer en quatre (4) étapes : l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse, la méthanogénèse. Durant tout ce processus, des bactéries spécifiques interviennent à chaque étape, exactement comme pour la digestion des aliments¹⁸

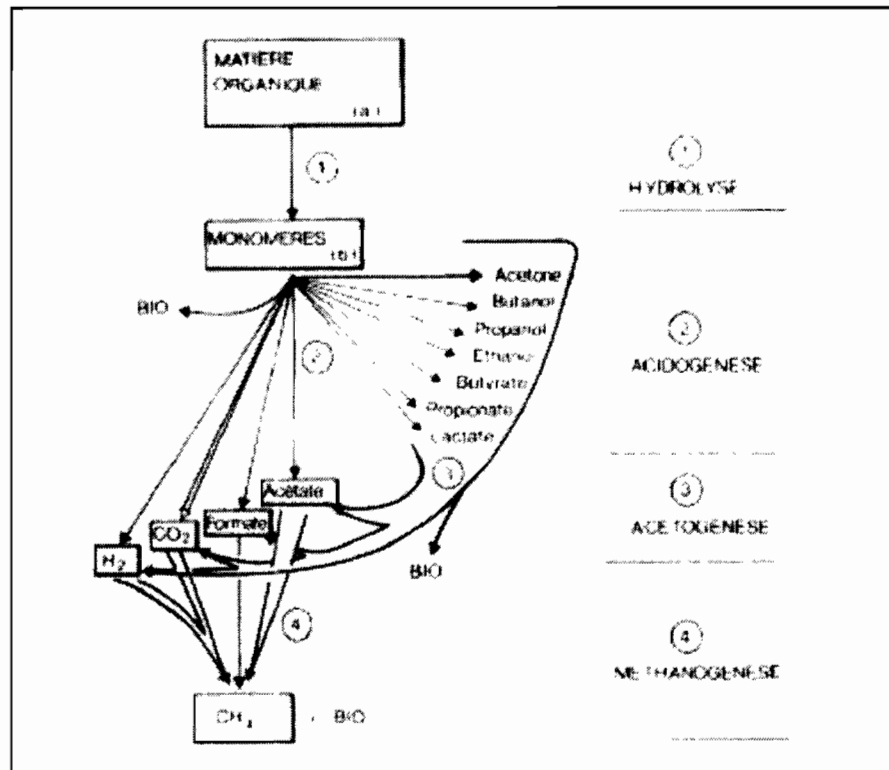


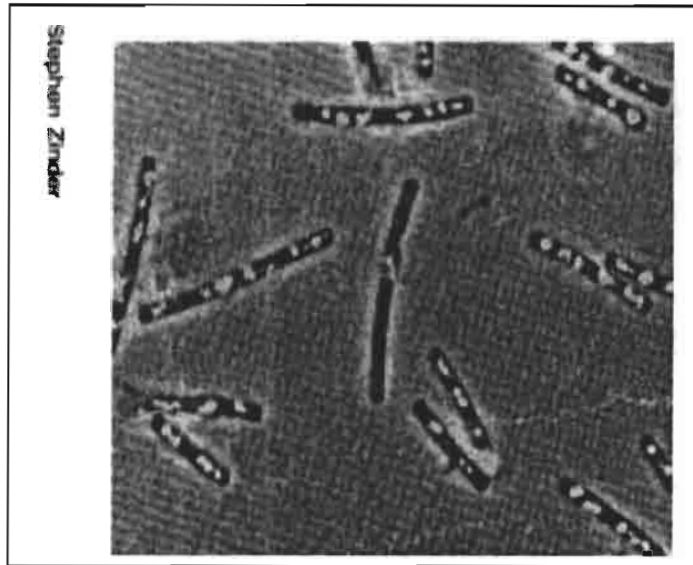
Figure 13 : Les étapes biochimiques de la production du biométhane ou méthane biologique

BIO : Biomasse microbienne

(a) : Polysides, protéines, lipides, etc.

(b) : sucres simples, acides aminés, acides gras, etc.

¹⁸ Demeyer, A., Jacob, F., Jay, M., Menguy, G., Perrier, J., La conversion bioénergétique du rayonnement solaire et les biotechnologies, Technique et documentation Lavoisier, 1982



**Figure 14 : Vue de bactéries méthanogènes du type **Methanotherx thermophila* en
Activité ¹⁹**

Note : *Leur croissance est optimale aux alentours de 60 °C. Sur cette photo, chaque cellule mesure 1 micromètre (μm) de diamètre et à l'intérieur des cellules, on observe des vésicules de gaz.

a. Les étapes d'hydrolyse et d'acidogène

Cette étape est assurée par diverses bactéries hydrolytiques (*Bacteroides ruminicola*, *Bifidobacterium* etc.), et des bactéries acidogènes qui peuvent être anaérobies strictes ou facultatives (où on peut retrouver les *Clostridium*, *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Streptococcus* etc.) Ces bactéries transforment la matière organique complexe à savoir les molécules polysaccharidiques comme la cellulose, la pectine, la chitine ; les molécules d'hydrates de carbone et les chaînes moléculaires ; les protéines ; les graisses ; les lipides ; les glucides ; et bien d'autres en des molécules plus simples à savoir les acides gras volatils (AGV) comme l'acide acétique, l'acide propionique, l'acide butyrique ; et les alcools tels que le méthanol, l'éthanol, le propanol, le butanol. A cette étape, il se produit également une certaine quantité d'hydrogène (H_2) et de dioxyde de carbone (CO_2) résultant de la conversion des lipides et des protéines.

¹⁹ Madigan et al, Biology of Microorganisms, Prentice Hall Int., 1997

b. L'étape d'acétogénèse

Il se produit une conversion des produits de l'acidogénèse principalement en acétate (CH_3COO^-), en dioxyde de carbone (CO_2) et en dihydrogène (H_2). Cette phase est réalisée par les bactéries acétogènes comme *Pelobacter carbinolicus*, *Synthrophobacter wolinii*, *Synthrophomonas wolfei*, *Clostridium thermoaceticum*, *Clostridium formicoaceticum*, *Methanobacillus omelianskii*, *Desulfovibrio* etc. Le métabolisme de ces bactéries n'est cependant possible que si l'hydrogène (H_2) produit (y compris celui de l'acidogénèse) est éliminé au fur et à mesure. Par contre, La pression partielle du milieu en hydrogène (H_2) doit toujours être comprise entre 10^{-6} atmosphère et 10^{-4} atmosphère (10^{-6} atm. < Pression d'hydrogène < 10^{-4} atm) car il faut un minimum d'hydrogène pour réaliser la réduction du gaz carbonique en méthane^{20,21}.

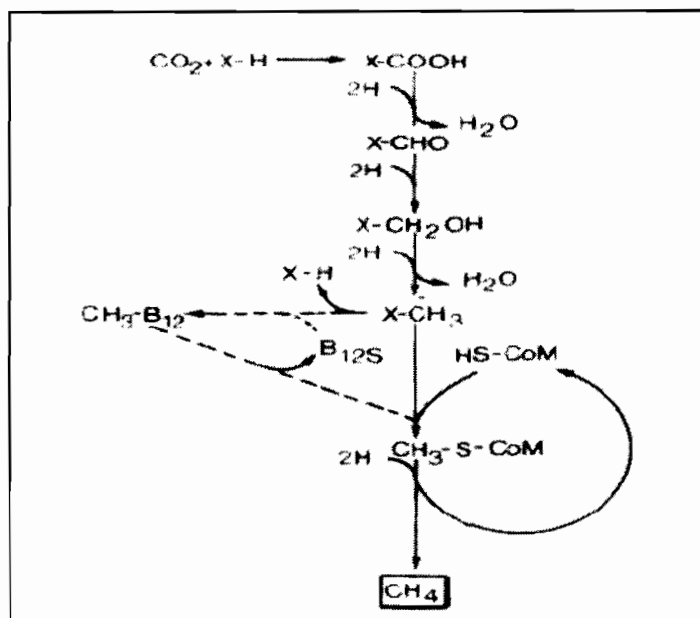


Figure 15 : Étapes de la réduction du gaz carbonique (CO_2) en méthane (CH_4) (Schéma de BARKER modifié GOTTSCALK)

-X : Transporteur de structure inconnue
 - HS - CoM : Coenzyme M

- B_{12}S : Hydridocobalamine

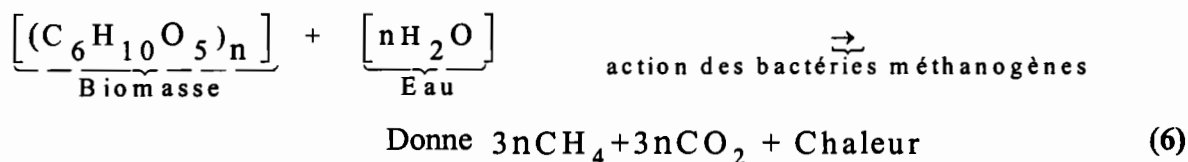
²⁰ Bureau d'étude en environnement, énergie et mobilité -Sprl -Facilitateur en Biométhanisation, Rapport Vade mecum, Suisse

²¹ Demeyer, A., Jacob, F., Jay, M., Menguy, G., Perrier, J., La conversion bioénergétique du rayonnement solaire et les biotechnologies, Technique et documentation Lavoisier, 1982

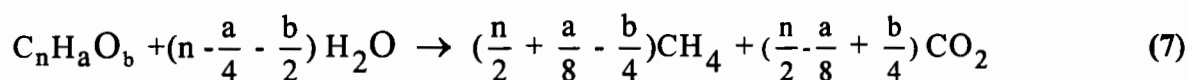
c. L'étape de la méthanogénèse

A cette dernière étape, l'hydrogène est normalement utilisé par les bactéries méthanogènes hydrogénophiles (Methanobrevibacter et Methanobacterium etc.) pour réduire le gaz carbonique en méthane tandis que l'acétate est transformé par les bactéries méthanogènes acétoclastes (Methanosarcina, Methanococcus, Methanosaeta etc.) en méthane. Aussi d'autres voies intermédiaires de production de méthane se produisent simultanément. Il faut rappeler que toutes les bactéries méthanogènes vivent en milieu dépourvu strictement d'air et ont besoin d'une quantité spécifique d'azote (rapport C/N).

A cette phase de méthanogénèse, le processus biochimique se déroule suivant la réaction complète ci-après⁹:

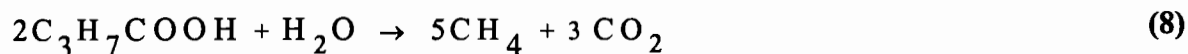


Le processus précédent peut se représenter par l'équation stœchiométrique de *Buswell* :

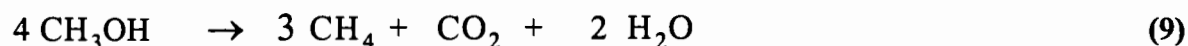


D'autres réactions chimiques individuelles surviennent pendant le processus de la biométhanisation :

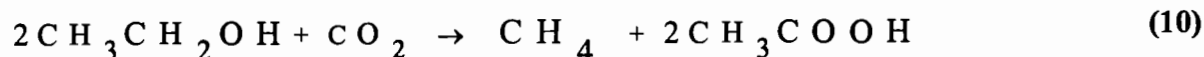
- **L'acide est décomposé en méthane ;**



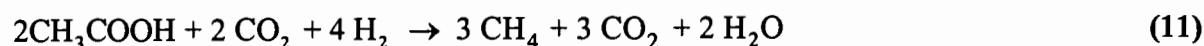
- **L'oxydation du méthanol par le CO₂ pour produire du méthane ;**



- **L'oxydation de l'éthanol par le CO₂ pour produire du méthane et de l'acide acétique ;**



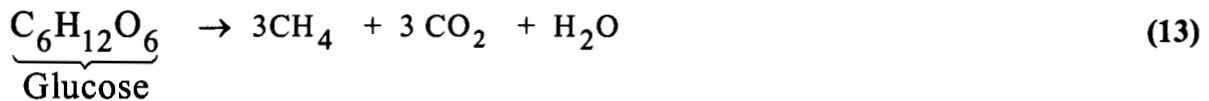
- **la réduction de l'acétate ou acide acétique pour produire du méthane ;**



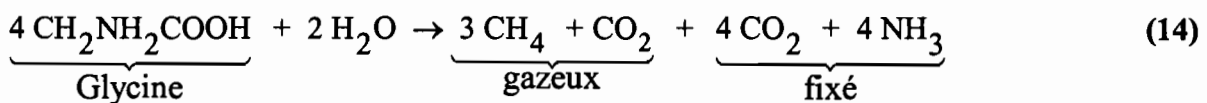
- La réduction avec l'hydrogène du gaz carbonique pour produire du méthane ;



- La décomposition des glucides $[(\text{CH}_2\text{O})_n]$ en méthane et en gaz carbonique ;



- La décomposition des protéines en acides aminés (exemple de la glycine) qui à leur tour produisent le méthane, le gaz carbonique, l'ammoniac et l'hydrogène sulfuré en quantités variables ;



2.4.2.4. Conditions d'optimisation de la production du biométhane au sein des digesteurs

La production de biométhane exige un milieu anaérobie, une certaine concentration en ammoniac et un rapport C/N optimal. Elle exige aussi des conditions particulières de température et de potentielle d'oxydoréduction, de pH et une absence de substances inhibitrices.

a. Condition anaérobie et potentiel d'oxydoréduction

L'anaérobie est une condition sine qua non au développement, à la reproduction et au métabolisme des bactéries méthanogènes. La production de méthane n'est possible que dans un milieu strictement dépourvu d'oxygène. La décomposition des matières organiques en présence d'oxygène produit par contre du dioxyde de carbone ; il est donc primordial que le milieu de fermentation des substrats soit à l'abri de l'air et de l'eau, car même de simples traces de dioxygène dans le milieu vont tuer les bactéries méthanogènes.

Le potentiel d'oxydoréduction du milieu doit être de l'ordre de -300 mV .

b. L'agitation des substrats dans le digesteur

L'agitation n'est pas nécessaire pour que la fermentation méthanique s'installe néanmoins:

- elle permet d'homogénéiser les conditions du milieu et de maîtriser le transfert des matières. Aussi elle évite la formation non contrôlée des volumes morts et des courts-circuits à l'intérieur du réacteur,
- D'une part, elle optimise l'instauration et le réensemencement de la flore microbienne anaérobie. D'autre part, elle assure une multiplication des contacts entre le substrat à digérer et la flore microbienne fixée.
- Elle évite les sédimentations incontrôlées responsables de la diminution du volume utile du réacteur. Enfin, elle favorise les transferts thermiques, ioniques et métaboliques ; en particulier elle facilite la dégazéification des boues en accélérant la coalescence des bulles produites à la surface des agrégats de matière organique et de micro-organismes ^{22,23}.

Cette agitation peut s'effectuer manuellement, par des équipements mécaniques (Figure 16), ou hydrauliques ou encore par récirculation d'une partie du biométhane ²⁴.

c. La température des substrats dans le digesteur

La production biologique de méthane est optimale dans trois régimes de température (figure 17) ²⁵:

- Haute température ou digestion thermophile : [45° C à 65° C] ;
- Moyenne température ou digestion mésophile : [25° C à 45° C] ;
- Température normale ou digestion psychrophile : [15 à 25°C].

Si le climat est défavorable les réacteurs peuvent nécessiter un chauffage. L'apport de chaleur dans la cuve de fermentation est très importante car elle va contribuer à stimuler

^{22, 24} Demeyer, A., Jacob, F., Jay, M., Menguy, G., Perrier, J.

La conversion bioénergétique du rayonnement solaire et les biotechnologies,
Technique et documentation Lavoisier, 1982

²³ Intermediate technology, Manuel du biogaz chinois, London, 1981

²⁴ Ross E., McKinney, Microbiology for sanitary engineers. Department of Civil Engineering, University of Kansas, USA /New-York, Mc Graw-Hill, 1962

l'activité des micro-organismes, à stériliser le substrat (destruction d'agents pathogènes nocifs), à améliorer la biodégradabilité des matières organiques, donc à accélérer la fermentation méthanique et la production de biométhane ²⁶. Il est nécessaire de tenir compte des données météorologiques de la région (Annexe 7). Le chauffage se réalise avec l'emploi d'un échangeur de chaleur externe ou interne ²⁷; par circulation d'eau chaude dans une jaquette périphérique, soit par une paroi chauffante ou soit par un serpentín immergé dans le fermenteur ou tout autre technique adéquate. En plus, la conservation de la chaleur au sein des digesteurs requiert une isolation thermique convenable (figure 16). L'isolation permet de maintenir une température relativement stable parce qu'un brusque changement de température supérieur à 3° C peut bloquer la production de biométhane ⁹. Les matériaux d'isolation peuvent être d'origine synthétique (polyuréthane expansé, polystyrène expansé ou extrudé, etc.) ou d'origine naturelle (laine de verre, laine de roche, terre, argile granulaire expansée, vermiculite. etc.).

c.1. La digestion thermophile

La haute température accélère la dégradation des matières organiques par les microorganismes et conduit à la production de gros volumes de biométhane. Dans ce cas, le temps de séjour des substrats est moins long, en moyenne 3 à 6 jours et de ce fait la cuve de fermentation peut avoir un volume réduit par rapport à d'autres types de cuves. Par contre, ce digesteur consomme parfois beaucoup plus d'énergie pour maintenir la température de fonctionnement requise et peut être plus sensible aux variations de températures. Mais Il n'en reste pas moins qu'ils éliminent plus efficacement les organismes pathogènes.

c.2. La digestion mésophile

Du fait que les systèmes mésophiles opèrent à des températures plus basses, les micro-organismes sont plus lents à dégrader les matières organiques, ce qui se traduit par un temps

²⁶ Demeyer, A., Jacob, F., Jay, M., Menguy, G., Perrier, J., La conversion bioénergétique du rayonnement solaire et les biotechnologies, Technique et documentation Lavoisier, 1982

²⁷ National Academy of Sciences, Methane generation from human, animal, and agricultural Wastes, Board on science and technology for international development, Washington, D.C, 1977

de séjour en digesteur plus long : de 15 à 20 jours ou plus. Par contre, les systèmes mésophiles semblent plus robustes par rapport aux variations de températures.

c.3. La digestion psychrophile

Ces systèmes sont très stables et faciles à gérer. Toutefois, ils sont moins attrayants parce que le rendement net en termes de production de biométhane et d'élimination des agents pathogènes semble moins grand que celui des autres systèmes.

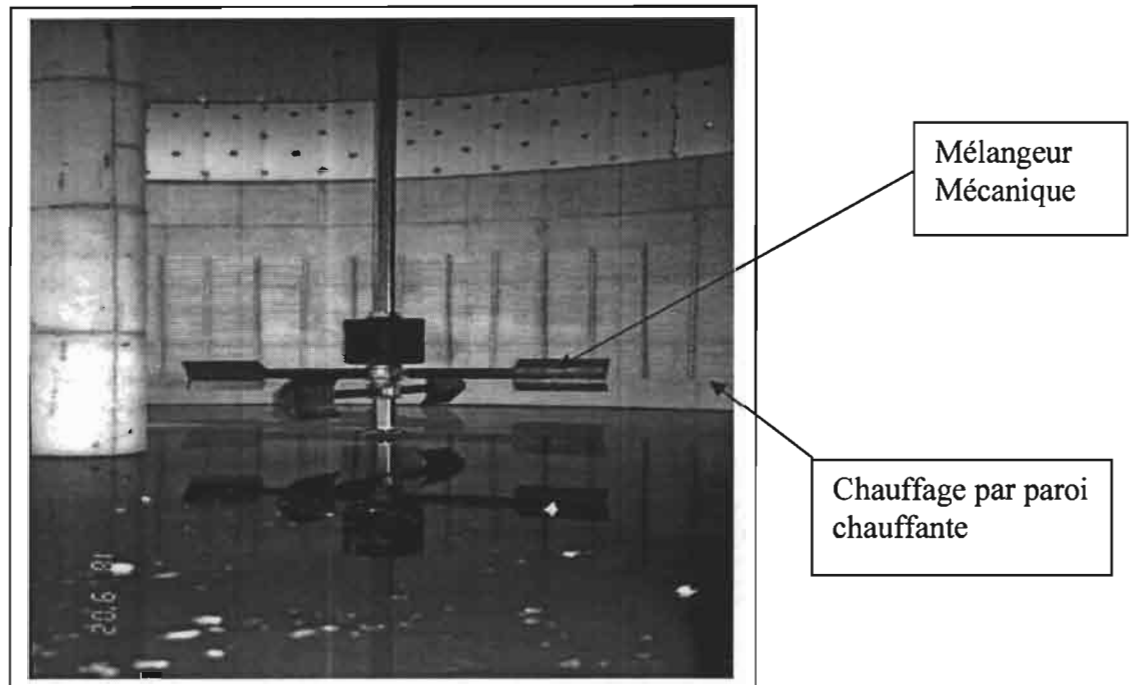


Figure 16 : Vue interne d'un digesteur industriel

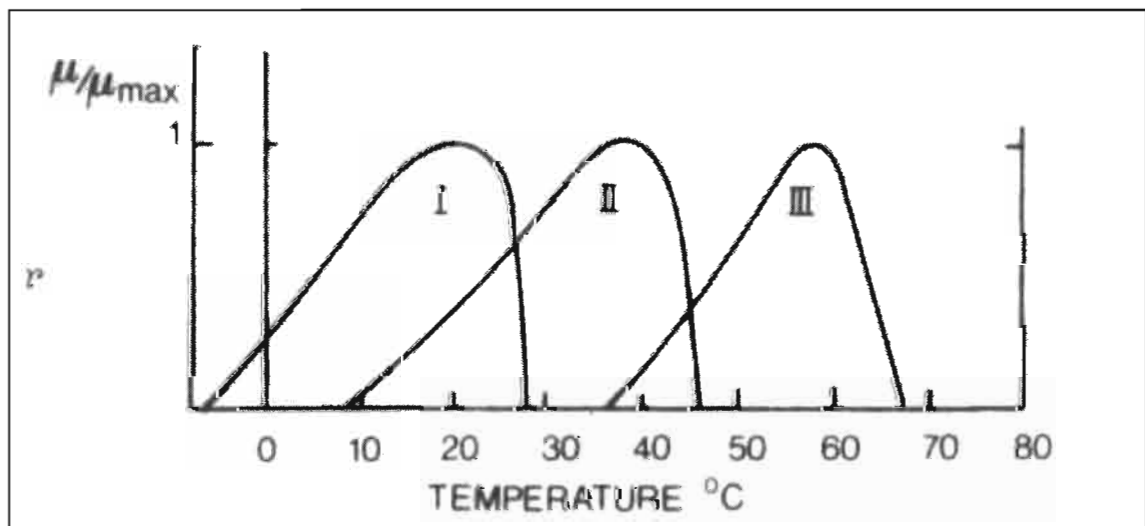


Figure 17 : Comportement des micro-organismes vis-à-vis du facteur température

I : Souche psychrophile

II : Souche mésophile

III : Souche thermophile

μ : le taux de croissance népérien ou vitesse de croissance des micro-organismes s'exprimant en t^{-1} (t =temps)

d. Maintien d'un pH adéquat

Le milieu de fermentation méthanique exige un pH neutre ou légèrement alcalin. Le pH idéal se situe entre 7 et 8,5. Cette plage favorise une croissance optimum des micro-organismes (figure 18). Aussi, si le pouvoir tampon du milieu en fermentation est insuffisant, il peut résulter une acidification du milieu par accumulation d'acides gras volatils. Cette acidification bloque la production de méthane. Pour un déroulement normal du processus de fermentation, la concentration en acide volatil mesuré par l'acide acétique doit être inférieure à 2000 ppm .

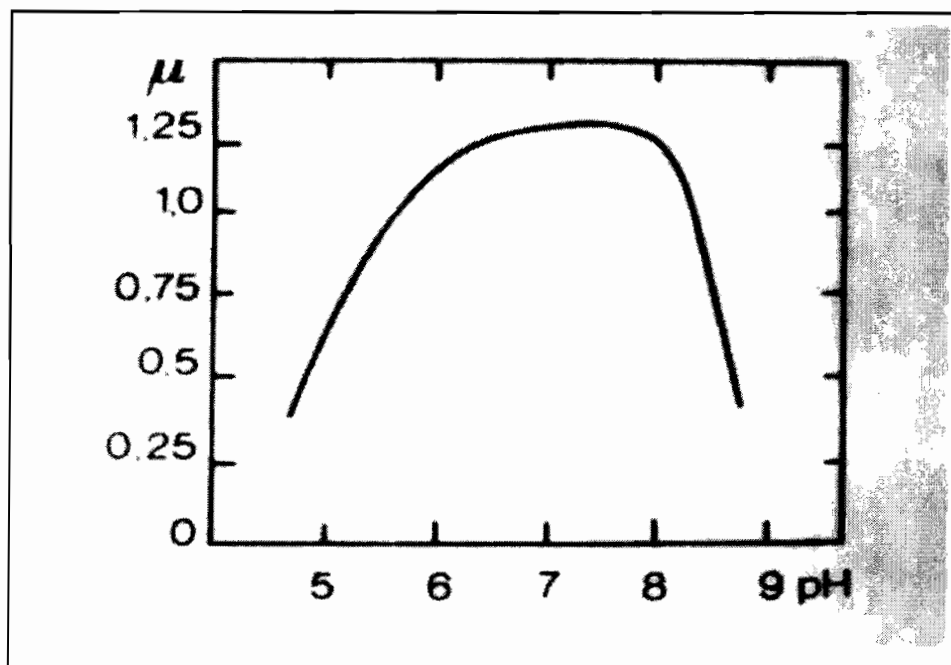


Figure 18 : Influence du pH du milieu de culture sur le taux de croissance des micro-organismes (Courbe adaptée aux bactéries mésophiles du type Escherichia coli)

e. L'élimination de substances inhibitrices à la biométhanisation

L'absence de substances inhibitrices à la fermentation est de rigueur. L'utilisation massive d'antibiotiques ou de certains oligo-éléments dans l'alimentation animale n'est pas favorable à la synthèse du biométhane. Egalement, l'excès de sels conduisant à une conductivité élevée ou la présence de certains métaux lourds toxiques cause des dysfonctionnements dans le processus de biométhanisation. A titre indicatif, les

concentrations maximales admissibles de certaines substances inhibitrices sont indiquées dans le tableau 8 :

Par exemple, la présence de sulfate (S O_4^{2-}) au delà de la concentration admissible dans le milieu peut modifier le flux du substrat disponible pour les bactéries méthanogènes. En effet, des bactéries sulfato-réducteurs peuvent oxyder une partie du substrat (principalement par l'intermédiaire de l'hydrogène $-\text{H}_2$ -) en utilisant le sulfate (S O_4^{2-}) comme accepteur d'électrons, et dans une telle situation, le substrat est converti en sulfure (S^{2-}) plutôt qu'en méthane surtout si le pH du milieu est acide⁴.

Egalement, l'azote ammoniacal (NH_3) peut être quant à lui un facteur de stimulation biochimique à faible concentration mais devient gravement inhibiteur de la méthanogénèse au delà de 3g/l (rapport C/N). Même si certaines expériences mettent en évidence une adaptation des micro-organismes jusqu'à 5 g/l d'azote ammoniacal et qu'il semble que ce soit la forme non ionisée qui soit toxique. En somme, toutes ces substances doivent être totalement absentes, ou diluées par addition d'eau.

Tableau 8 : Concentrations maximales admissibles de certaines substances inhibitrices²⁸

Sulfate (S O_4^{2-})	5000 parties par million (p.p.m.)
Ammoniac (NH_3)	1500-3000 milligrammes par litre (mg/l)
Chlorure de sodium (NaCl)	40 000 p.p.m.
Cuivre (Cu)	100 mg/L
Chrome (Cr)	200 mg/L
Nickel (Ni)	200-500 mg/L
Cyanure (CN^-)	moins de 25 mg/L
ABS (Détersif composé)	20-40 p.p.m.
Sodium (Na)	3500-5500 mg/L
Potassium (K)	2500-4500 mg/L
Calcium (Ca)	2500-4500 mg/L
Magnésium (Mg)	1000-1500 mg/L.

²⁸ Intermediate technology, Manuel du biogaz chinois, London, 1981

f. Emploi de levains et prétraitement des substrats

La toute première mise en route d'un procédé de biométhanisation peut être extrêmement longue (plusieurs semaines pour les digesteurs mésophiles, et plus pour les digesteurs psychrophiles). Ce long temps de latence peut s'expliquer par des taux de croissance très faibles des bactéries méthanogènes et qui de surcroît, sont substituées par des bactéries fermentaires productrices de gaz carbonique, d'hydrogène et d'acétates. Afin de réduire ce temps non productif, il s'avère judicieux d'introduire des levains dans les matières organiques fraîches avant leur admission dans le digesteur. Ces levains peuvent être du digestat collecté au niveau de digesteurs déjà en activité ²⁹.

Par ailleurs, pour améliorer la production de biométhane, un prétraitement thermique des matières organiques avant l'admission dans le digesteur est utile. Ce prétraitement permet d'augmenter la biodégradabilité des fractions résistantes telles que les composés lignocellulosiques. Les meilleurs résultats peuvent s'obtenir par chauffage d'une heure, à 130 °C en milieu acide (pH 1) ou à 200° C en milieu alcalin (pH 13). Le premier cas entraîne une solubilisation maximale de la cellulose libre ou liée ; le second cas entraîne quant à lui une solubilisation maximale de la lignine. Toutefois cette méthode peut nécessiter des dépenses énergétiques importantes tant en produits chimiques qu'en chauffage ³⁰.

g. Durée d'un cycle de production de biométhane

Dans la réalité, les différentes étapes de la biométhanisation (hydrolyse et acidogénèse, acétogénèse, méthanogénèse) peuvent se chevaucher et la durée de chaque étape reste difficile à estimer par une analyse analytique, encore moins le temps de séjour des matières dans le digesteur ou bien la durée d'un cycle de transformation des matières organiques en biométhane. Toutefois, le temps de séjour dépend du type de digesteur, du taux de biodégradabilité des matières organiques, du procédé adopté (discontinu ou continu), de la température de fonctionnement. Il dépend aussi des objectifs que l'on se donne, soit une productivité maximale en méthane, soit une conversion complète du carbone organique et stabilisation des boues digérées.

²⁹ , ²⁹, ³⁰ Demeyer, A., Jacob, F., Jay, M., Menguy, G., Perrier, J, La conversion bioénergétique du rayonnement solaire et les biotechnologies, Technique et documentation Lavoisier, 1982

Certaines données empiriques indiquent les temps de séjour (durée d'un cycle) de biométhanisation :

A titre indicatif, la durée de mise en route d'un cycle mésophile (en moyenne à 35 ° C) varie entre cinq et six semaines. Tout ce temps permet de récupérer 80 % du méthane potentiel. Dès sa mise en route, la méthanisation continue aussi longtemps que les matières organiques sont chargées dans le digesteur. Néanmoins ce cycle peut être considérablement raccourci soit en pratiquant une préfermentation aérobie, soit en inoculant avec des boues digérées, soit en utilisant un procédé continu ou en fonctionnant avec un digesteur thermophile ³¹. Par ailleurs, il faut noter que pour un digesteur mésophile, l'on ne peut pas descendre en dessous de 7 à 10 jours. Egalement, la biométhanisation mésophile (25° C à 45° C) d'un lisier de bovins contenant 10 % de matière sèche peut se réaliser en 20 jours tandis qu'une biométhanisation thermophile (45° C à 65° C) nécessite seulement 3 à 6 jours si la matière sèche est comprise entre 6 et 12% ³².

h. Taux de Charges en matière organique

Il est important d'ajuster correctement la quantité de matières organiques introduite dans le digesteur. S'il y a une surcharge du digesteur, il se produit très rapidement une accumulation d'acides organiques qui inhibe la méthanogénèse, alors le digesteur se limite simplement à l'acidification des substrats. Le taux de charge peut être calculé exactement et il dépend du débit volumique de l'influent, de la charge initiale et du volume utile du digesteur (tableau 7).

3.3. Atelier 3 : l'épuration et le stockage du biométhane

Le biométhane sortant du digesteur (atelier 2) est acheminé vers l'atelier 3 par l'intermédiaire d'une tuyauterie (type PVC). Cette tuyauterie comporte **une vanne d'arrêt, un dispositif anti-retour de flammes et un séparateur** (purgeur automatique de l'eau de condensation). Au niveau de l'atelier 3, le biométhane est soumis à une phase d'épuration avant son stockage dans un réservoir convenable et étanche.

^{31, 32} Demeyer, A., Jacob, F., Jay, M., Menguy, G., Perrier, J, La conversion bioénergétique du rayonnement solaire et les biotechnologies, Technique et documentation Lavoisier, 1982

3.3.1. Le système d'épuration

L'épuration du biométhane permet d'améliorer son efficacité énergétique. Cette épuration élimine principalement le gaz carbonique (CO_2) et le sulfure d'hydrogène (H_2S). Le gaz carbonique étant non combustible, le biométhane non épuré est moins calorifique (18 à 25 MJ/m^3 selon la proportion de CO_2) que le CH_4 épuré (35,5 MJ/m^3). L'élimination du gaz carbonique permet également de diminuer le volume de stockage du gaz. L'élimination des composés sulfurés, surtout le sulfure d'hydrogène (H_2S), permet une désodorisation du biométhane qui ne sent plus l'œuf pourri. De plus, les risques de corrosion des métaux sont réduits.

3.3.1.1. Les méthodes de traitement et d'épuration du biométhane

Ils existent plusieurs techniques d'épuration du biométhane notamment (tableau 13):

- La biofiltration,
- L'Adsorption,
- L'absorption,
- L'épuration par limaille de fer FeO ou Fe_2O_3 ,
- La cryocondensation,
- La séparation membranaire.

a. La biofiltration

Cette technique met en jeu une dégradation biologique par des micro-organismes aérobies fixés sur un support poreux. Mais elle n'est pas du tout appropriée parce qu'elle entraîne à la fois une dégradation de l'hydrogène sulfuré et du méthane.

b. L'adsorption

Cette technique qui est simple à mettre en place, permet un transfert de la phase gazeuse vers la surface solide d'un adsorbant. Sa maintenance est facile. Mais elle exige un remplacement de l'adsorbant après chaque opération et un traitement minutieux de l'adsorbant usagé.

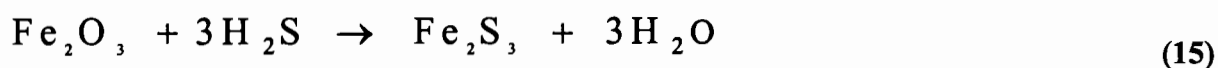
c. L'absorption

L'épuration s'effectue par l'intermédiaire d'un transfert entre la phase gazeuse (le biométhane) et une phase liquide (la solution aqueuse). La phase liquide peut être soit une solution au chlorure de calcium (CaCl), soit une solution de soude (NaOH), soit simplement une solution d'eau (H₂O). L'élimination est rendue possible puisque le gaz carbonique (CO₂) est très soluble (878 cm³/l à 20°C) au contraire du méthane (CH₄) (34 cm³/l à 20°C). L'hydrogène sulfuré (H₂S) est encore plus soluble que le CO₂. Cette technique est très courante cependant elle exige un traitement de l'effluent liquide.

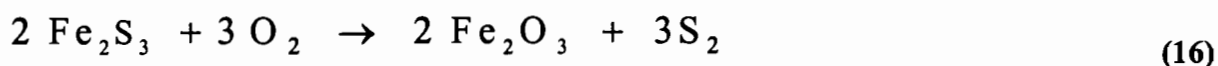
d. L'épuration par circulation du biométhane sur une masse de limaille de fer

L'hydrogène sulfuré (H₂S) est piégé par passage du gaz sur de la limaille de fer (monoxyde de fer : FeO ou trioxyde de fer : Fe₂O₃) selon les réactions chimiques suivantes :

- Epuration



- Régénération



Un volume d'au moins 0,0352 m³ de limaille de fer permet d'éliminer 3,7 kg de sulfure. Durant la phase d'épuration, à une teneur d'environ 0,2 % d'hydrogène sulfuré (H₂S) présent dans le biométhane, ce même volume de fer permet d'éliminer tout l'hydrogène sulfuré dans un volume d'environ 2500 m³ de biométhane. Durant la phase de régénération, cette limaille de fer est exposée à l'air afin de décomposer le sulfure de fer (Fe₂S₃) formé en oxyde de fer (Fe₂O₃) et en sulfure élémentaire (S₂)³³. Cette technique est simple à mettre en place mais présente des problèmes de sécurité et de saturation du produit ferreux.

e. La cryo-condensation

³³ National Academy of Sciences, Methane generation from human, animal, and agricultural Wastes, Board on science and technology for international development, Washington, D.C, 1977

L'épuration se fait par transformation des composés volatils en liquide ou solide suite à un refroidissement du gaz (abaissement de la température). Cette technique est lourde à mettre en place.

f. La séparation membranaire

Le biométhane est séparé de ses impuretés par circulation à travers une membrane poreuse. Cette technique a l'avantage d'être propre, simple et compact.

3.3.2. Le système de stockage

La cuve de stockage du biométhane produit au cours du processus de la biométhanisation est une annexe importante au digesteur :

- Soit, elle peut être à volume constant et à pression variable.
- Soit le stockage se fait à volume variable et à pression constante : il peut s'agir d'un ballon souple gonflé par le gaz; d'un gazomètre à cloches. Ces équipements peuvent être soit séparés ou soit directement rattachés au digesteur. La pression du gaz dépend des volumes de stockage.

4.4. L'atelier 4 : Les utilisations du biométhane

L'atelier 4 renferme les équipements spécifiques à l'usage envisagé du biométhane. Cet atelier 4 est relié à l'atelier 3 par l'intermédiaire d'une tuyauterie (type PVC). Cette tuyauterie comporte une soufflerie à gaz réglée en surpression, une vanne d'arrêt commandée par l'utilisateur et un dispositif anti-retour de flammes. Ces équipements annexes facilitent les opérations d'utilisation du biométhane.

L'électrification du site nécessite l'installation d'un groupe turboalternateur adapté au biométhane. Le biométhane sous tiré de l'atelier 3 alimente la turbine. L'alternateur transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

4.5. L'atelier 5 : le stockage, le traitement et l'utilisation du digestat

Les matières restantes (digestat) dans le digesteur sont évacuées vers l'atelier 5 où elles sont soumises à un traitement aérobie. Le transfert des matières entre l'atelier 3 et l'atelier 5 se fait par l'intermédiaire d'une tuyauterie du type PVC. Le digestat devient très pauvre en

matières organiques. Il présente aussi un rapport carbone/azote faible, principalement à cause de la perte de carbone sous forme de biométhane. De ce fait, le digestat perd son pouvoir méthanogène.

Au niveau de l'atelier 5, l'on peut séparer les parties solides et liquides du digestat à l'aide d'un équipement de filtration. Le digestat liquide peut être partiellement ou totalement recyclé vers l'atelier 1 pour préparer un nouveau mélange de matières organiques fraîches. Le digestat solide est un fertilisant agricole et ses qualités agricoles deviennent plus grandes par rapport à des déchets organiques non méthanisés.

4.5.1. Valeur fertilisante du digestat

La totalité de l'azote contenu dans le fumier ou le lisier est conservée lors de la méthanisation. En revanche, l'azote change de forme. Au départ, présent sous forme d'azote organique dans les déjections fraîches, il se retrouve sous forme d'ion Ammonium NH_4^+ dans le digestat. L'ammonium est une forme d'azote plus facilement assimilable par les plantes mais est très volatile et facilement lessivable. Mais des règles élémentaires peuvent être observées pour que cet azote, conservé et transformé lors du processus de la biométhanisation puisse être efficacement valorisé par les cultures agricoles. Il s'agit notamment :

- de couvrir la fosse de stockage du digestat ;
- durant l'épandage sur les terres agricoles, d'enfouir rapidement le digestat dans le sol.

4.5.2. Valeurs structurantes pour le sol

Une partie de la matière organique contenue dans le substrat est dégradée au cours de la biométhanisation, laquelle aurait été dégradée par les micro-organismes du sol au cours des périodes suivant l'épandage s'il n'y avait pas eu de biométhanisation. Par contre, la matière organique intéressante pour la structuration du sol, celle qui formera l'humus, est conservée lors de la biométhanisation.

Conclusion partielle

Cette première partie présente l'intérêt du développement de la biométhanisation particulièrement dans les zones rurales. Elle clarifie le processus de la biométhanisation et elle indique les dispositifs nécessaires à la mise en œuvre de l'unité de biométhanisation.

2^{EME} PARTIE : ETUDE EN VUE DU CHOIX DES ELEMENTS TECHNOLOGIQUES

Cette étude nous permettra de faire des choix technologiques pour la mise en place de notre unité de biométhanisation. Il s'agira d'abord de faire l'état des lieux du site. Ensuite la démarche consistera à définir les besoins énergétiques du site et d'estimer la production minimale journalière de biométhane. Puis il va s'agir d'estimer le gisement minimum de matières organiques dont on doit disposer afin de satisfaire les exigences énergétiques et éventuellement de proposer un scénario d'approvisionnement en matières organiques. Enfin d'effectuer la conception technique des différents ateliers et de proposer un schéma technologique de l'unité de biométhanisation.

1. ETAT DES LIEUX

1.1. Situation géographique du site

Le monastère de Keur Moussa se localise dans la région de Thiès, exactement dans la communauté rurale de Keur Moussa (Figure 19). La région de Thiès couvre au total une superficie de 6601 km², soit 3,3 % du territoire national et est limitée :

- au Nord par la région de Louga,
- au Sud par la région de Fatick,
- à l'Ouest par l'Océan Atlantique et la région de Dakar,
- et à l'Est par celles de Diourbel et de Kaolack.

La population régionale s'estime environ à 1 358 658 habitants (recensement de l'année 2004) dont 43,7 % vivent en milieu urbain et 56,3% en milieu rural.

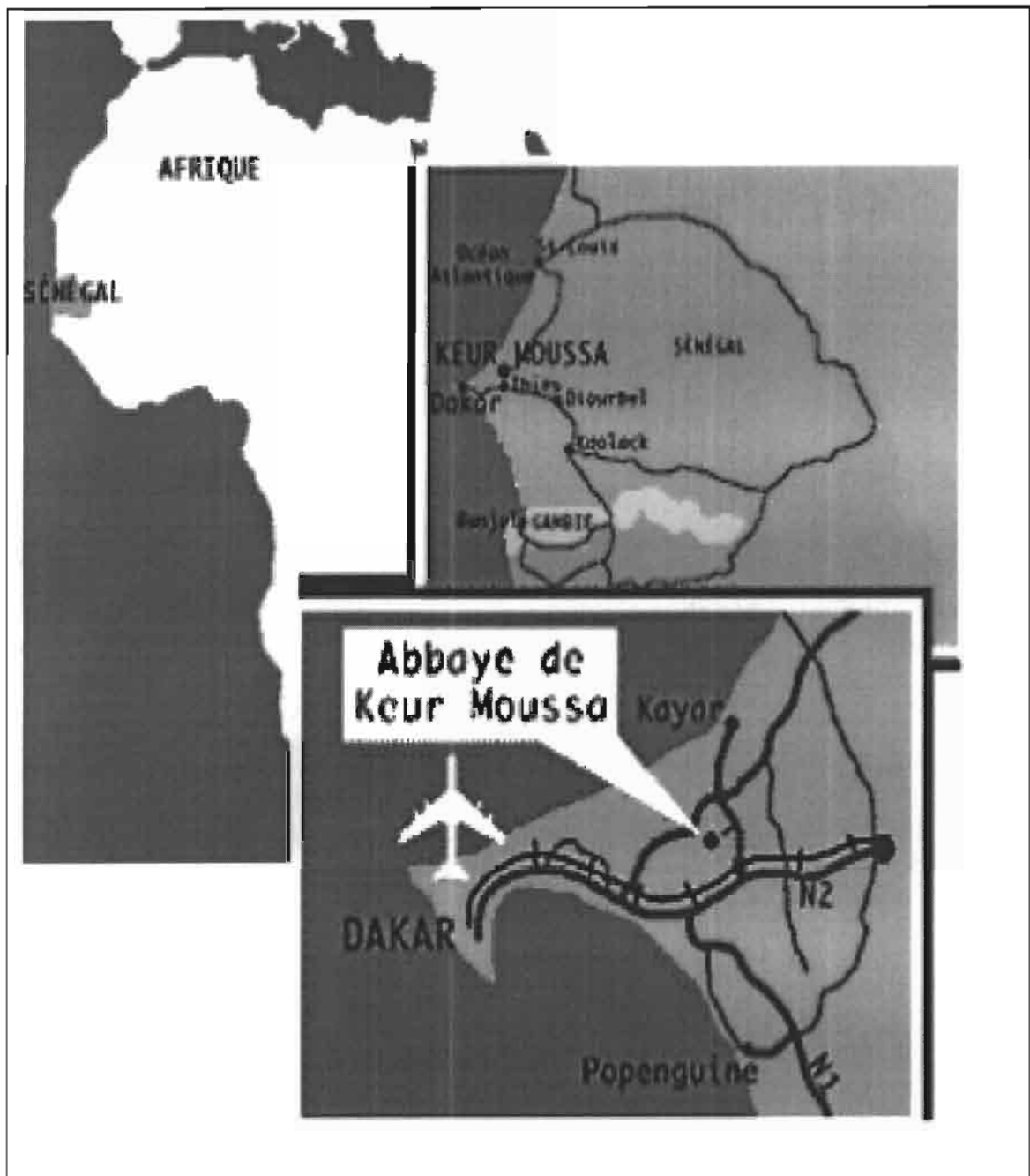


Figure 19 : Vue de la situation géographique du monastère de Keur Moussa

1.2. Examen des infrastructures existantes

Le monastère dispose de plusieurs bâtiments et d'installations diverses. Pour faciliter la suite de ce travail, nous subdivisons ce lieu en trois (3) zones. Cette subdivision correspond aux 3 tranches indépendantes d'approvisionnement en électricité :

- zone H : les bâtiments d'habitation et les bâtiments annexes;
- zone I : l'infirmerie ;
- zone F : le forage

1.3. Estimation du besoin en énergie électrique

Le réseau public d'électricité alimente le monastère suivant trois (3) zones autonomes; notamment la zone H, la zone I et la zone F.

L'inventaire des consommations électriques du monastère est établi à partir des factures d'électricité des deux dernières années 2005 et 2006. (Tableau 9 à 14).

D'une part, Il ressort que la puissance consommée actuellement est de l'ordre de 34 kW. A ce stade du projet, il serait judicieux de prendre arbitrairement en compte des marges sécuritaires. Nous allons considérer une marge de 40 % pour le fonctionnement prochain de l'unité de biométhanisation. Egalement, du fait des besoins futurs présentement inconnus, nous considérons un accroissement de 50 % de la consommation électrique actuelle. Ce raisonnement fixe la puissance électrique environ à 72 kW (soit $1,4 \times 1,5 \times 34$ kW).

D'autre part, nous considérons une marge supplémentaire de 80 % relative à l'efficacité de la centrale électrique (alternateur). La puissance électrique de cette centrale s'estime finalement environ à 90 kW (soit $72 \text{ kW} \div 0,8$). La puissance apparente est de l'ordre de 106 kVA (pour un facteur de puissance supposé à 0,85)-figure 12-

Tableau 9
Consommation électrique par bimestre des Bâtiments d'habitation (Zone H)

Année	Période	Consommation en kWh / jour	Coût en francs CFA
An 2005	Janvier Février	189,92	781 380
	Mars Avril	191,25	959 360
	Mai Juin	247,06	1 274 410
	Juillet Août	256,39	1 154 270
	Septembre Octobre	251,47	1 255 080
	Novembre Décembre	212,26	1 306 873,3
An 2006	Janvier Février	205,04	1 715 093,3
	Mars Avril	186,56	907 380
	Mai Juin	231,14	1 315 080
	Juillet Août	276,67	1 535 420
	Septembre Octobre	217,71	1 140 610
	Novembre Décembre	209,52	1 390 820

Source : Facture SENELEC / Police : 202A000043, Compteur : 00870022

Tableau 10**Consommation électrique par bimestre de l'infirmierie (Zone I) et les coûts bimestriels**

Année	Période	Consommation en kWh / jour	Coût en Francs CFA
An 2005	Janvier Février	19,98	155 010
	Mars Avril	19,98	155 010
	Mai Juin	59,98	417 520
	Juillet Août	86,57	503170
	Septembre Octobre	71,29	469 390
	Novembre Décembre	46,63	362 720
An 2006	Janvier Février	18,81	198 610,00
	Mars Avril	26,96	235800
	Mai Juin	44,11	441860
	Juillet Août	106,40	931900
	Septembre Octobre	66,61	595190
	Novembre Décembre	38,97	451 610

Source : Facture SENELEC / Police : 2020500601, Compteur : 02369818

Tableau 11

Consommation électrique par mois du forage (Zone F) et les coûts mensuels

Année	Période	Consommation en kWh / jour	Coût en Francs CFA
An 2005	Janvier	279,00	576769
	Février	243,77	629560
	Mars	244,04	569142
	Avril	245,77	633918
	Mai	245,83	613581
	Juin	241,87	625316
	Juillet	247,80	617767
	Août	240,94	623240
	Septembre	240,16	621556
	Octobre	248,23	618691
	Novembre	240,16	693759
	Décembre	252,34	681431
An 2006	Janvier	252,34	681431
	Février	222,19	640388,00
	Mars	279,79	700901
	Avril	268,74	768047
	Mai	267,27	741136
	Juin	255,58	763482
	Juillet	242,00	707375
	Août	245,13	737770
	Septembre	106,52	389102,4512
	Octobre	77,87	334068
	Novembre	173,39	626780
	Décembre	234,1	823 575

Source : Facture SENELEC / Police : 201F000852 du 02-01-1997

Tableau 12
Bilan cumulé de la consommation énergétique

Zone	Moyenne journalière kWh / jour		Consommation annuelle kWh		Coût annuel F. CFA	
	An 2005	An 2006	An 2005	An 2006	An 2005	An 2006
Zone H	224,73	221,1	80 932,13	79 424,86	6 731 373	8 004 403
Zone I	50,74	50,31	17 762,9	18 077	2 062 820	2 854 970
Zone F	247,5	218,74	99 182,4	70 165,6	7 504 730	7 914 055
Zone H + Zone I + Zone F			197 877,43	167 667,46	16 298 923	18 773 428
Moyenne Linéaire Zone H + Zone I + Zone F			182 772,45		17 536 175,5	

Tableau 13

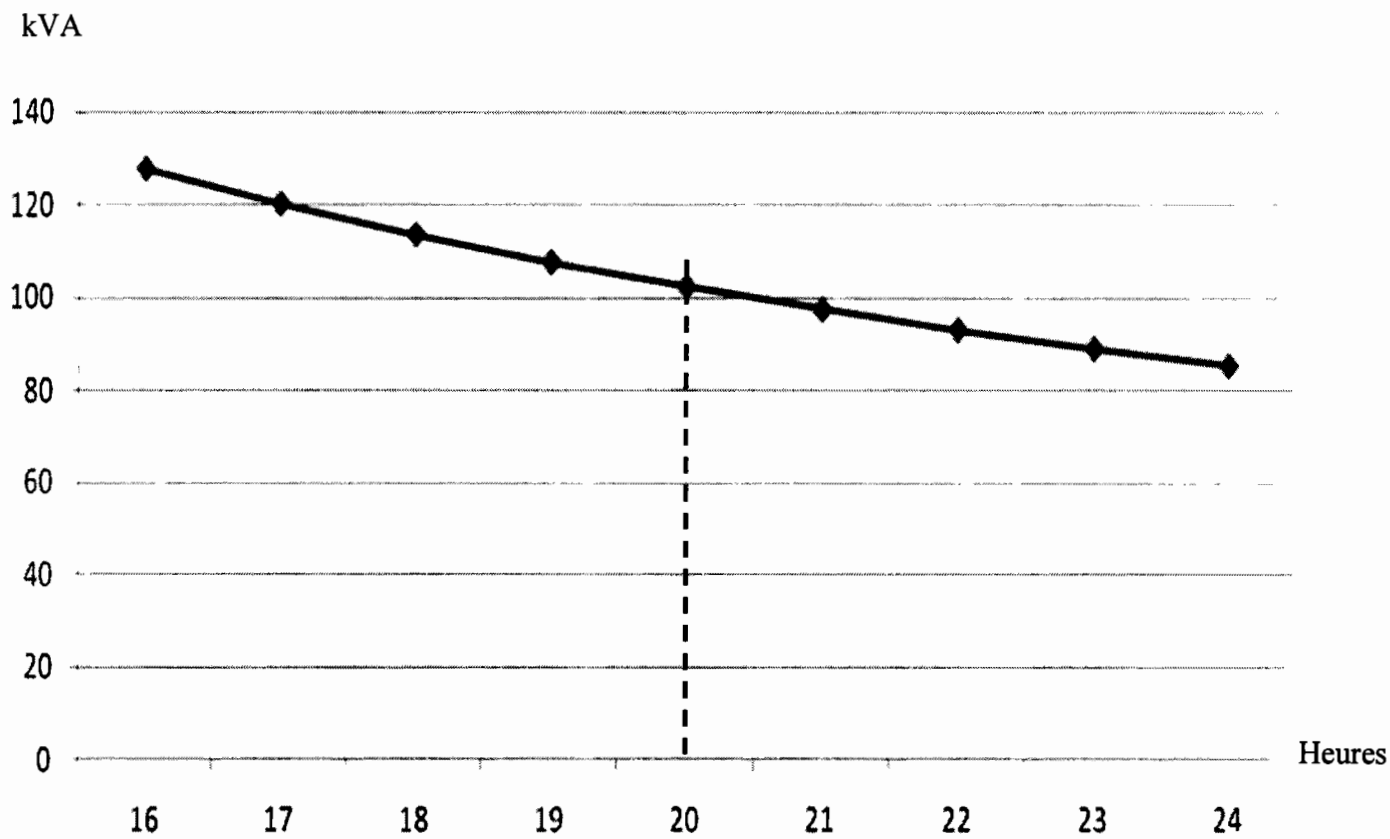
Taux d'alimentation– Estimation de la puissance utile du monastère - A

Période	Consommation kWh / jour			Total T = H + I + F	Rapport en %			Objet N°	
	Zone H	Zone I	Zone F		H / T	I / T	F / T		
An 2005	Janvier	189,92	19,98	279	488,9	38,846	4,08673	57,067	1
	Février	189,92	19,98	243,77	453,67	41,863	4,40408	53,733	2
	Mars	191,25	19,98	244,04	455,27	42,008	4,3886	53,603	3
	Avril	191,25	19,98	245,77	457	41,849	4,37199	53,779	4
	Mai	247,06	59,98	245,83	552,87	44,687	10,8488	44,464	5
	Juin	247,06	59,98	241,87	548,91	45,009	10,9271	44,064	6
	Juillet	256,39	86,57	247,8	590,76	43,4	14,654	41,946	7
	Août	256,39	86,57	240,94	583,9	43,91	14,8262	41,264	8
	Septembre	251,47	71,29	240,16	562,92	44,672	12,6643	42,663	9
	Octobre	251,47	71,29	248,23	570,99	44,041	12,4853	43,474	10
	Novembre	212,26	46,63	240,16	499,05	42,533	9,34375	48,123	11
	Décembre	212,26	46,63	252,34	511,23	41,519	9,12114	49,359	12
An 2006	Janvier	205,04	18,81	252,34	476,19	43,058	3,9501	52,991	13
	Février	205,04	18,81	222,19	446,04	45,969	4,21711	49,814	14
	Mars	186,56	26,96	279,79	493,31	37,818	5,46512	56,717	15
	Avril	186,56	26,96	268,74	482,26	38,685	5,59035	55,725	16
	Mai	231,14	44,11	267,27	542,52	42,605	8,13058	49,265	17
	Juin	231,14	44,11	255,58	530,83	43,543	8,30963	48,147	18
	Juillet	276,67	106,4	242	625,07	44,262	17,0221	38,716	19
	Août	276,67	106,4	245,13	628,2	44,042	16,9373	39,021	20
	Septembre	217,71	66,61	106,52	390,84	55,703	17,0428	27,254	21
	Octobre	217,71	66,61	77,87	362,19	60,109	18,3909	21,5	22
	Novembre	209,52	38,97	173,39	421,88	49,663	9,23722	41,099	23
	Décembre	209,52	38,97	234,1	482,59	43,416	8,07518	48,509	24
Moyenne en % = $\frac{\text{(somme des rapports en \%)}}{\text{(Nombre d'objet =24)}}$						44,3 %	9,77 %	45,93 %	

Tableau 14

Taux d'alimentation– Estimation de la puissance utile du monastère -B

	Energie Maximale en kWh par jour (An 2005 et 2006) E_{max}	Energie Totale Utile en kWh par jour (E. totale)	Nombre d'heures de marche par jour T_m
Zone H	276,67	663	20
Zone I	106,4		
Zone F	279,79		
	Puissance Totale Utile (= E. totale / T _m)	34 kW	
	Facteur de Puissance (cos ρ)	0,85	
	Puissance Apparente	40 kVA	



**Figure 20 : Tracé de la Puissance Apparente Totale en fonction du temps d'alimentation
Tm en heures**

1.4. Estimation de la quantité journalière de biométhane

La centrale électrique se compose principalement d'une turbine à gaz et d'un alternateur. L'énergie totale consommée est estimée environ à 1392 kWh par jour (soit $1,4 \times 1,5 \times 662,86$ kWh.). Nous considérons en moyenne un rendement de 40 % pour la turbine à gaz et un rendement de 80 % pour l'alternateur. De plus, nous supposons une teneur minimale en méthane de 60 %.

La quantité journalière de biométhane s'estime comme suit :

- L'énergie brute à l'amont de l'alternateur = $\frac{1\ 3\ 9\ 2\ \text{k W h}}{8\ 0\ \%} \approx 1740\ \text{kWh}$,
- L'énergie brute à l'amont du moteur = $\frac{1\ 7\ 4\ 0\ \text{k W h}}{4\ 0\ \%} \approx 4350\ \text{kWh}$,
- Le PCI du biométhane (60 % de méthane) = $5,96\ \text{kWh} / \text{m}^3$,
- La quantité journalière de biométhane est = $\frac{4\ 3\ 5\ 0\ \text{k W h}}{5,96\ \text{k W h} / \text{m}^3} \approx 730\ \text{m}^3 / \text{jour}$.

En résumé, l'alimentation de la centrale nécessite $730\ \text{m}^3$ de biométhane par jour. Ce volume représente une masse journalière de 480 g relative à une masse volumique du méthane de l'ordre de $0,000658\ \text{kg} / \text{m}^3$. Le rapport journalier énergie électrique / volume de biométhane de cette unité de biométhanisation est de l'ordre de 1,9 kWh par m^3 de biométhane.

1.5. Estimation du gisement minimum de matières organiques

La ferme d'élevage actuelle peut fournir des matières organiques d'origine porcine et bovine. Considérant que les matières organiques (MO) proviennent essentiellement du bétail de porcs (environ 2,5 à 9,7 % de MS) et du bétail de bovins (environ 12 à 25 % MS) et d'après les données (tableau 4) ³⁴:

³⁴ Demeyer, A., Jacob, F., Jay, M., Menguy, G., Perrier, J, La conversion bioénergétique du rayonnement solaire et les biotechnologies, Technique et documentation Lavoisier, 1982

- 1 bovin fournir en moyenne 4,9 kg de MO par jour, cette quantité correspond à une production de 0,275 m³ de biométhane par kg de MO bovine ;
- 1 porc fournir en moyenne 0,45 kg de MO par jour, cette quantité correspond à une production de 0,465 m³ de biométhane par kg de MO porcine ;

La taille du bétail nécessaire pour assurer une production de 730 m³ de biométhane par jour s'estime à l'aide du calcul suivant :

Avec Po correspondant au nombre de porcs et Bo au nombre de bovins,

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Bo} \times (4,9 \text{ kg de MO / jour} \times 0,275 \text{ m}^3 \text{ de gaz / kg de MO}) \\ + \\ \text{Po} \times (0,45 \text{ kg de MO / jour} \times 0,465 \text{ m}^3 \text{ de gaz / kg de MO}) \end{array} \right\} = 730 \text{ m}^3 \text{ de gaz / jour} \quad (17)$$

Cette équation se présente simplement comme suit :

$$1,3475 \times \text{Bo} + 0,20925 \times \text{Po} = 730 \quad (18)$$

La résolution graphique de l'équation nous indique plusieurs tailles de bétail possibles (figure 21,22). Nous constatons qu'il faut au moins 520 bovins pour produire 730 m³ de biométhane par jour ; tandis qu'à l'inverse pour un seul bovin, il faut au moins 3500 porcs pour produire 730 m³ de biométhane. Ce constat implique que les bovins sont plus rentables que les porcs en termes de production de biométhane.

Notre choix se porte clairement sur l'augmentation du nombre de bovins. Nous proposons un bétail d'au moins 560 unités de gros bovins. Le rapport journalier énergie électrique / nombre de bovins s'estime en moyenne à 2,5 kWh par bovin (1392 kWh ÷ 560 bovins). Une taille de 560 bovins fournit environ 2744 kg de M.O. par jour (2,7 tonnes). Cette quantité de MO est largement suffisante pour assurer une production de 730 m³ de biométhane par jour. L'ajout d'autres MO (lisier de porc, déchets domestiques, résidus forestier etc.) augmente encore la capacité de production de gaz.

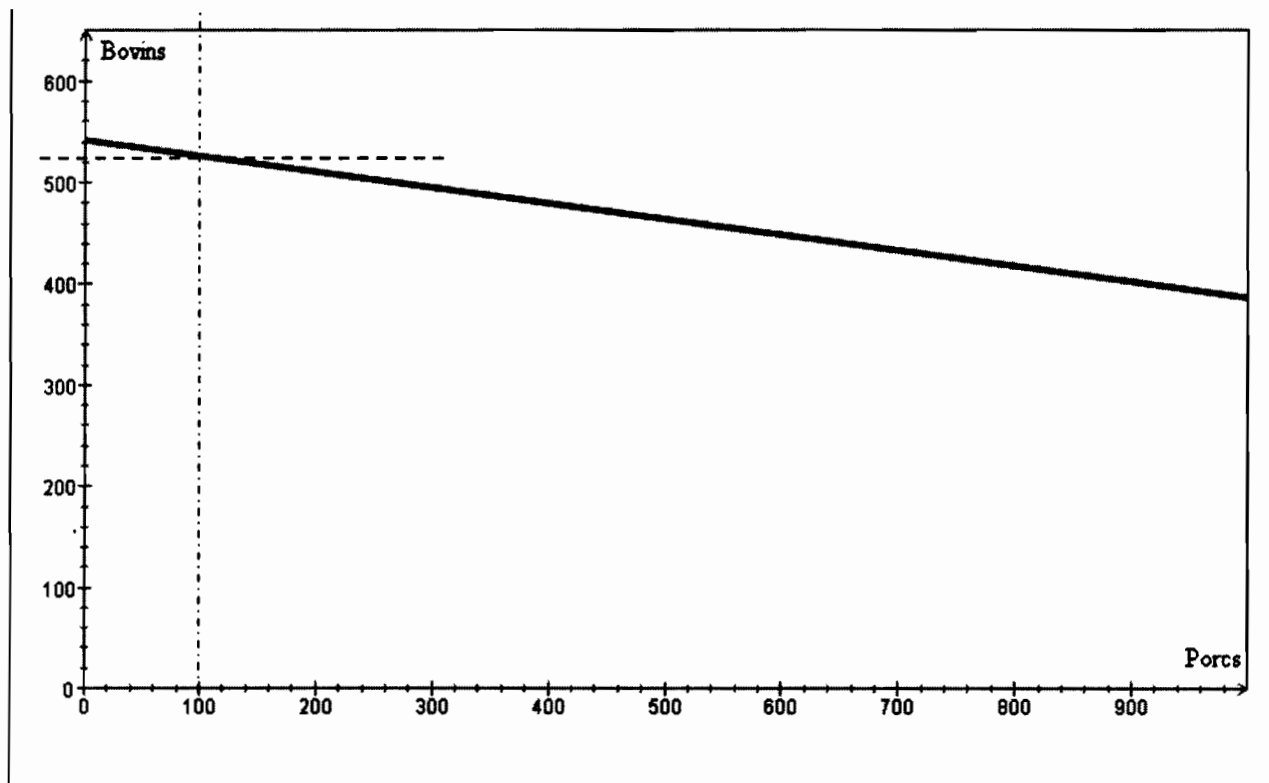


Figure 21 : Scénario d’approvisionnement en matières organiques : Nombre de bovins en fonction du nombre de porcs

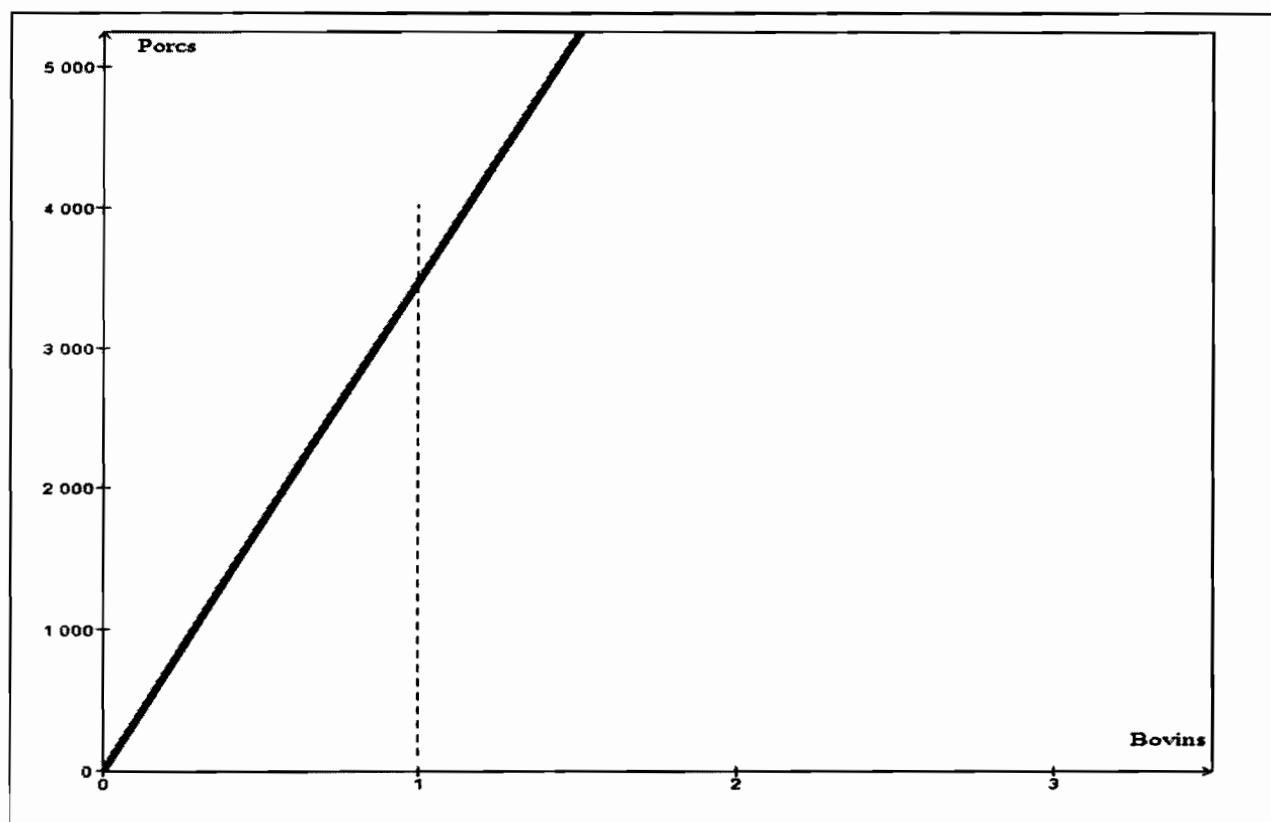


Figure 22 : Scénario d’approvisionnement en matières organiques : Nombre de porcs en fonction du nombre de bovins

2. CONCEPTION TECHNOLOGIQUE DE L'UNITE DE BIOMETHANISATION

Le digesteur est le réacteur ou le cœur de l'unité de biométhanisation (figure 23). La performance, la résistance, la fiabilité, la durée de vie de notre unité de biométhanisation dépendent principalement d'une conception convenable du digesteur. Les digesteurs continus sont reconnus pour leur grande fiabilité ; notre digesteur appartient à cette famille. En revanche sa conception est une innovation technologique. Notre unité de biométhanisation est la combinaison d'un digesteur continu à piston, d'un digesteur continu infiniment mélangé et du principe de fonctionnement d'une unité de biométhanisation de digesteur à cellules fixées :

- Son concept de base repose sur le digesteur continu à piston ; dans ce cas l'avantage est une utilisation simultanée d'effluents liquides et d'effluents solides. Le digesteur est composé de deux pistons (figure 24). Ces deux chambres de méthanisation sont installées en série afin d'augmenter la production de gaz et de mieux stabiliser les déchets organiques. Les matières transitent d'une chambre à une autre par le principe des vases communicantes. La première chambre est installée à un niveau géométrique plus haut que la deuxième chambre pour permettre un écoulement des matières par gravité ;
- Il associe le procédé infiniment mélangé afin de permettre une dégradation totale des substrats. Ce mélange est réalisé par injection sous pression d'une quantité de biométhane. Cette technique évite l'utilisation d'équipements mécaniques. Ainsi, nous réalisons des économies de coûts sur l'investissement lié aux équipements de production et nous évitons des frais supplémentaires de maintenance ;
- Le principe de fonctionnement de notre unité de biométhanisation est en partie identique à celui d'une installation de digesteurs à cellules fixées. Dans ce cas, l'avantage concerne la simplicité du dispositif d'homogénéisation des matières organiques et du dispositif d'alimentation du digesteur ;

Le matériau de réalisation de notre digesteur est du béton armé. Le type de béton doit être choisi pour permettre de conserver la température des matières organiques (propriétés d'isolation thermique) et disposer d'une étanchéité absolue à l'eau. Un ouvrage en béton nous assure une très longue durée de vie de l'installation et évite des investissements dans l'achat de matériau d'isolation (laine de verre, etc.). En vue de renforcer l'isolation thermique le digesteur est enterré dans le sol environ au 4/5 de sa hauteur (figure 25), la partie supérieure exposée à l'air est recouverte d'enduit de couleur noir (utilisation de goudron). La couleur noire participe à l'absorption de l'énergie solaire pour chauffer les parois du digesteur.

La partie supérieure du digesteur comporte également un couvercle amovible pour permettre l'entrée d'un ouvrier en cas d'opérations de maintenance.

2.1. L'atelier 1 : le stockage et la préparation des matières organiques avant l'admission dans le digesteur (figure 26)

Deux fosses en béton sont construites. Ces fosses de stockage disposées en série permettent d'améliorer l'homogénéisation des matières organiques. La ferme du monastère de Keur Moussa dispose actuellement d'une fosse de compostage de lisier de porc. Ce compost est épandu sur les terres agricoles. Pour l'unité de biométhanisation, cette fosse de compostage peut servir comme une fosse de stockage des M.O. Un broyeur mécanique sert au broyage des matières organiques solides. Des pompes centrifuges à écoulement axial radial sont installées le brassage des MO et l'alimentation du digesteur, et le recyclage du digestat liquide.

2.2. L'atelier 2: le digesteur

Plusieurs paramètres techniques sont à définir. Les hypothèses de conception choisies sont les suivantes :

- Digestion thermophile; la température de fonctionnement est de l'ordre de 65°C,
- TSH = 30 jours,
- Concentration du mélange des M.O. = 1,8 litres par kg.
- Production théorique de gaz : 730 m³ de biométhane par jour

2.2.1. Paramètres techniques du digesteur

Les calculs suivants permettent de définir M, Q, V, CV, G, PV, B et E :

- La charge journalière initiale M = 2744 kg de M.O
- Le débit volumique de l'influent Q = 1,8 litres par kg × 2744 kg par jour, soit 4939,2 litres ou 4,94 m_i³ de matières fraîches entrante par jour ;
- Pour un TSH = 30 jours, le volume du digesteur V = Q × TSH = 4,94 × 30 jours, soit 150 m_f³ ;

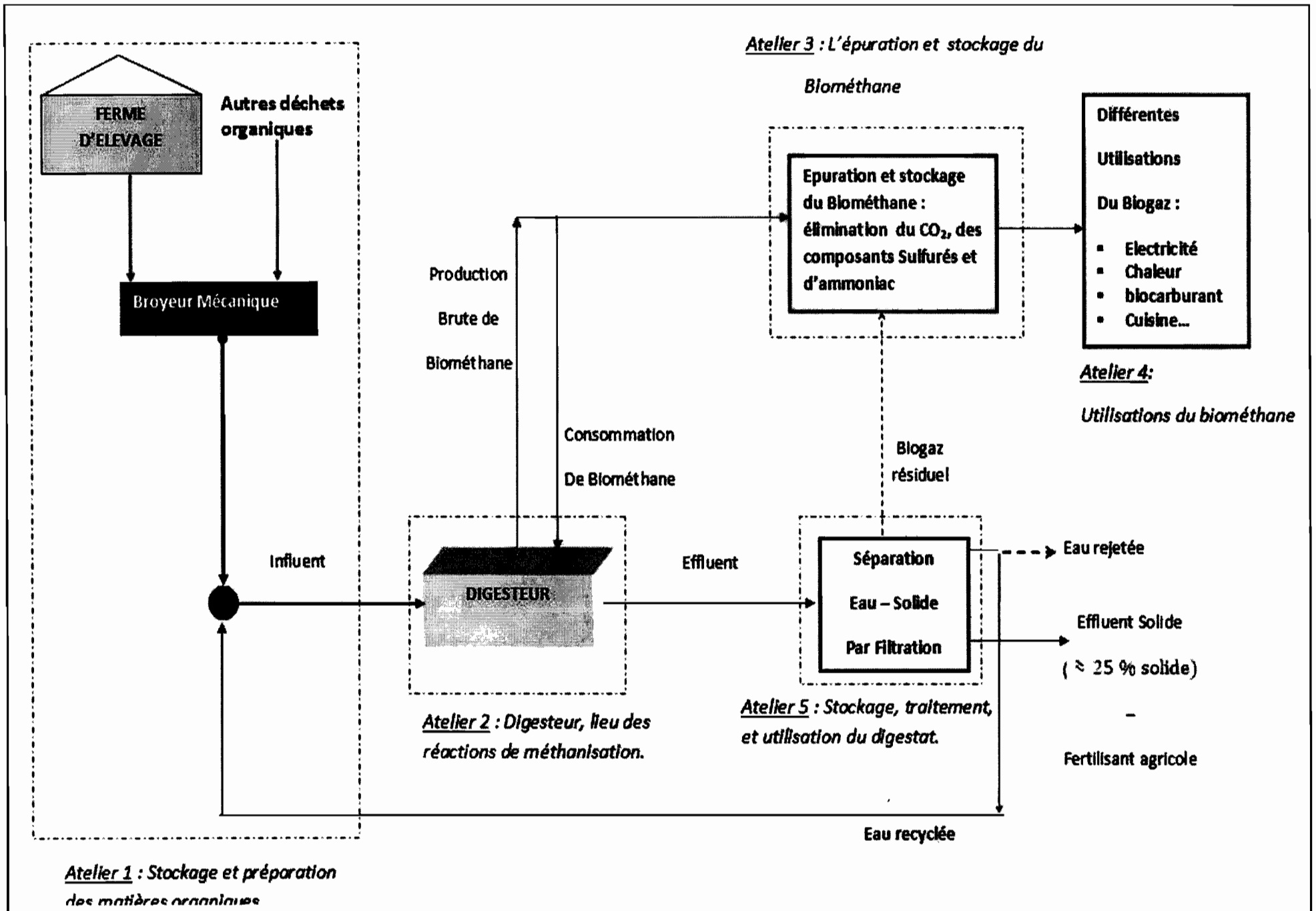
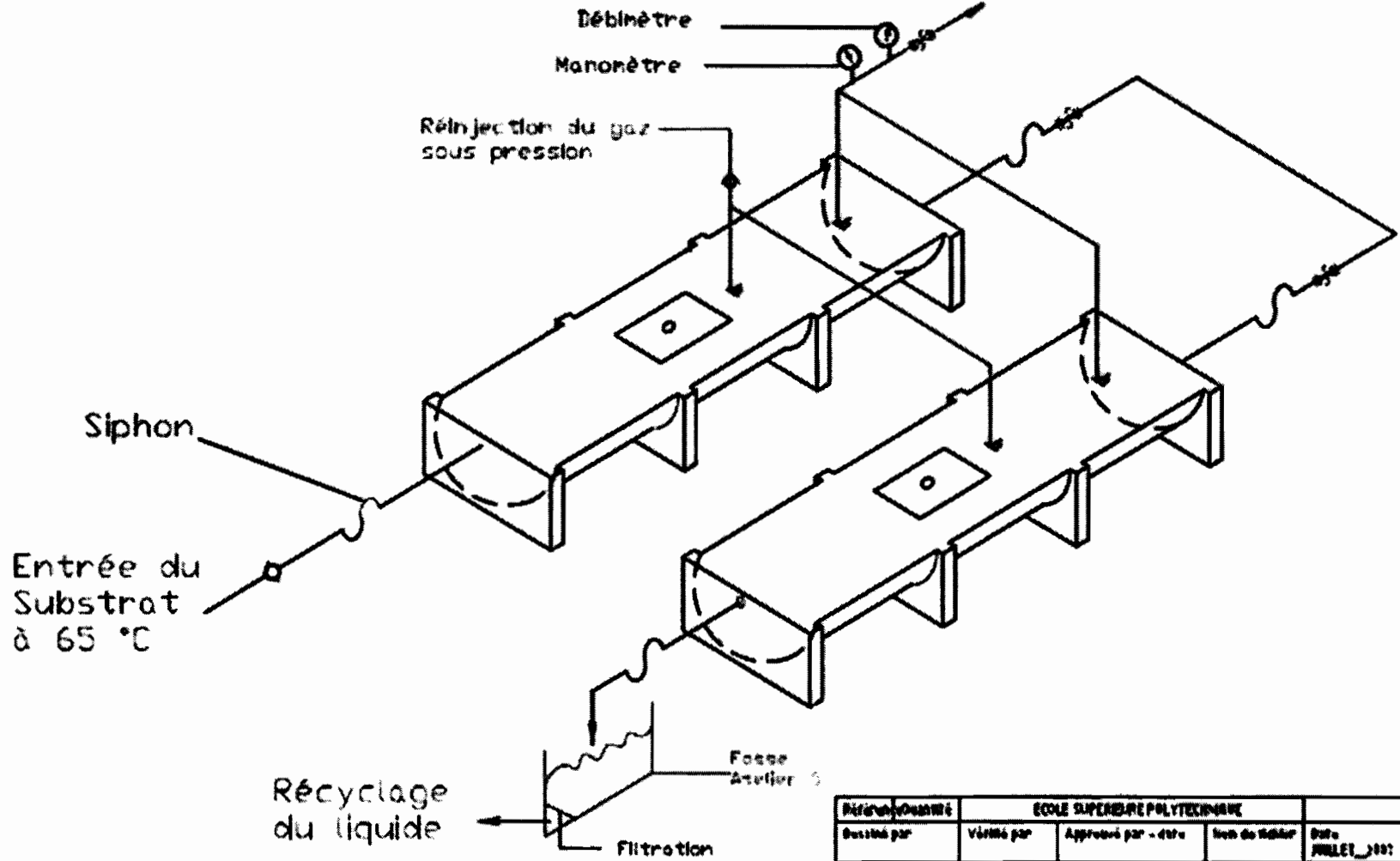


Figure 23 : Vue d'ensemble de l'unité de biométhanisation

— Circulation du gaz
 — Circulation du substrat

Sortie du gaz vers l'ATELIER 3



ÉCOLE SUPÉRIEURE POLYTECHNIQUE					
Niveau/Quantité	Véhiculé par	Approuvé par - date	Nom de l'éditeur	Date	Page
T.GUY-MAXIME_IRIE_BI			ATELIER_2 & ATELIER_5		
				Édition	Page No.

Figure 24 : Schéma d'assemblage des digesteurs

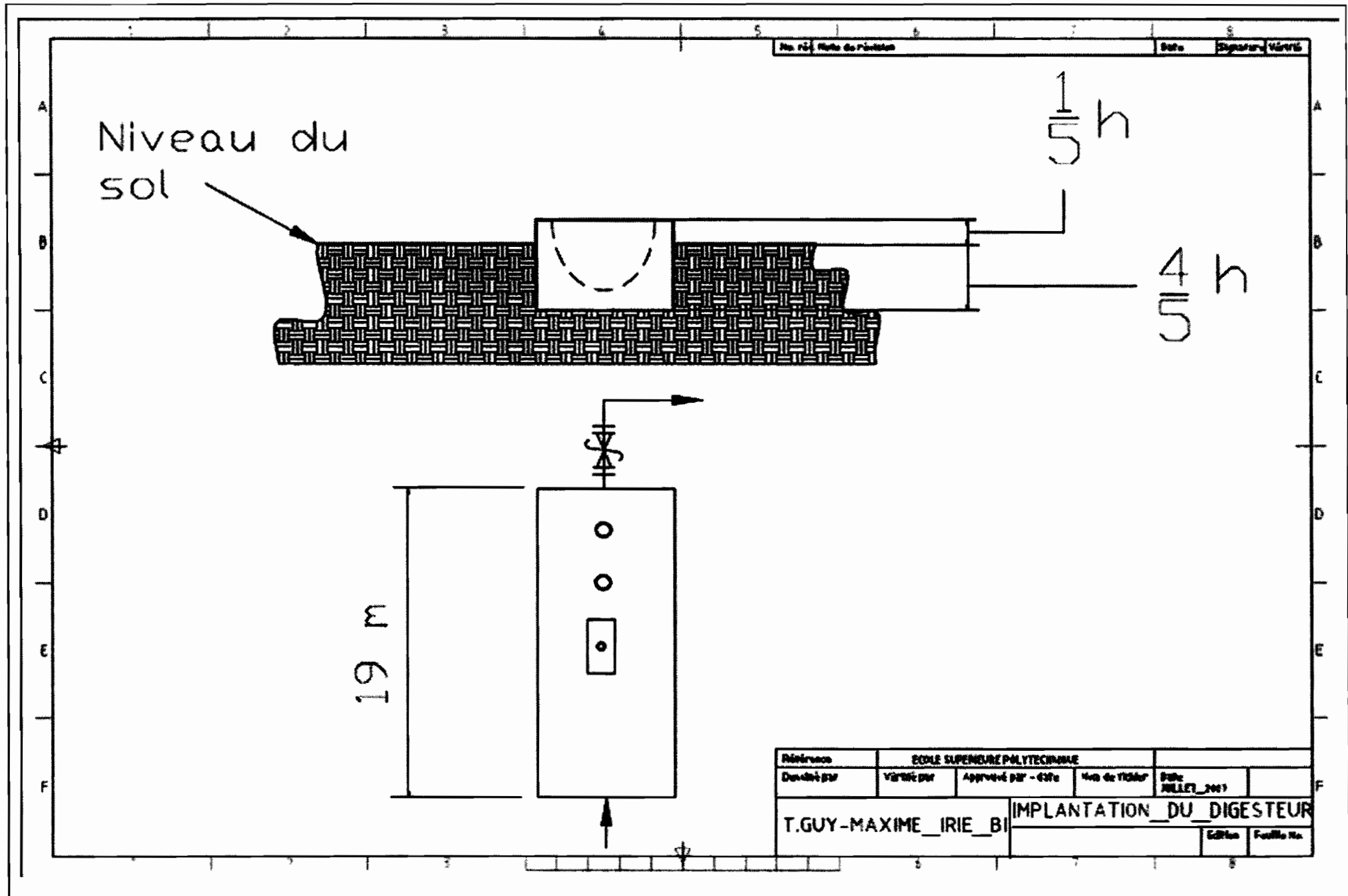


Figure 25 : Schéma d'Implantation d'un digesteur

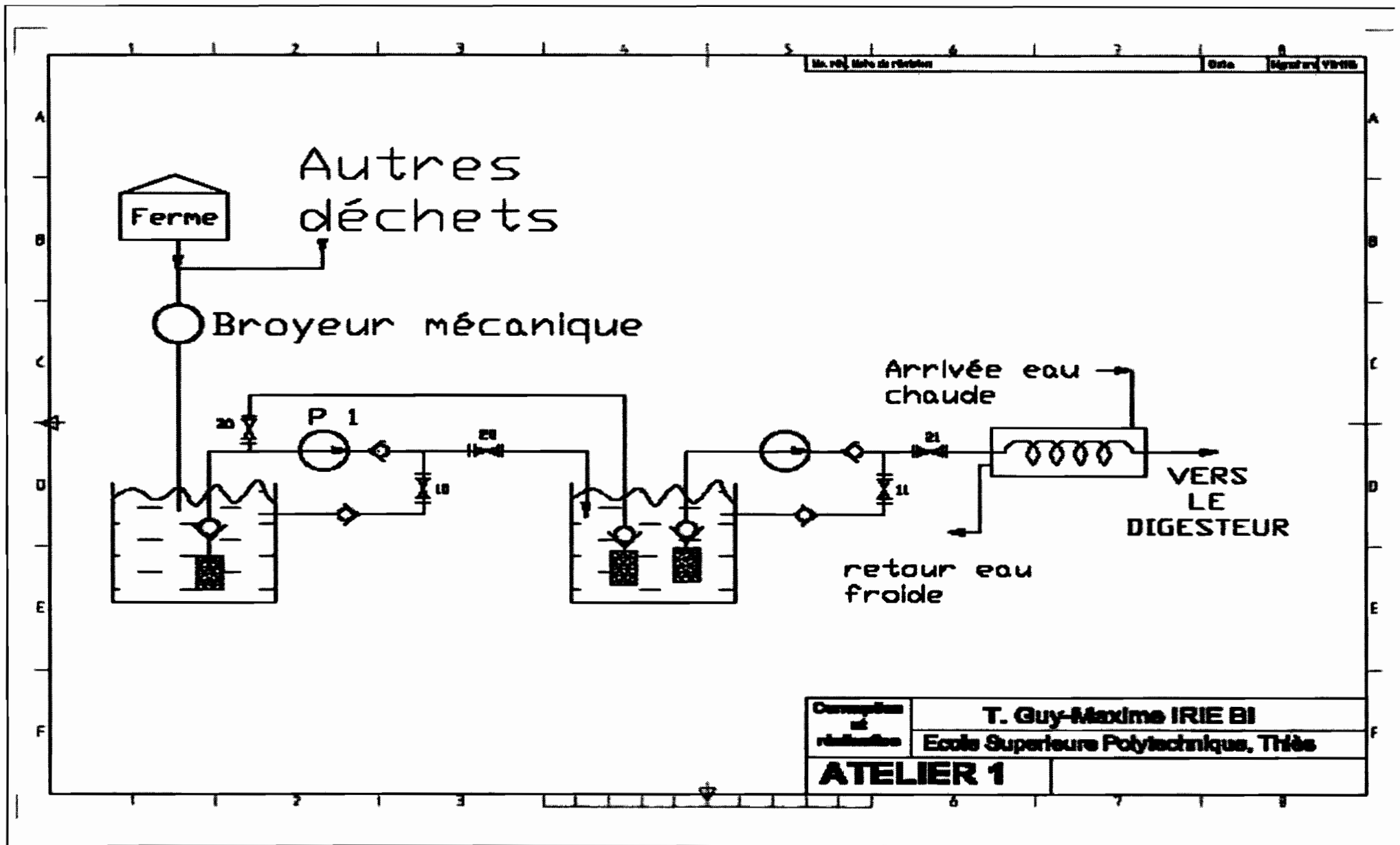


Figure 26 : Vue de l'atelier 1

- Le taux de charge $CV = \frac{M}{V} = \frac{2744}{150}$, soit 19 kg. MO / $m_f^3 \cdot j$;
- La production de biométhane $G = 730 \text{ m}_g^3 / j$;
- La production volumique de biométhane $PV = \frac{G}{V} = \frac{730}{150}$, soit 5 $m_g^3 / m_f^3 \cdot j$;
- La production spécifique $B = \frac{G}{M} = \frac{730}{2744}$, soit 0,27 m_g^3 / kg ;

Pour une masse totale de lisier (M_{in}) estimée à 5488 kg (c'est-à-dire 2744 kg.MO + 2744 kg d'eau), et en considérant que seulement 10 % de la charge entrante est transformée en gaz, la charge nette sortante $M_{out} = 90 \% \times 5488$, soit 4939 kg ;

- Le taux d'épuration $E = \frac{M_{out}}{M_{in}} = \frac{4939}{5488}$, soit 90 % à la sortie du premier digesteur.

2.2.2. Analyse thermique du digesteur

2.2.2.1. Chauffage des matières organiques

La quantité maximale de chaleur à fournir au digesteur (Q_d) se calcule au moment où la température moyenne mensuelle est la plus basse (Annexe 7). En effet, à cet instant, la température minimale de l'air est de 20,4 °C et la température de l'eau froide est de 17,7 °C. En considérant que, la charge de matières organiques entrantes dans le digesteur chaque jour est $M_{in} = 5488 \text{ kg}$, en supposant aussi que la chaleur spécifique du mélange organique reste identique à celle de l'eau c'est-à-dire 1 J/kg. °C, alors la quantité de chaleur minimale à fournir pour maintenir les MO à la température de 65°C (digestion haute température) est de l'ordre de :

$$Q_d = 5488 \text{ kg} \times 1 \text{ J/kg. } ^\circ\text{C} \times (65-17,7) = 259.582,4 \text{ Joules par jour.}$$

L'utilisation d'un échangeur de chaleur permet de réchauffer les matières organiques durant leur transit vers le digesteur. L'échangeur de chaleur peut être un bac cubique du même matériau que celui utilisé pour la construction du digesteur. Le bac contient un fluide caloporteur (l'eau) en circulation. Une tuyauterie en matière plastique et en forme de spirale traverse ce bac. Des échanges thermiques se produisent entre le fluide caloporteur et les matières organiques qui parcourent l'intérieur de cette tuyauterie

2.2.2.2. Quantité de chaleur récupérable au niveau de la centrale électrique

Le turbo alternateur de la centrale électrique dégage de la chaleur. Cette source de chaleur est transférée à l'échangeur de chaleur afin de réchauffer les M.O. La température minimale de l'air est de l'ordre de 20,4 °C et la température de l'eau froide d'environ 17,7 °C. Le maintien de la température de fonctionnement du digesteur à 65° C semble ne pas exiger une puissance thermique élevée. Donc, si la quantité de chaleur dégagée par la centrale thermique est importante cela nous évite une source supplémentaire de chaleur. La digestion thermophile permet de réduire le temps de séjour donc d'augmenter le taux de charge journalier et la production journalière de biométhane. En plus, l'énergie solaire peut être judicieusement utilisée comme source de chaleur.

2.3. Atelier 3 : épuration et le stockage du biométhane (figure 27)

2.3.1. Choix du procédé d'épuration du biométhane brute

L'épuration est une opération importante dans la mise en œuvre de l'unité de biométhanisation. Comme les autres composants gazeux du biométhane notamment l'hydrogène sulfuré dégagent une odeur caractéristique « d'œuf pourri », cela exige un dispositif d'épuration très efficace pour réduire strictement ces composants indésirables de sorte que le produit gazeux final ne dégage aucune odeur gênante pour les utilisateurs. L'hydrogène sulfuré est également à l'origine de la corrosion des métaux.

Une première épuration du biométhane par passage sur une masse de limaille de fer permet d'éliminer les traces d'éléments sulfurés. Une seconde épuration par absorption à l'aide du passage du biométhane à travers une colonne de soude ou d'eau permet de réduire la proportion de gaz carbonique et augmente ainsi le PCI du biométhane.

2.3.2. Choix du réservoir de stockage du biométhane

Le biométhane est stocké dans un réservoir à volume constant et à pression variable. La construction de ce réservoir est identique aux réservoirs des stations à essence. Ce réservoir est équipé de plusieurs équipements annexes comme le système de contrôle de la pression et de la température.

2.4. Atelier 4 : La centrale électrique (figure 28)

La centrale électrique comporte une micro turbine à gaz. Ce genre d'équipement offre de nombreux avantages (faible émission de gaz polluant, encombrement réduit, frais d'entretien et d'exploitation réduits.). La puissance installée est de l'ordre de **90 kW**.

Cette puissance de 90 kW prend en compte un coefficient d'extension et plusieurs marges sécuritaires. En réalité actuellement le besoin net du monastère est environ de 34 kW. Nous pouvons acquérir deux micro turbines à gaz identiques de 45 kW chacun. Ce choix présente un double avantage. Une micro turbine de 45 kW couvre à elle seule la totalité du besoin électrique actuel du monastère. Egalement, ces turbines peuvent fonctionner par intermittence en raison d'une stratégie de maintenance. L'atelier 4 est aussi le lieu où sont installés les appareillages annexes à l'unité de biométhanisation (système de contrôle du gaz, contrôle de la température etc.)

2.5. Atelier 5 : le stockage, le traitement et l'utilisation du digestat

L'atelier 5 est une fosse de stockage identique à une fosse de l'atelier 1. De plus, cette fosse est protégée du rayonnement solaire par une toiture, l'air doit circuler librement (fermentation aérobie). Cette fosse réceptionne les M.O méthanisées sortantes du dernier digesteur. Ces mesures de protection empêchent une destruction des minéraux organiques.

Le fond de la fosse est équipé d'une grille de filtration. Cette grille débouche à l'orifice d'entrée d'une tuyauterie souterraine. La filtration sépare les parties solide et liquide du digestat. La tuyauterie souterraine permet de recycler la partie liquide vers une fosse de l'atelier 1. Le digestat solide est utilisé soit directement en le laissant s'écouler dans un étang, en le puisant pour arroser les cultures agricoles ; soit indirectement en imprégnant des résidus de récolte dans le but de produire un compost qui sera conservé jusqu'à la prochaine mise en culture. Les déchets organiques sortants du digesteur subissent une hygiénisation du fait de la méthanisation. Cette hygiénisation évite la propagation des parasitoses animales et végétales ainsi que les maladies bactériennes. Il se produit également une désodorisation qui facilite l'utilisation du digestat.

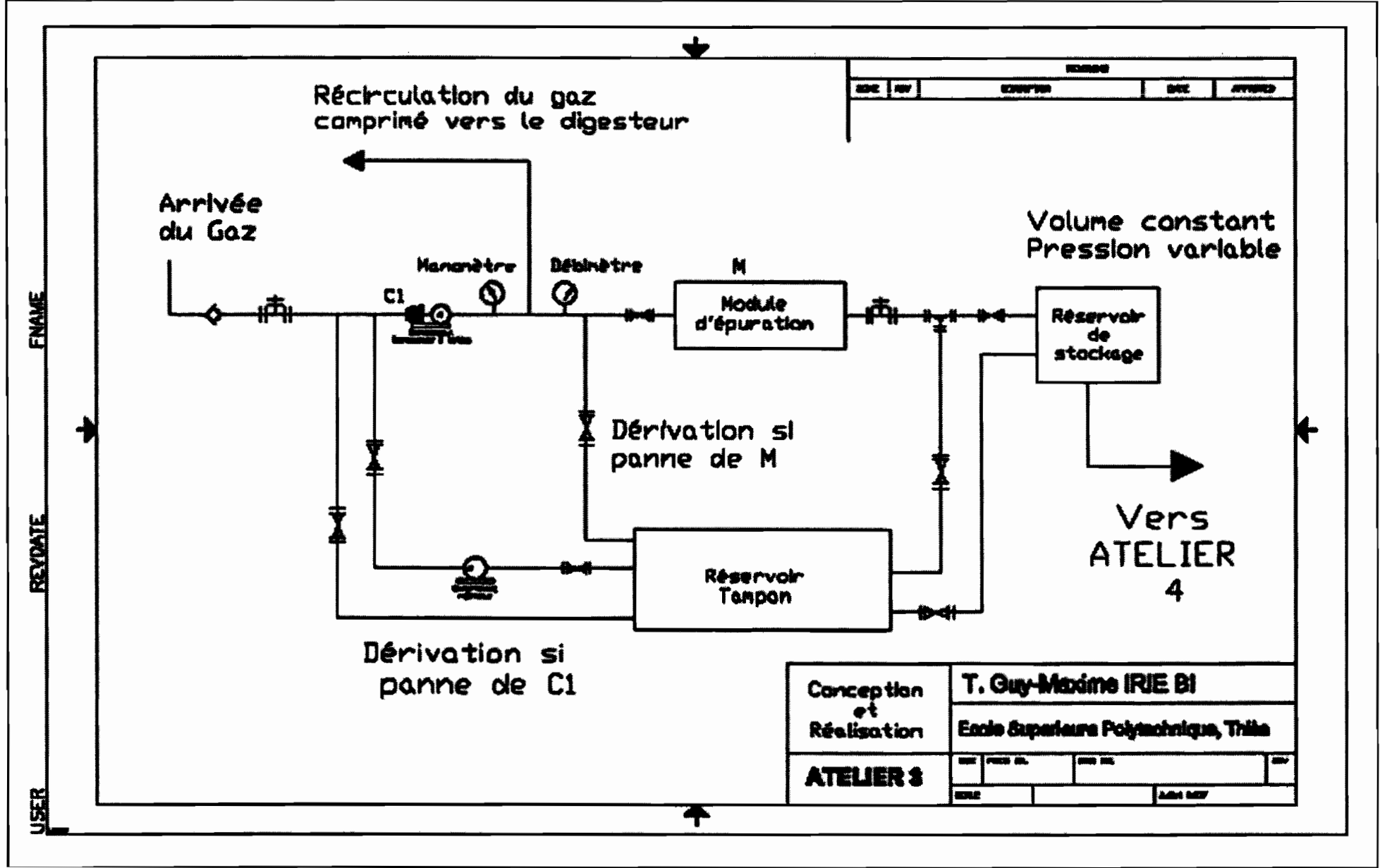


Figure 27 : Vue de l'atelier 3

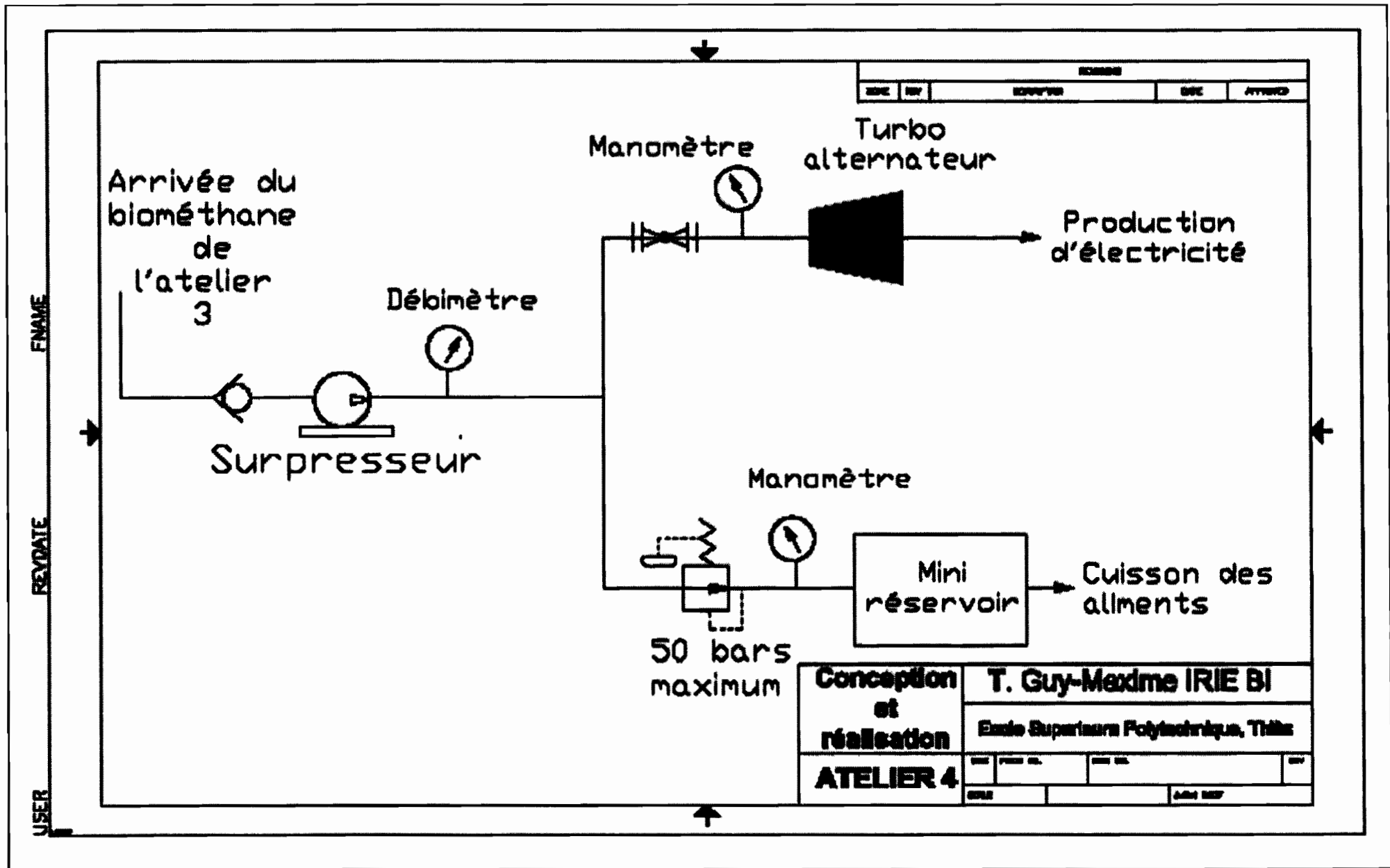


Figure 28 : Vue de l'atelier 4

2.6. La gestion des risques

Le biométhane est un produit explosif, corrosif et toxique (présence d'hydrogène sulfuré). Des normes de sécurité doivent rigoureusement être respectées. Un minimum de précautions évite la dégradation rapide des matériels et les risques pour les personnes :

- Utilisations d'appareils électriques adaptés,
- Surveillance des fuites au niveau des tuyauteries,
- Utilisation de matériaux non corrosifs (tableau 16).

Lorsque ces précautions élémentaires sont prises, le risque devient très faible. Le stockage du biométhane sous une pression supérieure à la pression de l'air empêche toute infiltration d'air, et donc toute formation de mélange explosif.

En cas de fuite et d'incendie, une flamme se développe au point de fuite mais le biométhane n'explose pas. Les installations de cette unité de biométhanisation sont pratiquement exposées à l'air libre, ce qui évite tout risque d'explosion et d'asphyxie.

Tableau 15 : Résistance des matériaux au biométhane ³⁵

Matériau	autorisé		non autorisé
	résistant	non résistant	non résistant
Fer non traité			X
Cuivre			X
Laiton			X
Aluminium			X
Fer galvanisé		X	
Inox (V2A)		X	
Fonte grise	X		
Acier au chrome-molybdène (V4A)	X		
Plastique	X		

CONCLUSION PARTIELLE

Cette étude nous a permis de faire des choix technologiques pour l'installation de l'unité de biométhanisation du monastère de Keur Moussa. Le digesteur qui est l'élément principal est un ouvrage en béton. L'investissement requis pour sa construction peut sembler élevé au départ mais en réalité si nous tenons compte de sa durabilité dans le temps et du nombre de service quasi illimité qu'il permettra, son coût d'acquisition se justifie. La capacité théorique de production est de 730 m³ de biométhane par jour. Suivant une exploitation rigoureuse et la mise en œuvre des conditions optimales de méthanisation, l'on peut s'attendre à un rendement de la production supérieur à 90 %. La mise en route de cette unité nécessite théoriquement au plus 30 jours avant l'apparition des premiers volumes de biométhane. Dès cet instant la production se déroule de façon continue tant que les digesteurs sont chargés régulièrement (chaque jour). Pour faciliter la mise en route de cette unité de biométhanisation et l'amorce des activités microbiennes, il faudrait apporter des digestats provenant de digesteurs déjà en activité (exemple de la station d'épuration de Rufisque).

³⁵ Bureau d'étude en environnement, énergie et mobilité -Sprl -Facilitateur en Biométhanisation, Rapport Vade mecum, Suisse

3^{EME} PARTIE : ETUDE FINANCIERE ET ECONOMIQUE

D'une part, l'étude financière permet d'évaluer la rentabilité des capitaux investis. Sur la base des informations disponibles, l'analyse financière permet de savoir si le monastère de Keur Moussa peut recouvrer les fonds investis à partir des recettes générées par le projet. Ces recettes concernent les économies réalisées sur le paiement des factures d'électricité, les économies réalisées sur l'achat de gaz combustible (butane) pour la cuisine, les économies réalisées sur l'achat de carburant pour le fonctionnement du groupe électrogène de secours, les économies réalisées sur l'achat de fertilisants agricoles, les redevances à percevoir pour le traitement des déchets domestiques des habitations environnantes. Des recettes intangibles comme l'amélioration de l'environnement et de la santé ne sont pas chiffrables en termes de coûts. D'autre part, l'étude économique vise à apprécier la contribution du projet au développement économique du pays.

1. ETUDE FINANCIERE

Dans cette étude nous assimilons le monastère de Keur Moussa au cas typique d'une entreprise industrielle. Nous considérons que le monastère prendra en charge l'ensemble du projet sur fonds propres. Actuellement le taux d'imposition sur les sociétés (IS) est de l'ordre de 25 % et le taux d'actualisation de 10%.

Avant de faire une analyse de rentabilité financière, il faudrait déterminer expressément les dépenses et les recettes. Les investissements résultent du choix des éléments technologiques de l'unité de biométhanisation. Ceux-ci sont basés sur des informations de certains fournisseurs et sur un métré relatif à la construction Génie Civil. Les recettes sont générées par les économies réalisées sur le paiement des factures d'électricité, les économies réalisées sur l'achat de gaz combustible (butane) pour la cuisine, les économies réalisées sur l'achat de fertilisants agricoles et éventuellement les redevances à percevoir pour le traitement des déchets domestiques des habitations environnantes.

1.1. Détermination des coûts des facteurs de production

Nonobstant nos démarches, nous n'avons pas pu disposer dans le cadre de cette étude, d'informations précises auprès de fournisseurs internationaux d'équipements industriels. Toutefois, des recherches sur internet nous ont indiquées les coûts de certains équipements d'exploitation. Pour d'autres, nous avons appliqué des ordres de grandeur ou

bien adopté des équivalences intuitives avec les prix de quelques matériels industriels fabriqués par un constructeur Suisse ³⁶. Pour les frais de constructions Génie Civil, les informations sont collectées auprès de certains professionnels du métier, et des magasins de commerce. En remarque, ces coûts peuvent sembler exorbitants. A cet effet, une étude de projet circonstanciée pourrait être envisagée à l'avenir afin d'affiner ces coûts avant la mise en œuvre éventuelle du projet ci-après.

1.1.1. Les investissements

L'investissement est un engagement des ressources d'une organisation fait immédiatement dans l'espoir de réaliser des bénéfices pour plusieurs années à venir. Avant tout investissement dans un projet, il faut s'assurer de la rentabilité de ce projet. Dans notre cas, les investissements sont liés principalement aux frais de construction Génie Civil, aux frais des équipements d'exploitation et accessoires, au coût d'acquisition du bétail, au fond de roulement:

▪ Frais de construction Génie Civil

- Coût du béton
 - Construction des digesteurs 350 m³ de béton armé
 - Construction du bac de l'échangeur de chaleur 10 m³
 - Construction des pré-fosses et de la fosse de de stockage du digestat (atelier 5) 59 m³
 - Volume total du béton des ouvrages 419 m³
 - Prix estimatif du béton 130.000 F. par m³
- Coût total du béton 54.470.000 F
- Coût de construction d'une nouvelle ferme 5.000.000 F.

Sous total des frais de construction Génie Civil	59.470.000 F
Aménagements divers (≈2 %)	1.189.400 F
Main d'œuvre (≈ 10 %)	5.947.000 F
(Location de grue, excavation, maçonnerie, etc.)	

³⁶ Charles C. TIEMTORE, Projet de Fin d'études : Implantation d'une unité de Chaudronnerie à la CGE-Dakar, Ecole Sup. Polytechnique de Thiès, juillet 2000, 75p.

Coût total de la construction Génie Civil **66.606.400 F**

▪ **Frais des équipements d'exploitation et des accessoires**

- Micro-turbine à biométhane (≈ 90 kWh électrique) 25.000.000 F
- Deux pompes centrifuges 5.000.000 F
- Broyeur mécanique 1.000.000 F
- Deux surpresseurs (au moins 50 bars) 5.000.000 F
- Pompe à vide 2.000.000 F
- Pompe pour aquarium 500.000 F
- Equipements de plomberie 6.000.000 F
 - Tuyauterie en PVC (circulation du gaz et du liquide organique)
 - Tuyauterie en cuivre
 - Vannes (matériau plastique)
 - Manomètres
 - Débitmètres
 - thermostats
 - Filtres à l'amont des pompes centrifuges
- réservoirs de stockage en acier indéformable 3.000.000 F
- Equipements de sécurité 2.000.000 F
 - Masques à oxygène
 - Extincteur
 - Appareil de contrôle des gaz
 - Moniteur multi-gaz à main pour la détection de gaz
 - casques
 - Blouses, bottes, etc.
- Module d'épuration à eau ou à la soude 5.000.000 F

Sous total des frais d'équipements d'exploitation et des accessoires **54.500.000 F**

Equipements imprévus (≈5 %) **2.725.000 F**

Main d'œuvre (≈ 10 %) **5.450.000 F**

Coût total des équipements d'exploitation et des accessoires **62.675.000 F**

▪ **Coût d'acquisition du bétail**

560 bovins (150.000 F par bovin) **84.000.000 F**

Le montant total de l'investissement avec des imprévus de 10% est de 234.609.540 F.

1.1.2. Le fonds de roulement

Le fonds de roulement représente la part des capitaux permanents qui est affectée au cycle d'exploitation. Il est important de savoir que l'entrepreneur soit en mesure de faire face à ses échéances sans faire appel à ses sources de financement de secours (découvert bancaire, escompte, apport en compte courant). La différence entre l'actif circulant et le passif circulant constitue les besoins du fond de roulement. Plusieurs facteurs influencent le fond de roulement notamment:

- le volume des recettes de l'entreprise
- les aspects saisonniers des activités de l'entreprise
- les changements de technologie
- la politique de l'entreprise etc.

1.1.3. Les charges d'exploitation

Ces charges sont liées au cycle d'exploitation de l'unité de biométhanisation. Elles concernent les frais du personnel, les frais d'entretien du bétail et les autres services consommés, les amortissements, les impôts et taxes etc.:

- **Frais du personnel de production (tableau 19)** **10.440.000 F par année**

Les ouvriers sont chargés de l'entretien du bétail, de la collecte des déchets organiques, du remplissage des digesteurs, du contrôle routinier des installations de l'unité de biométhanisation etc.

- **Frais d'entretien du bétail**

Nourriture (environ 500.000 F. par mois)	6.000.000 F par année
Frais vétérinaires	2.000.000 F par année
Total des frais d'entretien du bétail	<u>8.000.000 F par année</u>

- **Frais d'entretien des équipements de production** **5.330.250F par année**
(Environ 3 % des investissements liés aux équipements d'exploitation)

1.2. Détermination des recettes d'exploitation

Les recettes d'exploitation sont générées de plusieurs façons. Aussi, nous réalisons des économies sur les dépenses liées aux factures d'électricité et sur l'achat du gaz butane de cuisine :

- **Recettes liées au traitement des déchets domestiques des ménages environnants**

Supposons qu'au moins 3000 F. sont perçus chaque semaine, pour une année d'activité (52 semaines par ans), nous encaissons : **156.000 FCA par année.**

- **Des recettes tirées de la vente de lait :**

Nous pouvons vendre les quantités de lait extraites chaque jour des vaches laitières. Pour l'instant, nous ne sommes pas en mesure d'estimer ces recettes.

- **Economie sur l'achat des factures d'électricité (Tableau.17) :**

Année 2005 (Cas le plus défavorable) : **16.300.000 FCFA par année**

- **Economie sur l'achat de gaz combustible butane**

A l'heure actuelle, en l'espace de 165 jours le monastère consomme 3988 dm³ (soit environ 4 m³) de gaz butane et dépense à cet effet 777.087 F. Alors sur une année entière (365 jours), les économies sur l'achat de gaz butane sont en moyenne de **1.700.000 F.** Du fait que le rendement énergétique du biométhane soit environ quatre fois plus bas que celui du gaz butane, une consommation au moins de 5×4 m³, soient 20 m³ de biométhane est suffisante pour couvrir les besoins du monastère en l'espace de 165 jours. Cette consommation de 165 jours équivaut à une consommation de 0,12 m³ de biométhane par jour ; soit moins de 1 m³ de biométhane par jour.

1.3. Les amortissements

L'amortissement est une constatation comptable de la dépréciation irréversible d'un bien d'actif par l'effet du temps, de l'usage et du changement technologique. L'amortissement fiscal est une écriture comptable qui permet de répartir les coûts d'acquisition d'un actif sur une durée de vie afin de mieux faire coïncider les revenus et les dépenses encourues. L'amortissement est une dépense qui n'entraîne aucune sortie de fond, elle est donc déductible d'impôts, elle influence les flux monétaires en réduisant l'impôt payé. Ils existent trois modes de calcul des amortissements.

1.3.1. L'amortissement linéaire ou constant

Il est égal au rapport :
$$\frac{\text{Valeur d'origine}}{\text{Durée normale d'utilisation}}$$

L'amortissement de la première année est calculé prorata temporis, celui de la dernière année est égal à la valeur résiduelle si ce dernier est inférieur à l'annuité de l'amortissement.

1.3.2. L'amortissement accéléré

La première annuité est augmentée d'une annuité réduite prorata temporis.

1.3.3. L'amortissement dégressif

Dans ce cas, la première annuité doit être réduite prorata temporis en partant du mois de mise en service. L'amortissement dégressif peut être utilisé pour les biens d'équipements neufs et autres sauf les immeubles d'habitation, les chantiers et les locaux servant à l'exploitation de la profession acquis ou fabriqués depuis le 1^{er} janvier 1987 par les entreprises industrielles.

Dans l'amortissement dégressif, le taux d'amortissement est obtenu à partir du taux linéaire affecté d'un coefficient :

- Ce coefficient est égal à 2 si la durée normale d'utilisation du bien est inférieure ou égale à 5 ans ;
- Ce coefficient est égal à 2,5 si la durée normale d'utilisation du bien est supérieure à 5 ans. Dans l'élaboration du tableau d'amortissement, pour chaque annuité, le taux le plus grand est appliqué.

L'amortissement dégressif est un avantage accordé par les services accrédités. Il varie avec le temps et permet de payer moins d'impôts lors des premières années où les recettes engendrées sont faibles et plus d'impôts pendant les dernières années où les recettes sont plus substantielles. Dans le cadre de ce projet, nous considérons l'amortissement linéaire.

1.4. Le compte d'exploitation prévisionnel

Ce compte retrace les variations des dépenses de l'entreprise d'une année à une autre et les variations des ressources correspondantes. Le compte d'exploitation prévisionnel montre la façon dont les dépenses ont été effectuées et indique le montant d'autofinancement de l'année. C'est le seul moyen dont dispose l'entreprise pour vérifier à priori que sa politique

d'investissement et de financement est cohérente. La capacité d'autofinancement (CAF) de l'entreprise se désigne cash-flow :

$$\text{Cash-flow} = \text{Résultat net} + \text{Amortissements} \quad (19)$$

$$\text{Résultat net} = \text{Bénéfice imposable} - \text{impôts} = \text{Bénéfice imposable} \times (1 - t) \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \text{Bénéfice imposable} &= \text{Recettes d'exploitation} - \text{Charges d'exploitation} - \text{Amortissements} \\ &= \text{Chiffre d'affaires} - \text{Ensemble des charges} \end{aligned} \quad (21)$$

t = taux d'imposition = 25 % (impôts sur le bénéfice)

La capacité d'autofinancement mesure le montant des fonds engendrés au cours de l'exercice et qui reste à la disposition de l'entreprise (après le versement des dividendes).

1.5. Evaluation de la rentabilité financière du projet

Nous présentons ici certains critères de rentabilité des projets d'investissements industriels. Ces critères sont déterminants pour la validation ou non du projet.

1.5.1. Valeur actuelle nette du projet (VAN)

Elle s'évalue par la différence entre la valeur actualisée des entrées de fonds et la valeur actualisée des sorties de fonds pour la durée du projet :

Avec la méthode fiscale, la VAN est donnée par la formule suivante :

$$\text{VAN} = -I + \sum \text{recettes nettes} \times (P/Fn, i\%, n) - \sum \text{Coûts nets} \times (P/Fn, i\%, n) \quad (22)$$

Taux d'actualisation : $i\% = 10\%$, il représente le taux d'intérêt dont on se sert pour déterminer la valeur actuelle d'un montant futur,

n = durée du projet = 10 ans

P = valeur Présente d'un montant

F_n = valeur future d'un montant au cours de l'année n

$$(P/Fn, i\%, n) = \text{coefficient de calcul de } P \text{ sachant } F_n \text{ au taux } i \text{ sur } n \text{ années} = \frac{1}{(1+i)^n}$$

Le mode d'utilisation de ce critère est le suivant :

- Si la VAN ≥ 0 , le projet est rentable ;
- Si la VAN ≤ 0 , le projet est rejeté ;

- S'ils existent plusieurs projets exclusifs, le choix se porte sur le projet dont la VAN est la plus élevée.

La méthode des cash-flow est utilisée pour l'estimation de la VAN :

$$\text{VAN} = - \text{Investissement} + \text{Valeur actuelle des cash flow} \quad (23)$$

1.5.2. Délai de récupération du capital investi (DRC)

C'est le délai nécessaire pour que les recettes du projet équilibrent le montant des dépenses d'investissement. Si les entrées de fonds ne sont pas constantes d'une année à une autre, on détermine la période de recouvrement en ajoutant aux montants encaissés durant l'année les montants encaissés précédemment jusqu'à ce que la somme égalise l'investissement initial. La valeur de l'argent varie dans le temps et ce phénomène est pris en compte en actualisant les flux monétaires. Ce critère tient compte de l'impact que peut avoir un projet sur la liquidité de l'entreprise. Le DRC est un moyen de mesurer le risque, si on accepte l'hypothèse que le risque augmente avec le temps.

1.5.3. Le taux de rendement interne (TRI)

Ce critère est fondamental dans le choix de projets d'investissement à caractère macro économique, le taux de rendement interne est le taux d'actualisation pour lequel la VAN est nulle. En d'autres termes, c'est le taux pour lequel la valeur actuelle des revenus futurs est égale au capital investi.

Si le TRI est supérieure au coût du capital de 10 % ; le projet est retenu.

Si le TRI est inférieure à 10 %, le projet est rejeté.

1.5.4. Le taux de rendement externe (TRE)

Le TRE est un critère important dans les projets d'investissements privés en micro-économie. Il traduit le réinvestissement des recettes générées par un projet. Il s'estime à l'aide de la relation suivante :

$$\text{TRE} = i\% \text{ tel que } [\sum \text{VF (Recettes nettes)} - \sum \text{VF (sorties nettes)}] \times (P/F, \text{TRE}, n) = I \quad (24)$$

Si le TRE est supérieur au taux d'actualisation de 10 % alors le projet est rentable.

1.5.5. Indice d'enrichissement (IR)

C'est le rapport de la valeur actualisée des entrées de fonds sur la valeur actualisée des sorties de fonds. Il indique le rendement par FCFA investi. On accepte les projets dont l'indice est supérieur ou égale à 1. Ce critère présente les résultats sous forme d'analyse Bénéfices / coûts.

$$IR = \frac{\sum \text{Recettes nettes (Po/Fn, i \%, n)}}{\sum \text{Coûts nets (Po / Fn, i \%, n)}} \quad (25)$$

En économie, la notion d'indice d'enrichissement (IR) équivaut au rapport avantages sur

$$\text{coûts : } IR = \frac{\text{Avantages}}{\text{Coûts}} \quad (26)$$

2. DISCUSSION SUR L'ETUDE FINANCIERE

Au vu des projections financières (tableau 26), l'installation de l'unité de biométhanisation destinée à l'électrification du monastère de Keur Moussa est un projet qui semble ne pas être rentable :

La VAN est négative pour une période d'activité de 9 ans, les capitaux susceptibles d'être investis sur fonds propres ne peuvent pas être récupérés dans moins de 10 ans. En conclusion, il serait très risqué d'investir des capitaux propres dans ce projet sans l'apport de subventions. Toutefois les gains environnementaux sont des recettes intangibles. L'impact environnemental est important si bien que s'il pouvait être chiffré ce projet serait immédiatement rentable.

Tableau 16 : Projection financière du projet d'électrification

Libellé	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Investissement	234609540								
Charges d'exploitation									
Frais d'entretien du bétail	0	800000	800000	800000	800000	800000	800000	800000	800000
Frais d'entretien des équipements	0	375000	375000	375000	375000	375000	375000	375000	375000
Total des charges d'exploitation	0	1175000	1175000	1175000	1175000	1175000	1175000	1175000	1175000
Economie sur l'achat de gaz combustible		170000	170000	170000	170000	170000	170000	170000	170000
Economie sur les factures d'électricité		1630000	1630000	1630000	1630000	1630000	1630000	1630000	1630000
Recettes avant impôt	0	156000	156000	156000	200000	200000	200000	200000	200000
Amortissement linéaire		6464070	6140866,5	5833823,175	5542132,016	5265025,415	5001774,145	4751685,437	4514101,166
Résultat		156000	156000	156000	200000	200000	200000	200000	200000
flux financiers ou cash flow	-234609540	156000	156000	156000	200000	200000	200000	200000	200000
Valeur actuelle des flux financiers	-234609540	141818,1818	128925,6198	117205,1089	136602,6911	124184,2646	112894,786	102631,6236	93301,47604

LA VALEUR ACTUELLE NETTE (VAN) DU PROJET EST DE **-233567156,7 FCFA**

CONCLUSION GENERALE

Les populations rurales sont les plus nombreuses et les plus pauvres. Les raisons liées aux difficultés d'accès à l'électricité de ces populations et à la lutte pour un environnement durable sont à l'origine de ce projet. Ces objectifs nobles découlent directement des huit (8) objectifs du millénaire pour le développement (OMD) édictés par l'ONU et que tous les pays membres devraient atteindre à l'orée 2020.

Au départ de l'étude technique, cette unité de biométhanisation devrait permettre au monastère de Keur Moussa situé dans une communauté rurale de la ville de Thiès de s'auto-alimenter en électricité afin de contourner la crise énergétique actuelle. Cette autonomie permet en même temps de réaliser des économies sur le paiement des factures d'électricité équivalentes à 17.500.000 F en moyenne chaque année. D'autres dépenses seraient également évitées :

- l'achat de gaz combustible pour la cuisine d'un montant moyen de 1.700.000 F par ans,
- l'achat de fertilisants agricoles pour les terres cultivables,
- l'achat de carburant pour le fonctionnement du groupe électrogène.

En plus, cette unité de biométhanisation engendre des recettes d'exploitation dues à la perception de redevances pour le traitement des déchets domestiques extérieurs.

A la fin de notre travail, l'étude financière nous indique que l'investissement requis pour la mise en place de l'unité de biométhanisation semble relativement important. Les indicateurs de rentabilité financière sont défavorables. D'emblée, si nous tenons compte de l'aspect purement financier, ce projet semble ne pas être rentable. Alors que hormis l'autonomie énergétique, ce projet présente un impact considérable sur l'assainissement de l'environnement et l'amélioration de la santé des populations. De ce point de vue, le projet peut être rentable si le cas échéant il peut bénéficier de subventions de la part d'organismes publics ou privés.

Pour finir, il faut souligner que la crise énergétique actuelle est pernicieuse : pénurie du gaz combustible butane et des autres matières premières fossiles entraînant une hausse vertigineuse de leurs coûts. Une autre étude financière et économique (voir appendice) nous a permis de découvrir que la commercialisation de bouteilles du gaz combustible biométhane identiques aux bouteilles du gaz butane pourrait être un marché porteur.

Nos recommandations concernent des prescriptions techniques pour l'exploitation éventuelle de l'unité de biométhanisation et s'inscrivent surtout dans le cadre du projet de commercialisation de bouteilles de biométhane.

RECOMMANDATIONS

1. Tester le pouvoir méthanogène de la biomasse disponible ;
2. Faire une étude d'implantation de l'unité de biométhanisation : détermination des spécifications précises des équipements de plomberie industrielle (caractéristiques des pompes, spécificités des tuyauteries, débits d'écoulement, pression de service, etc.) et des autres équipements de production ; situer le meilleur emplacement géographique de l'unité de biométhanisation ;
3. Mettre en place un prototype de l'unité de biométhanisation ;
4. fournir les moyens nécessaires afin d'affiner l'étude financière ;
5. faire une étude de marché approfondie pour la commercialisation de bouteilles de biométhane ;
6. envisager une formation technique des responsables de l'unité de biométhanisation ;
7. Mettre en place une véritable stratégie de maintenance préventive et curative ;
8. Mettre l'accent sur les moyens de distribution des produits.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Conseil Mondial de l'Energie, ONU**
L'énergie pour le monde de demain, le temps de l'action - Editions TECHNIP, 2000
- [2] **Nations Unies**
Rapport du protocole de Kyoto à la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, 1998
- [3] **National Academy of Sciences (1977).**
Methane generation from human, animal, and agricultural Wastes, Board on science and technology for international development, Washington, D.C, 1977
- [4] **Bureau d'étude en environnement, énergie et mobilité -Sprl –Facilitateur en Biométhanisation**
Rapport Vade mecum: technique et administratif relatif à la biométhanisation de biomasse humide en Région wallonne pour les installations d'une puissance maximale de 10 MWthermique.
- [5] **Manuel du biogaz chinois**
Intermediate technology, London, 1981
- [6] **Demeyer, A., Jacob, F., Jay, M., Menguy, G., Perrier, J.**
La conversion bioénergétique du rayonnement solaire et les biotechnologies, Technique et documentation Lavoisier, 1982
- [7] **Petit, Jacques**
Le compost : théorie et pratique, 3 éd, Mandeville, Québec : Editions L'oiseau moqueur, 1988, c 1976
- [8] **Madigan et al, Biology of Microorganisms, Prentice Hall Int., 1997**
- [9] **Ross E., McKinney**
Microbiology for sanitary engineers. Department of Civil Engineering, University of Kansas, USA /New-York, Mc Graw-Hill, 1962
- [10] **Charles C. TIEMTORE,**
Projet de Fin d'études : Implantation d'une unité de Chaudronnerie à la CGE-Dakar, Ecole Supérieure Polytechnique de Thiès, juillet 2000, 75p.
- [11] **Héduit Michèle**
La filière biométhane dans les pays en développement, éd. de l'institut de l'Energie des pays ayant en commun l'usage du français, publications du Québec, I 993. 82p

APPENDICE

ETUDE FINANCIERE ET ECONOMIQUE DU PROJET DE COMMERCIALISATION DE BOUTEILLES DE BIOMETHANE : CAS DES PETITES BOUTEILLES STANDARD DE « 10 Litres, 6 bar ».

I- HYPOTHESES

La capacité initiale de production de biométhane destinée à l'électrification est fixée à **730 m³** de biométhane par jour. La taille du bétail minimale est de **560 bovins** et le coût d'acquisition du bétail est estimé à **84.000.000 F** (150.000 F par bovin).

Pour la commercialisation de bouteilles de biométhane, nous limitons initialement la capacité de production journalière de l'unité à **200 m³** de biométhane afin de réduire le coût d'acquisition du bétail. Une taille de **250 bovins** est largement suffisante pour satisfaire une production de 200 m³ de gaz. Le coût d'acquisition d'un bétail de 250 bovins est estimé à **37.500.000 F**.

Des investigations sur le marché ont permis de collecter des informations sur les prix actuelles des bouteilles du gaz combustible butane :

- Prix d'une bouteille de gaz butane (« 10 litres; 6 bars ») est de **2800 F**; la durée moyenne d'utilisation est de 1 semaine pour une famille.

En ce qui nous concerne, il faut savoir que le PCI du gaz butane est de l'ordre de **29.560 kcal / m³**, le PCI du méthane pure est de l'ordre de **8570 kcal / m³**; environ quatre (4) fois plus bas. Aussi, le méthane est présent dans le biométhane suivant une proportion de 50 à 90 %. Pour une même capacité le biométhane s'épuise environ 4 fois plus dans des conditions d'utilisation identiques. Notre bouteille de « 10 litres, 6 bars » doit contenir au moins 4 fois plus de volume de biométhane pour respecter les durées habituelles d'utilisation. Nous choisissons :

- une bouteille de biométhane (7 × « 10 litres, 6 bars ») à vendre au prix de **500 F à l'usine**.

Quelques données techniques de production des bouteilles de gaz sont les suivantes :

- Capacité d'une bouteille de biométhane ($7 \times \ll 10 \text{ litres, 6 bars} \gg$) = **70 litres** ;
- Masse volumique du méthane (25 °C, 50 bars) $\approx 0,0329 \text{ kg / m}^3$;
- Masse nette d'une bouteille $\approx 2,3 \text{ g}$;
- Production journalière de 200 m^3 ou **200.000 litres**, la masse correspondante est environ de **6580 g** ;
- Nombre de bouteilles produites par jour ≈ 2857 bouteilles ;
- Production annuelle (365 jours) estimée à $2401,7 \text{ kg}$, soient **2,4 tonnes par année**;
- Nombre de bouteilles produites dans l'année $\approx 1.042.805$ bouteilles par année;
- Cas spécifique du marché de la région de Thiès : $1.358.658$ habitants (année 2004) et la consommation en gaz combustible butane est estimée à **2300 tonnes par année** (année 2000).

II- ANALYSE FINANCIERE

Cette analyse permet d'évaluer le coût du projet de commercialisation de bouteilles de biométhane. Elle permet également :

- d'estimer les charges d'exploitation,
- d'estimer le chiffre d'affaire par année,
- d'établir les comptes prévisionnels,
- d'établir le tableau des flux financiers,
- d'évaluer les indices de rentabilité notamment le TRI, le TRE, la VAN, l'IR et le DRC.

Ce projet nécessite un investissement initial de **265. 982. 500 FCFA**, les résultats indiquent sur 10 ans que :

- Le TRI = 52%
- Le TRE = 38%
- La VAN = $1.223.297. 123 \text{ FCFA}$
- L'IR = $2,67$
- Le DRC = 2 ans

II- ANALYSE ECONOMIQUE

Ce projet permet de créer au moins 10 emplois avec une masse salariale d'au moins 10.440.000 FCFA par ans. Les services des finances encaisseront des recettes fiscales d'un montant de 678.718.760 FCFA sur 10 ans à titre d'impôts sur les sociétés. Ce marché semble porteur, la demande risque d'augmenter considérablement, de ce fait l'accent devra être mis sur les moyens de distribution. Le changement des habitudes pourrait initialement créer une légère résistance sociale de la part des populations. Les zones rurales devraient être les principales cibles.

Tableau 17 : Programme des investissements

PROGRAMME DES INVESTISSEMENTS										
	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8	Année 9	Année 10
Charges immobilisées	2 500 000									
Immobilisations incorporelles	.									
			.	.	.	.	0		.	
Immobilisations financières	.			0					0	
Sous total immobilisations	249 230 000	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Variation du BFE	12 127 500	. 375 000	500 001	. 500 001	.	.	.	.	.	.
Divers et imprévus	5 000 000									
Total	266 357 500	. 375 000	500 001	. 500 001	.	.	.	.	.	.
Coût du Projet	265 982 500	F.CFA								

Tableau 18 : Estimation du besoin en fonds de roulement

Recapitulatif des charges	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8	Année 9	Année 10
	Achat fournitures conso	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Achat fournitures entretien	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
achat de prestation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sous total achat	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Frais de personnel	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000
Frais généraux	38 070 000	36 570 000	38 570 000	36 570 000	36 570 000	36 570 000	36 570 000	36 570 000	36 570 000	36 570 000

Besoins par mois	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8	Année 9	Année 10
composants ordinateurs	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Achat réseau	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Achat fournitures conso	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Achat fournitures entretien	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Frais de personnel	870 000	870 000	870 000	870 000	870 000	870 000	870 000	870 000	870 000	870 000
achat de prestation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Frais généraux	3 172 500	3 047 500	3 214 167	3 047 500	3 047 500	3 047 500	3 047 500	3 047 500	3 047 500	3 047 500
BFE	4042500	3917500	4084167	3917500	3917500	3917500	3917500	3917500	3917500	3917500

	Besoins en mois	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8	Année 9	Année 10
composants ordinateurs	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Achat réseau		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Achat fournitures conso		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Achat fournitures entretien		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Frais de personnel	3 mois	2610000	2610000	2610000	2610000	2610000	2610000	2610000	2610000	2610000	2610000
achat de prestation	3 mois	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Frais généraux	3 mois	9517500	9142500	9642501	9142500	9142500	9142500	9142500	9142500	9142500	9142500
BFE (3 mois de prévision)		12127500	11752500	12252501	11752500	11752500	11752500	11752500	11752500	11752500	11752500
VARIATION BFE		12127500	-375000	500001	-500001	0	0	0	0	0	0

Tableau 19 : Charges salariales

CHARGES SALARIALES												
	Année 1			Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8	Année 9	Année 10
	Prix Unit.	Qté	Montant	Montant	Montant	Montant	Montant	Montant	Montant	Montant	Montant	Montant
Salaire brut Ouvriers	750000	12	9000000	9000000	9000000	9000000	9000000	9000000	9000000	9000000	9000000	9000000
Salaire brut Chauffeur	75000	12	900000	900000	900000	900000	900000	900000	900000	900000	900000	900000
Salaire brut Apprenti	45000	12	540000	540000	540000	540000	540000	540000	540000	540000	540000	540000
Total salaire Brut	870000		10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000
		12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total IPRES	0		.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total CSS	0		.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total CFCE	0		.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
TOTAL	870 000	12	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000

Tableau 20 : Autres charges d'exploitation

AUTRES CHARGES D'EXPLOITATION										
Année	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Consommation carburant Groupe Electrogène	21 900 000	21 900 000	21 900 000	21 900 000	21 900 000	21 900 000	21 900 000	21 900 000	21 900 000	21 900 000
Consommation carburant véhicule	6 570 000	6 570 000	6 570 000	6 570 000	6 570 000	6 570 000	6 570 000	6 570 000	6 570 000	6 570 000
Prime d'assurance	2 000 000	2 000 000	2 000 000	2 000 000	2 000 000	2 000 000	2 000 000	2 000 000	2 000 000	2 000 000
Documentation générale	500 000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Insertions publicitaire	-	1 000 000	1 000 000	1 000 000	1 000 000	1 000 000	1 000 000	1 000 000	1 000 000	1 000 000
Frais de participation aux foires commerciales	2 000 000		2 000 000							
Frais de téléphone	2 400 000	2 400 000	2 400 000	2 400 000	2 400 000	2 400 000	2 400 000	2 400 000	2 400 000	2 400 000
Honoraire Cabinet	1 200 000	1 200 000	1 200 000	1 200 000	1 200 000	1 200 000	1 200 000	1 200 000	1 200 000	1 200 000
vignette	500 000	500 000	500 000	500 000	500 000	500 000	500 000	500 000	500 000	500 000
Frais d'assurance du véhicule	1 000 000	1 000 000	1 000 000	1 000 000	1 000 000	1 000 000	1 000 000	1 000 000	1 000 000	1 000 000
Total	38 070 000	36 570 000	38 570 000	36 570 000	36 570 000	36 570 000	36 570 000	36 570 000	36 570 000	36 570 000

Tableau 21 : Les charges immobilisées

CHARGES IMMOBILISEES		AMORTISSEMENT				
		Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5
Frais de constitution	1 000 000	333 333	333 333	333 333		
Frais de publicité et de lancement	1 500 000	500 000	500 000	500 000		
Frais de fonctionnement antérieur au démarrage						
Frais de formation						
Total	2 500 000	833 333	833 333	833 333	-	0

Tableau 22 : Frais de Formation des responsables de l'unité de biométhanisation

Formation du Personnel	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8
Frais de formation local	1 000 000							
Frais de formation extérieur	5 000 000							
Frais de formation en Management	2 000 000							
Frais de voyage pour formation								
Billet d'avion								
Frais d'Hotel								
Frais Hotel								
Frais de déplacement								
Frais de mission								
Total	8 000 000	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 23 : Annuités des immobilisations Corporelles

LES AMORTISSEMENTS

Tableau des annuités

Libellés	Montant	Durée (ans)	Annuités	Taux constant	Taux dégressif
Frais de construction Génie civil	82152000	20	4107600	0,05	0,125
Equipements d'exploitation	177675000	10	17767500	0,1	0,25

Tableau des amortissements annuels par méthode dégressif

Libellés	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Frais de construction Génie civil	10269000	8985375	7862203,125	6879427,734	6019399,268	5267081,859	4608679,127	4032594,236	3528519,956	3087454,96
Equipements d'exploitation	13168750	9876562,5	7407421,875	5555566,406	4166674,505	3125006,104	2343754,578	2343754,578	2343754,578	2343754,58
Total des amortissements	23437750	18861937,5	15269625	12434994,14	10186174,07	8392067,963	6952433,704	6376348,814	5872274,534	5431209,54

Tableau 24 : Prévision du Chiffre d'Affaire

PREVISION DU CHIFFRE D'AFFAIRE										
Année	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Demande annuelle en gaz combustible de la ville de Thiès (An 2000)	2300 tonnes	2300 tonnes	2300 tonnes	2300 tonnes	2300 tonnes	2300 tonnes	2300 tonnes	2300 tonnes	2300 tonnes	2300 tonnes
Production annuelle	2,4 tonnes	2,4 tonnes	2,4 tonnes	2,4 tonnes	2,4 tonnes	2,4 tonnes	2,4 tonnes	2,4 tonnes	2,4 tonnes	2,4 tonnes
Production de bouteilles 70 litres	1.042.857	1.042.857	1.042.857	1.042.857	1.042.857	1.042.857	1.042.857	1.042.857	1.042.857	1.042.857
Nombre de bouteilles vendu	500000	500000	500000	600000	700000	800000	800000	800000	800000	800000
Prix unitaire	500 FCFA	500 FCFA	500 FCFA	500 FCFA	500 FCFA	500 FCFA	500 FCFA	500 FCFA	500 FCFA	500 FCFA
Vente de bouteilles de Gaz	250000000	250000000	250000000	300000000	350000000	400000000	400000000	400000000	400000000	400000000
CHIFFRE D'AFFAIRE	250 000 000	250 000 000	250 000 000	300 000 000	350 000 000	400 000 000	400 000 000	400 000 000	400 000 000	400 000 000

Tableau 25 : Compte de résultat prévisionnel

COMPTE DE RESULTAT PREVISIONNEL											
	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8	Année 9	Année 10	
Chiffre d'Affaire	250 000 000	250 000 000	250 000 000	300 000 000	350 000 000	400 000 000	400 000 000	400 000 000	400 000 000	400 000 000	
Achat	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Charges salariales	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	
Frais généraux	38 070 000	36 570 000	38 570 000	36 570 000	36 570 000	36 570 000	36 570 000	36 570 000	36 570 000	36 570 000	
Dotations aux amortissements	25 612 500	21 014 000	21 014 000	21 014 000	17 514 000	21 014 000	20 976 000	21 122 154	21 122 154	21 122 154	
Charges d'exploitation	74 122 500	68 024 000	70 024 000	68 024 000	64 524 000	68 024 000	67 986 000	68 132 154	68 132 154	68 132 154	
Résultat Brut	175 877 500	181 976 000	179 976 000	231 976 000	285 476 000	331 976 000	332 014 000	331 867 846	331 867 846	331 867 846	
Service de la dette	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Résultat net avant impot	175 877 500	181 976 000	179 976 000	231 976 000	285 476 000	331 976 000	332 014 000	331 867 846	331 867 846	331 867 846	
Impot sur les sociétés	43 969 375	45 494 000	44 994 000	57 994 000	71 369 000	82 994 000	83 003 500	82 966 962	82 966 962	82 966 962	
Résultat net après impôts	131 908 125	136 482 000	134 982 000	173 982 000	214 107 000	248 982 000	249 010 500	248 900 885	248 900 885	248 900 885	
Cash Flow	157 520 625	157 496 000	155 996 000	194 996 000	231 621 000	269 996 000	269 986 500	270 023 038	270 023 038	270 023 038	
											Total
											678 718 760

Tableau 26 : Les flux financiers – partie 1

TABLEAU DES FLUX FINANCIERS											
Investissements	ANNEE 0	ANNEE 1	ANNEE 2	ANNEE 3	ANNEE 4	ANNEE 5	ANNEE 6	ANNEE 7	ANNEE 8	ANNEE 9	ANNEE 10
Charges immobilisées		2 500 000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Immobilisations incorporelles		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Immobilisations corporelles		246 730 000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Immobilisations financières		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sous total immobilisations	-249 230 000	249 230 000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Variation du BFE	11 752 500	12 127 500	-375 000	500 001	-500 001	-	-	-	-	-	-
Divers et imprévus	5 000 000	5 000 000	0	0	0	-	-	-	-	-	-
Sous-total des investissements		266 357 500	- 375 000	500 001	- 500 001	-	-	-	-	-	-
Dépenses d'Exploitation											
Achat		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Charges salariales		10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000	10 440 000
Frais généraux		38 070 000	36 570 000	38 570 000	36 570 000	36 570 000	36 570 000	36 570 000	36 570 000	36 570 000	36 570 000
Sous total des dépenses d'exploitation		48 510 000	47 010 000	49 010 000	47 010 000	47 010 000	47 010 000	47 010 000	47 010 000	47 010 000	47 010 000
Service de l'emprunt		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dépenses d'exp+ investissements		314 867 500	46 635 000	49 510 001	46 509 999	47 010 000	47 010 000	47 010 000	47 010 000	47 010 000	47 010 000
Chiffre d'affaire		250 000 000	251 000 000	250 000 000	300 000 000	350 000 000	400 000 000	400 000 000	400 000 000	400 000 000	400 000 000
Reprise FDR											11 752 500
Valeur résiduelle											85 299 564
Total recettes d'exploitation		250 000 000	250 000 000	250 000 000	300 000 000	350 000 000	400 000 000	400 000 000	400 000 000	400 000 000	497 052 064
Flux net	- 265 982 500	-64 867 500	203 365 000	200 489 999	253 490 001	302 990 000	352 990 000	352 990 000	352 990 000	352 990 000	450 042 064

TRI 52%
VAN (10%) 1.223.297.123,04

TRE 38%
IR 2,67

DRC = 2 ans

Tableau 27 : Les flux financiers –B –partie 2

RUBRIQUE	ANNEE 0	ANNEE 1	ANNEE 2	ANNEE 3	ANNEE 4	ANNEE 5	ANNEE 6	ANNEE 7	ANNEE 8	ANNEE 9	ANNEE 10
Investissement & Renouvellement	- 249 230 000										
Charges		48 510 000	47 010 000	49 010 000	47 010 000	47 010 000	47 010 000	47 010 000	47 010 000	47 010 000	47 010 000
Recettes		250 000 000	250 000 000	250 000 000	300 000 000	350 000 000	400 000 000	400 000 000	400 000 000	400 000 000	497 052 064
Echéancier											
Flux Financiers Annu	- 249 230 000	201 490 000	202 990 000	200 990 000	252 990 000	302 990 000	352 990 000	352 990 000	352 990 000	352 990 000	450 042 064
Cumul Echéancier FFA	- 249 230 000	- 47 740 000	155 250 000	356 240 000	609 230 000	912 220 000	1 265 210 000	1 618 200 000	1 971 190 000	2 324 180 000	2 774 222 064
RUBRIQUE	Année 0	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8	Année 9	Année 10
RESSOURCES											
CAF		157 520 625	157 496 000	155 996 000	194 996 000	231 621 000	269 996 000	269 986 500	270 023 038	270 023 038	270 023 038
Capitaux propres	-										
Emprunts	-										
Reprise FDR											11 752 500
Valeur résiduelle											85 299 564
Sous total des ressources	-	157 520 625	157 496 000	155 996 000	194 996 000	231 621 000	269 996 000	269 986 500	270 023 038	270 023 038	367 075 102
2. EMPLOIS											
Investissement et renouvellement	249 230 000										
Fonds de roulement		12 127 500	-375 000	500 001	-500 001	-	-	-	-	-	-
Sous total emplois	249 230 000	12 127 500	-375 000	500 001	-500 001	-	-	-	-	-	-
Solde annuel = RESS-EMPLOI	- 249 230 000	145 393 125	157 871 000	155 495 999	195 496 001	231 621 000	269 996 000	269 986 500	270 023 038	270 023 038	367 075 102
Solde cumulé	- 249 230 000	- 103 836 875	54 034 125	209 530 124	405 026 125	636 647 125	906 643 125	1 176 629 625	1 446 652 663	1 716 675 702	2 083 750 804
Distribution de dividendes		13 190 813	13 648 200	13 498 200	17 398 200	21 410 700	24 898 200	24 901 050	24 890 088	24 890 088	24 890 088
Solde après dividendes		132 202 313	144 222 800	141 997 799	178 097 801	210 210 300	245 097 800	245 085 450	245 132 950	245 132 950	342 185 014
Tresorerie début année		- 249 230 000	-117 027 688	27 195 113	169 192 912	347 290 713	557 501 013	802 598 813	1 047 684 263	1 292 817 212	1 537 950 162
Tresorerie fin d'année	- 249 230 000	- 117 027 688	27 195 113	169 192 912	347 290 713	557 501 013	802 598 813	1 047 684 263	1 292 817 212	1 537 950 162	1 880 135 176
Flux des actionnaires	-	13 190 813	13 648 200	13 498 200	17 398 200	21 410 700	24 898 200	24 901 050	24 890 088	24 890 088	1 880 135 176

Tableau 28 : Fiche synoptique du projet CBB

FICHE SYNOPTIQUE

Projet	Commercialisation du gaz combustible biométhane dans des bouteilles
Promoteur	Monastère de Keur Moussa
Forme Juridique	S.A.R.L
Marque déposé	Gaz d'Afrique (GAZAF)
Investissement	265.982.500 FCFA
Besoin en Fond de roulement	12.127.500 FCFA
Emplois créés	10
Masse salariale annuelle	10.440.000 F.CFA
Impôt IS sur 10 ans	678.718.760 F.CFA
Chiffre d'affaire annuel (1ère année)	250.000.000 F.CFA
Avantages sollicités	Loi 81 / 51 régissant le code des investissements Industriels
Indices de rentabilité de l'investissement sur 10 ans	
	TRI 52%
	TRE 38%
	DRC 2 ans
	VAN 1.223.297.123 FCFA

ANNEXES

ANNEXE 1

Les digesteurs discontinus du type DUCELIER ISMAN

Figure 29 : Vue en coupe d'un digesteur

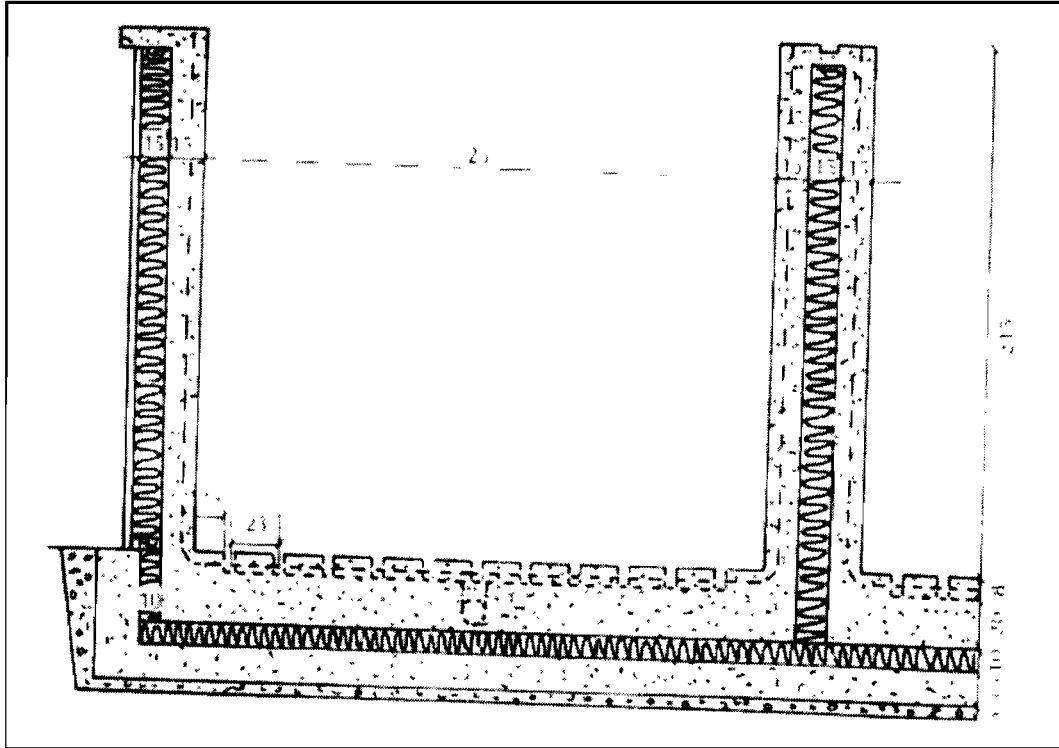
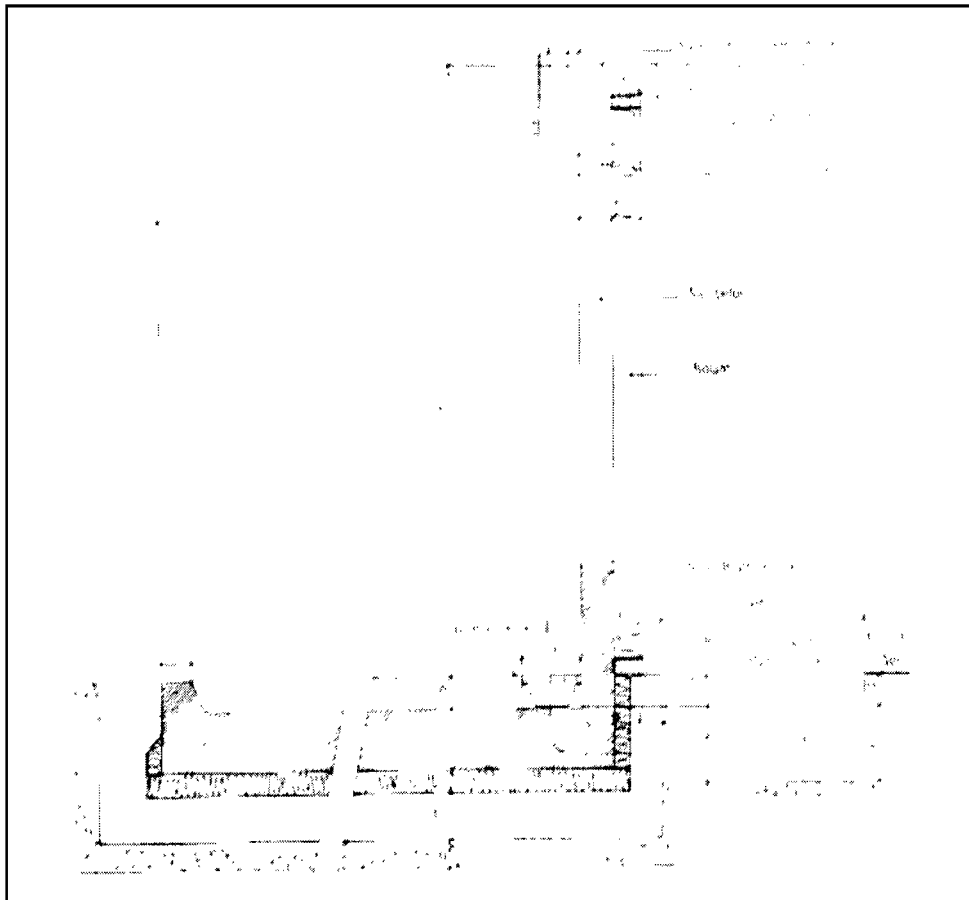


Figure 30 : Coupe longitudinale d'un digesteur



**Figure 31 : Représentation d'un digesteur DUCELIER
(Vue de dessus de 3 digesteurs)**

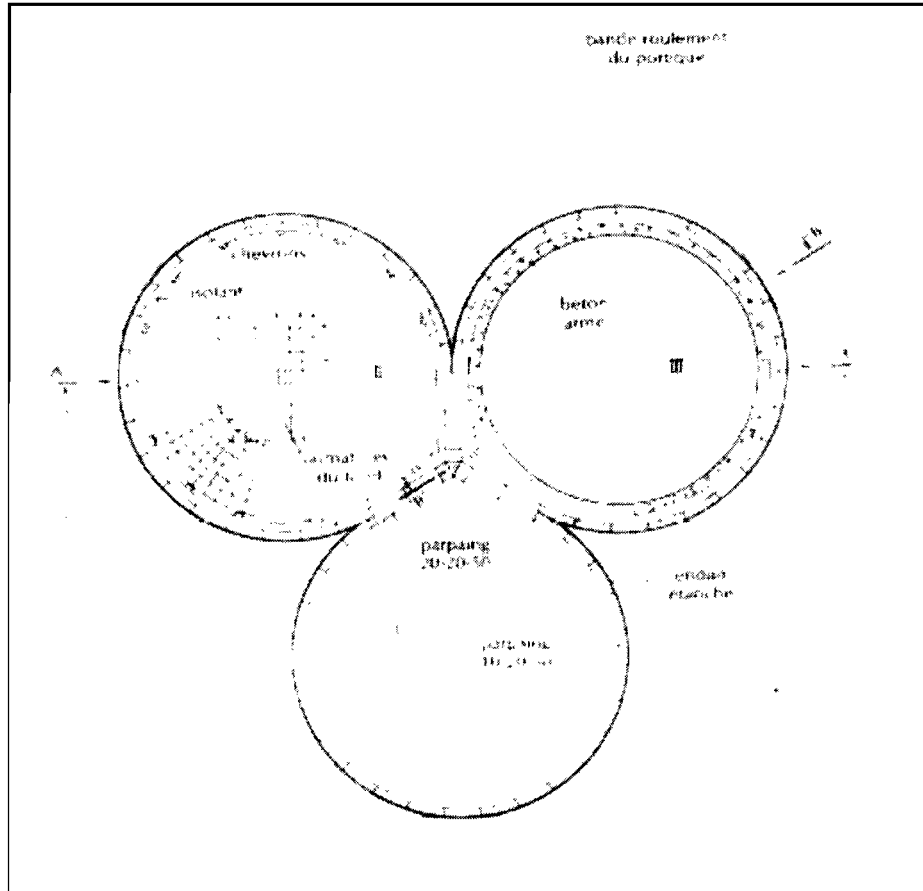


Figure 32 : Coupe A-A' de la figure 31

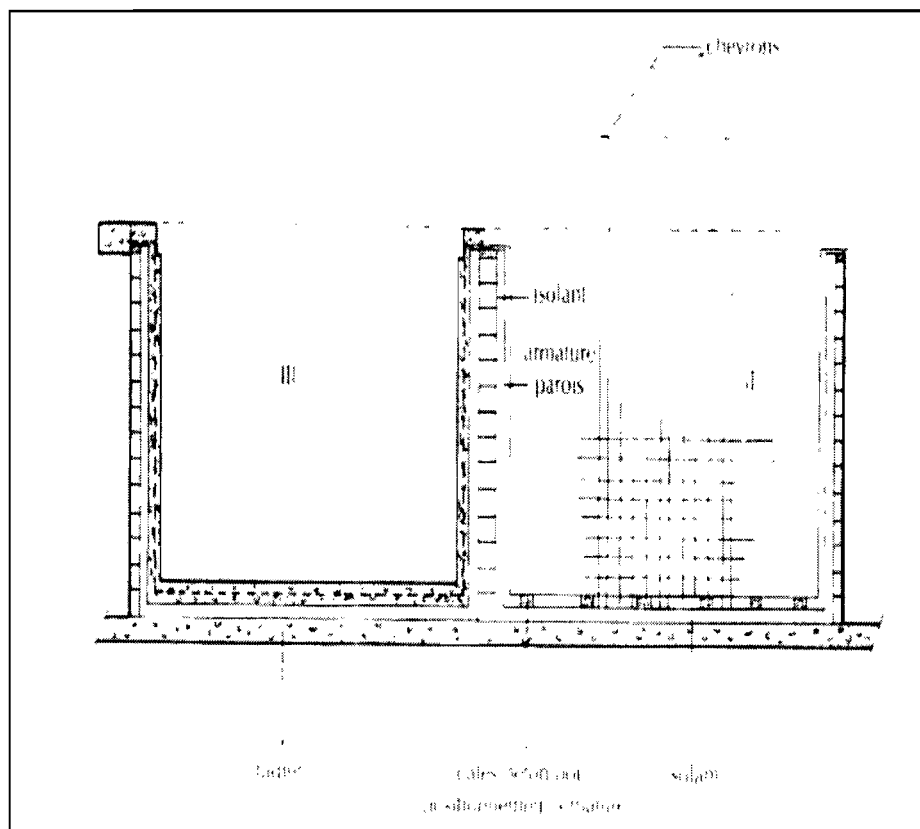
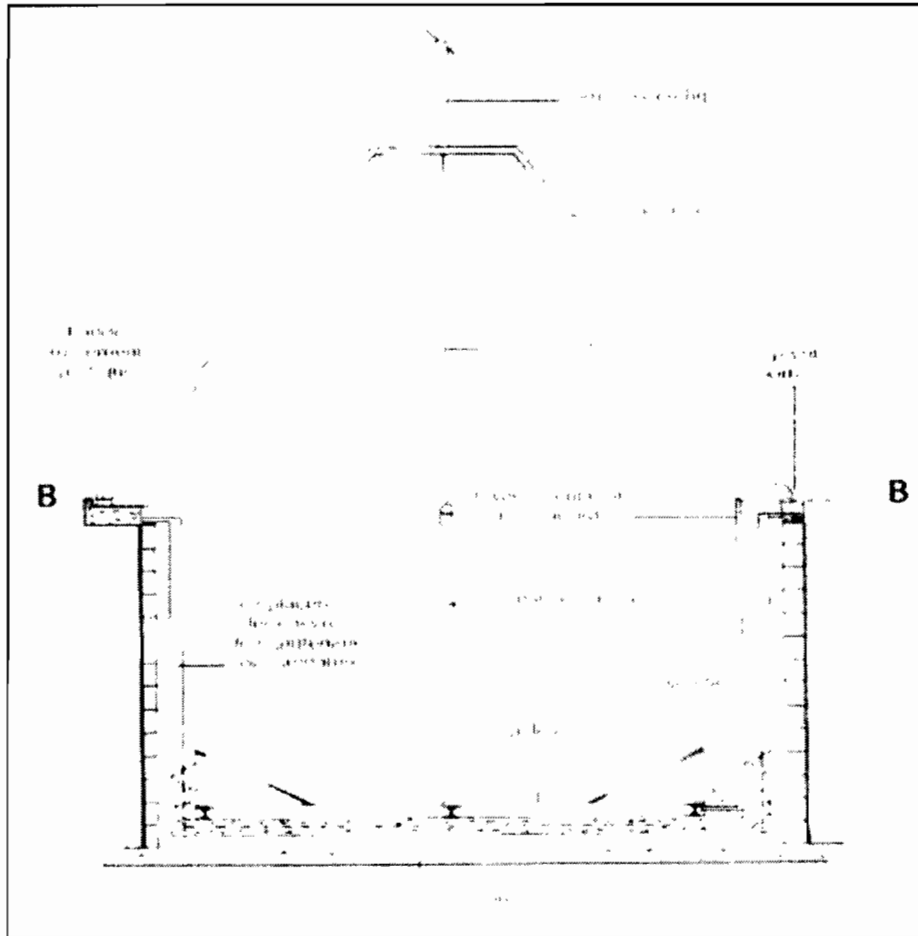


Figure 33 : Coupe B-B' de la figure 31

Utilisation de la palette pour le coffrage du digesteur



ANNEXE 2
Les digesteurs semi-continus du type chinois

Figure 34 : Digesteur à couvercle en caoutchouc - $V_D = 1 \text{ m}^3$.

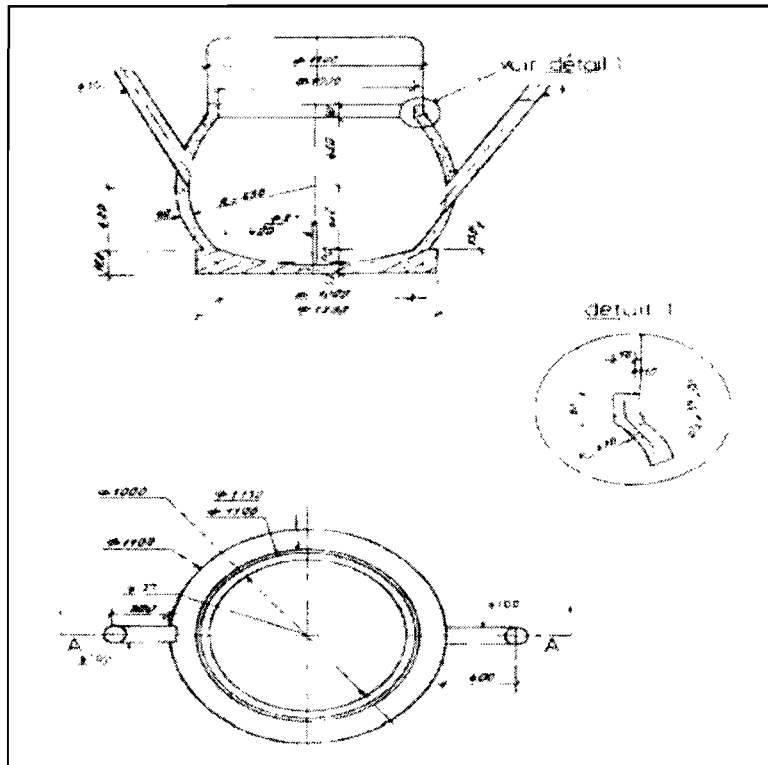
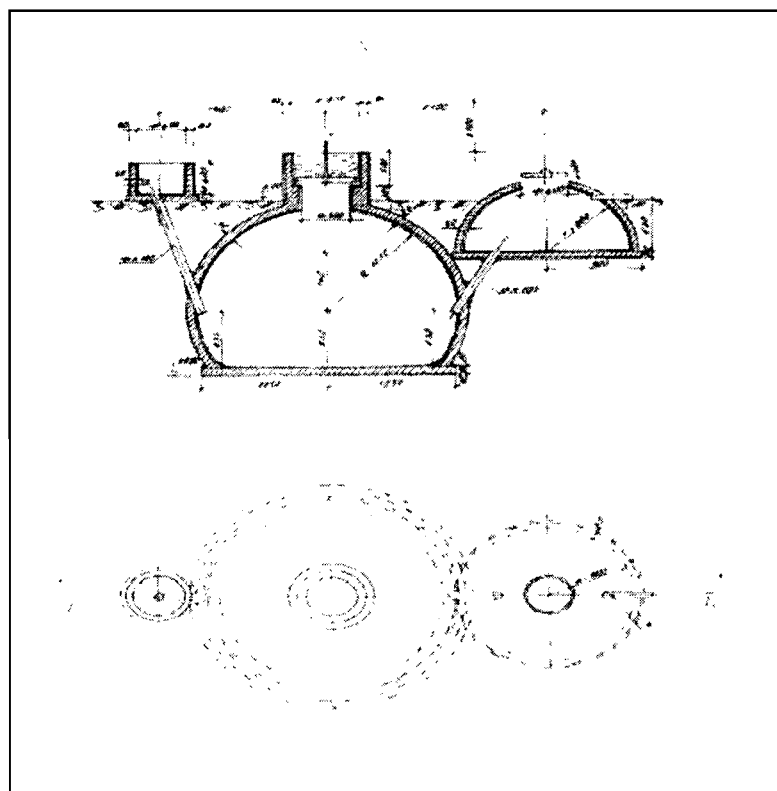


Figure 35 : Digesteur à couvercle fixe en dôme sphérique avec régulation de pression séparée $V_D = 5 \text{ m}^3$.



ANNEXE 3

Les concentrations inoffensives limites des principaux composants du biométhane

Limites supérieures des concentrations de gaz (moyennes pondérées en fonction de la durée) sans danger pour les humains	
Composant du Biogaz	Limite supérieure, en ppm
Méthane (CH₄)	1000
Gaz carbonique (CO₂)	5000
Sulfure d'hydrogène (H₂S)	10
Ammoniac (NH₃)	25
Dioxyde d'azote (NO₂)	3
Oxyde nitrique (NO)	25
Oxydes d'azote (NO_x)	3

Source : Ce tableau est établi par L'American Conference of Government Industrial Hygienists. Il fixe les concentrations maximales de gaz auxquelles l'être humain peut être exposé, sans inconvénient pour la santé, *pendant huit (08) heures par jour et quarante (40) heures par semaine*. Des limites de ce genre n'ont pas été fixées pour les animaux, mais bien des chercheurs pensent que les animaux réagissent aux gaz de la même façon que les humains.

ANNEXE 4

Les effets du sulfure d'hydrogène sur les humains, Selon sa concentration

Concentration du sulfure d'hydrogène (ppm)	Effet sur les humains
0,005	À peine détectable
5	Faible odeur facilement détectable
10	Irritation des yeux
27	Odeur repoussante
100	Toux, irritation des yeux, perte de l'odorat au bout de 2 à 15 minutes
200 - 300	Inflammation des yeux et irritation de l'appareil respiratoire au bout d'une heure
500 - 700	Perte de connaissance et mort éventuelle au bout de 30-60 minutes
8000 - 1000	Perte rapide de connaissance, arrêt de la respiration et mort
1000	Paralysie du diaphragme dès la première inhalation, asphyxie foudroyante

Source: American Society of Agricultural Engineering Standards, 1997.

ANNEXE 5
Les effets des autres composants du biométhane

Méthane	<p>Gaz incolore, inodore et plus léger que l'air, Le méthane n'est pas toxique par lui-même et n'est guère susceptible de poser des problèmes. Par contre il peut être captif et s'accumuler à une concentration pouvant atteindre des niveaux dangereux, et provoquer des maux de tête.</p>
Ammoniac (NH ₃)	<p>Gaz incolore, plus léger que l'air et a une odeur âcre caractéristique Classé parmi les gaz irritants peut causer des maladies respiratoires chez les animaux qui sont exposés à des concentrations importantes pendant de longues périodes À des concentrations de 30-50 ppm, l'ammoniac irrite les yeux.</p>
Gaz Carbonique	<p>Gaz incolore, inodore et plus lourd que l'air Il peut créer un appauvrissement de l'air en oxygène, ce qui peut entraîner l'asphyxie ou la suffocation.</p>
Dioxyde d'azote (NO ₂)	<p>Ce gaz a une odeur caractéristique d'eau de Javel, il peut être visible sous la forme d'un brouillard brun rougeâtre, et est plus lourd que l'air, Il est aussi produit par les réactions chimiques qui se déclenchent presque immédiatement après un entassement de végétaux, C'est un gaz asphyxiant chimique dangereux, même une exposition de courte durée peut provoquer rapidement la mort. Quand il est inhalé, le NO₂ se dissout au contact de l'humidité de la surface interne du poumon et produit un acide puissant appelé acide nitrique. L'acide nitrique brûle les tissus des poumons, provoquant une hémorragie massive et la mort. Une exposition répétée à des concentrations faibles de NO₂ cause des problèmes respiratoires chroniques, dont l'essoufflement, la toux et l'œdème des poumons. <i>Le Dioxyde d'azote NO₂, l'Oxyde nitrique (NO) et l'Oxydes d'azote (NO_x), ont des effets presque semblables.</i></p>

Source : Luc Brunet - ingénieur/MAAARO, Division Agriculture et affaires rurales

Note : Les mesures de protection des personnes exigent de ne jamais pénétrer dans un lieu susceptible de contenir ces gaz sans l'usage d'un appareil de respiration à adduction d'air à pression positive intermittente, sans être relié à l'extérieur par un harnais de sécurité et sans bénéficier de la surveillance constante d'une personne compétente, de placer des écriteaux de mise en garde bien en vue pour avertir les autres de se tenir à l'écart, enfin d'assurer une ventilation adéquate des locaux.

ANNEXE 6
Propriétés physiques du méthane

Propriétés Physiques		
Masse moléculaire	16,043 *u	
Température de fusion (solidification)	90,55 K (-182,48 °C)	
Température d'ébullition (liquéfaction)	111,75 K (-161,49 °C)	
Point triple	90,68 K (-182,47 °C)	
Point critique	190,45 K (-82,7 °C)	
Masse volumique (à -164 °C)	Liquide (à -164°C)	0,415 kg / m ³
	Gaz (à 25°C et 760mm)	0,000658 kg / m ³
Volume Spécifique (à 15,5 °C et 760 mm)	1,47 L / mg	
Pouvoir Calorifique (à 15,5° C et 1 atm)	9 100 kcal / m ³	
Air nécessaire à la combustion m ³ / m ³	9,53	
Limite d'inflammation (%)	5 -15 % par volume	
Indice d'octane	130	
Température d'inflammation En présence d'oxygène	650 °C	
Equation de combustion	$\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$ $\Delta H_c = - 212 \text{ kcal}$	
O ₂ / CH ₄ Réactifs de combustion	3,98 par kg	
O ₂ / CH ₄ Réactifs de combustion	2 par m ³	
CO ₂ / CH ₄ produits de combustion	2,74 par kg	
CO ₂ / CH ₄ produits de combustion	1 par m ³	

Note : *u ou uma est l'unité de masse atomique unifiée, utilisée pour mesurer la masse des atomes et des molécules = $1,66054 \times 10^{-27}$ kg ou encore $1\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

ANNEXE 7

Température de l'air et de l'eau froide de l'année 2006 (Région de Dakar et environs)

MOIS	Température moyenne de l'air (°C)	Température moyenne de l'eau froide (°C)
JANVIER	22,6	19,96
FEVRIER	20,8	19,1
MARS	20,4	17,7
AVRIL	20,4	18,54
MAI	22,9	21,01
JUIN	25,4	23,57
JUILLET	26,6	24,82
AOÛT	27,5	25,57
SEPTEMBRE	27,5	25,29
OCTOBRE	26,6	25,29
NOVEMBRE	25,8	23,46
DÉCEMBRE	23,1	21,27
MOYENNE	24,13	22,13

Source : Données météorologiques, Banda NDOYE, Professeur à l'ESPT

ANNEXE 8
Quelques données sur les gaz

GAZ	Formule	θ °C point d'ébullition	P C I kcal/m ³	P C I kWh/m ³
ACETYLENE	C ₂ H ₂	-83.6	13490	15.686
AMMONIAC	NH ₃	-33	3430	3.988
ARGON	A ₂	-185.8		
AZOTE	N ₂	-195.8		
DIOXYDE DE CARBONE	CO ₂	-78		
BUTANE	C ₄ H ₁₀	-0.5	29560	32.9
CRYLENE		-101.5	14020	16.302
ETHYLENE	C ₂ H ₄	-103.7	14200	16.512
HELIUM	H _e	-268.9		
HYDROGENE	H ₂	-252.8	2570	2.988
METHANE	CH ₄	-161.6	8570	9.965
MONOXYDE DE CARBONE	CO	-191	3020	3.512
OXYGENE	O ₂	-183		
PROPANE	C ₃ H ₈	-42	21850	25.4
HEMIOXYDE D'AZOTE	N ₂ O	-88		
TETRENE			20000	23.256

Valeurs fournies pour une pression de 1,013 bar.
Selon données du G.D.F. (B.T. 104 de sept. 79)

ANNEXE 9

Population des collectivités administratives de la région de Thiès, Année 2004

Départements	Communes	Arrondissements	Communautés rurales
MBOUR : 497 793	Mbour : 165719 Joal-Fadiouth: 35 617 Nguékokh: 18 258 Thiadiaye : 11079	Sessène: 81 100	Sessène : 27 547
			Nguéniène : 30 294
			Sandiara : 23 259
		Fissel : 76 920	Fissel : 34 027
			Ndiagagniao : 42 893
		Sindia : 109 100	Diass : 33 835
			Malicounda : 33 691
			Sindia : 39 674
THIES : 519 830	Thiès : 249 444 Pout : 17 603 Kayar : 17 050 Khombole : 12 136	Keur Moussa : 55 389	Diender : 23 713
			Fandène : 16 497
			Keur Moussa : 15 179
		Notto : 59 219	Notto: 36 326
			Tassette: 22 893
		Thiénéba : 108 987	Thiénéba: 18625
			Touba Toul : 43 780
			Ngoundiane: 22 173
			Ndiayène Sirakh: 24 409
			Méouane : 23 708
TIVAOUANE: 341 035	Tivaouane : 39 076	Méouane : 82 571	Darou Khoudoss : 40 398
			Taïba Ndiaye 18 465
		Mérina Dakhar : 65 055	Mérina Dakhar : 27 030
			Koul : 20 087
	Méckhé : 15 636	Niakhène : 56 568	Pékessse : 17 938
			Ngandiouf : 20 257
			Niakhène : 10 567
			Thilmakha : 16 719
	Mboro : 12 076	Pambal : 70 053	Mbayène 9 024
			Mont Rolland : 12 418
			Notto G Diama : 22 515
			Chérif Lô : 17 087
			Pire Gourèye 18 033

Source : Projection de population du Sénégal en 2004, DPS

ANNEXE 10

Vue de la ferme d'élevage du monastère de Keur Moussa

Façade arrière

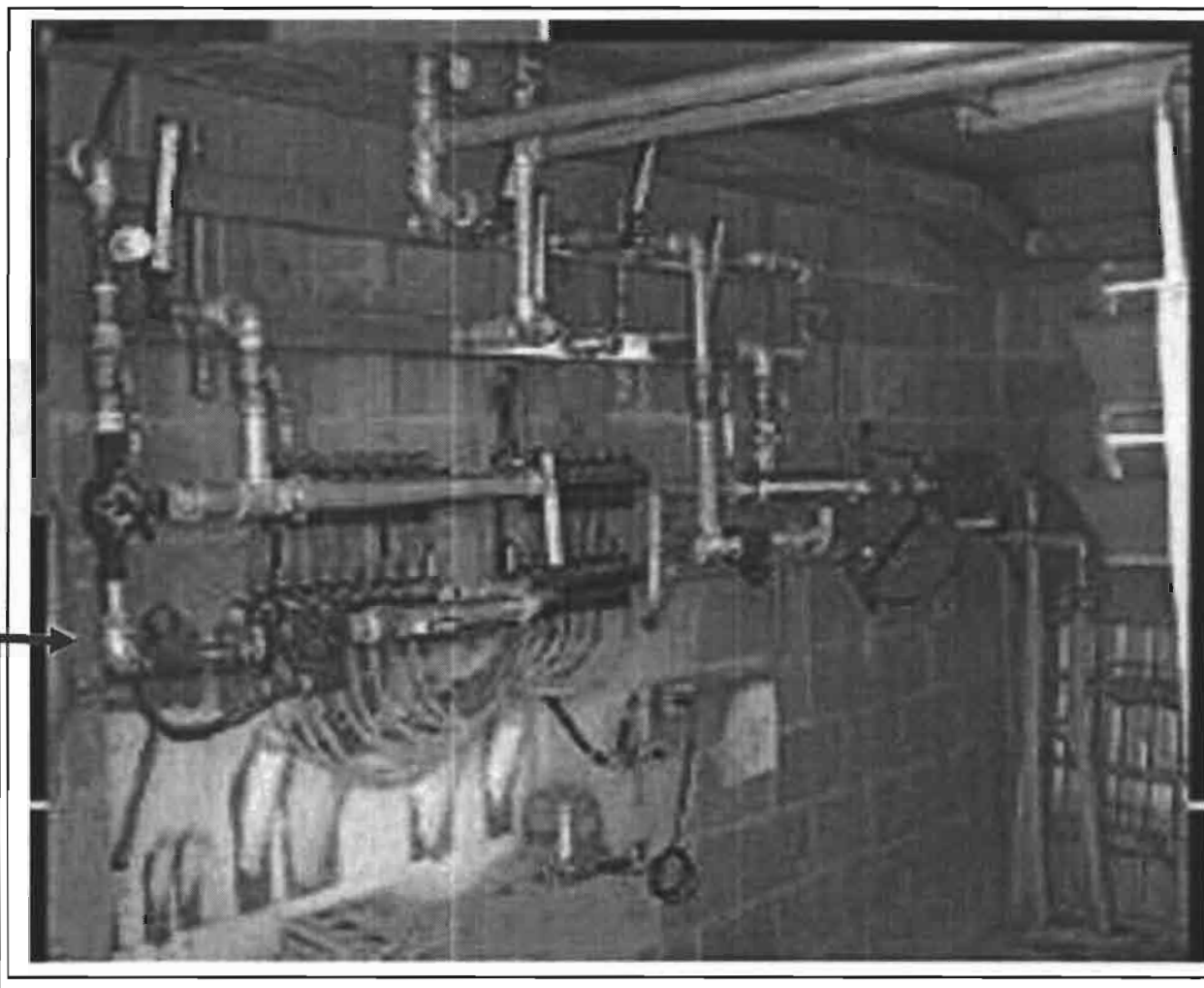


Façade avant



Annexe 11:

Vue de quelques appareillages annexes à l'unité de biométhanisation



Systeme de commande de la température, contrôle de l'agitation,
Contrôle du taux de soufre et analyse du gaz.etc...

**Appel à manifestation d'intérêt paru dans un quotidien national
(mardi 3 juillet 2007)**

AGENCE SENEGALAISE D'ELECTRIFICATION RURALE



APPEL A MANIFESTATION D'INTERET

POUR LE DEVELOPPEMENT DE PROJETS ERILS

PROJET DE DIFFUSION DE L'ACCES AUX SERVICES ELECTRIQUES RURAUX

1. Le Développement du SÉNÉGAL dans le cadre de la politique de développement des services électriques dans les zones rurales a été inscrit par le Gouvernement de la République dans son programme national de développement rural et agricole. Le développement rural est une priorité nationale et le développement rural est une priorité de la Banque mondiale dont une partie est destinée à financer un programme de projets d'électrification rurale d'Initiative Locales (projets ERILs).
2. Les projets d'électrification rurale de petite envergure doivent être réalisés par les acteurs locaux (associations communales, associations d'habitants, associations professionnelles, associations d'artisans, ONG, associations de commerçants professionnels) ou sociétés de droit privé. Le projet ERIL devra commencer au maximum deux (2) ans après l'accord conclu avec l'ASER. Pour être éligible à l'appui financier de l'Agence Sénégalaise d'Électrification Rurale (ASER), un projet ERIL ne pourra pas se situer dans une zone où un autre projet de même nature est en cours de réalisation.
3. Par une subvention à l'investissement initial, l'ASER offre de financer sous forme de subvention une partie des investissements initiaux d'un projet ERIL. La subvention devra être prise en charge par le promoteur du projet. La subvention maximale à l'investissement initial sera d'un maximum de 40 millions de FCFA par village pour une électrification décentralisée et d'un maximum de 60 millions de FCFA par village pour une électrification par raccordement au réseau moyenne tension de la SENELEC (subvention maximum de 60 % de l'investissement initial). Les bénéficiaires devront également s'engager à payer les redevances dues auprès du promoteur et à le rembourser. Les financements qui devront être enclavés incluent le financement des installations électriques initiales.
4. Le promoteur de « Demande d'assistance technique et financière pour la mise en œuvre d'un projet ERIL » ainsi que le guide pratique du porteur de projet sont disponibles au secrétariat de la Direction Générale de l'ASER à l'adresse suivante : Direction Générale de l'ASER, au siège de l'ASER, Direction Administrative et Comptable (DAC) au siège de l'ASER, d'une somme de cinq millions (5.000.000) FCFA. Cette documentation est accessible à tout moment sur le site internet de l'ASER. Lorsque le dossier de projet pour ERIL devra passer à la Direction des Etudes et du Système d'Information (DESI) de l'ASER pour obtenir une estimation sommaire des coûts des études pour l'accompagnement et des investissements pour le cadre de ses quotas-parts.
5. La date de clôture de cet appel à manifestation d'intérêt pour le développement des projets ERILs est fixée au 23 Juillet 2007.
6. Pour de plus amples informations, les porteurs de projet ERIL pourront contacter à l'ASER M. Papa Moubar NGOM, Expert en attribution de Concession PPER et ERIL ou M. Ousmane Fall SARR, Directeur des Etudes et du Système d'Information par téléphone au 849 47 12 ou 849 47 17 par mail à l'adresse électronique en ou au siège de l'ASER, Ex Camp Lar Dior BP 1113, Dakar (Sénégal).

**Le Directeur Général
Aliou NIANG**