



Mémoire

Présenté par

**ANDRIANASOLO, Jean
Lalao Aime**

**UNIVERSITE D'ANTAN
ANARIVO**

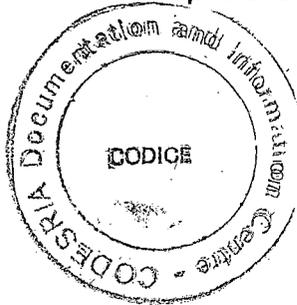
**Essai de Vulgarisation d'un Type de
Digesteur Familial en Milieu Rural**

Année académique :

1984 - 1988

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES
Spécialisation AGRICULTURE



MEMOIRE FIN D'ETUDES
ANNEES UNIVERSITAIRES 1984 — 1988

ESSAI DE VULGARISATION D'UN TYPE DE DIGESTEUR FAMILIAL
EN MILIEU RURAL

Présenté par :

ANDRIANASOLO Jean Lalao Aimé

Mars 1990

78.1706
AND
2609

26 JUIN 1991

08.11.06

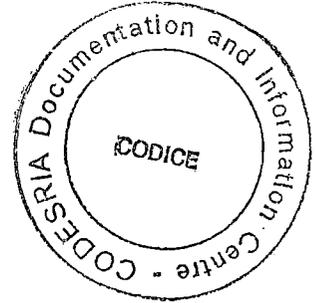
AND

2609

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES

Spécialisation AGRICULTURE



MEMOIRE FIN D'ETUDES

ANNEES UNIVERSITAIRES 1984 — 1988

ESSAI DE VULGARISATION D'UN TYPE DE DIGESTEUR FAMILIAL
EN MILIEU RURAL

Présenté par :

ANDRIANASOLO Jean Lalao Aimé

Mars 1990

ESSAI DE VULGARISATION D'UN TYPE DE DIGESTEUR FAMILIAL
EN MILIEU RURAL

par

ANDRIANASOLO *Jean Lalao Aimé*

Mémoire de Fin d'Etude pour l'Obtention
du diplôme d'Ingénieur des Sciences Agronomiques
Spécialisation AGRICULTURE

Soutenu et présenté à l'Ecole Supérieure
des Sciences Agronomiques

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

MÉMOIRE RÉALISÉ AVEC L'AIDE FINANCIÈRE
DU CONSEIL POUR LE DÉVELOPPEMENT DE LA RECHERCHE
ÉCONOMIQUE ET SOCIALE EN AFRIQUE
(CODESRIA)

"...Dia hoy izy tamiko:
Indro tain'omby no omeko anao
hisolo ny diky, ka izany no
hataonao kitay hanendasanao
ny mofonao".

EZEKIELA 4 : 15

"...Il me répondit:
Voici, je te donne des excréments
de boeuf au lieu d'excréments
humains, et tu feraston pain
dessus.

EZECHIEL 4 : 15

"... Zavatra roa loha no angatahiko
aminao,
Ka aza lavinao dieny tsy mbola
maty aho ;
Ampanalaviro ahy ny zava-poana
sy ny lainga ;
Aza manome ahy alahelo na harena ;
Fahano aho amin'izay anjara hanina
sahaza ho ahy ;
Fandrao raha voky aho,
Dia handà, ka hanao hoe :
Iza moa Jehovah ?
Ary andrao raha tonga malahelo aho,
Dia hangalatra
Ka hanamavo ny anaran'Andriamanitra".

OHABOLANA 30 : 7-9

"...Je te demande deux choses :
Ne me les refuse pas avant que
je meure !
Eloigne de moi de la fausseté et
la parole mensongère ;
Ne me donne ni pauvreté, ni richesse,
Accorde-moi le pain qui m'est
nécessaire,

De peur que dans l'abondance,
je ne te renie
et ne dise : Qui est l'Eternel ?
Ou que, dans la pauvreté, je ne
dérobe,
Et ne m'attaque au nom de mon Dieu.

PROVERBE 30 : 7-9

AVANT - PROPOS

Ce travail a été effectué au Département AGRICULTURE de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques à ANTANANARIVO.

Ce mémoire loin d'être parfait, vise surtout à informer sur l'ampleur des recherches effectuées ainsi que les réalisations des installations de biogaz à Madagascar, en signalant les obstacles qui empêchent sa diffusion, et les solutions proposées pour pallier à ces problèmes.

Nous espérons que ce travail pourra néanmoins fournir quelques enseignements utiles à ceux qui manifestent l'intention de promouvoir cette technologie.

Ce travail n'aurait pu être mené à son terme sans les aides, assistances et conseils qui nous ont été fournis par des organismes et personnes de bonne volonté.

Ainsi nous tenons à témoigner ici notre profonde reconnaissance et adresser nos vifs remerciements

- à Monsieur RABEZANDRINA René, Chef du Département AGRICULTURE de l'E.S.S.A., notre tuteur, qui avec beaucoup de patience, nous a prodigué de précieux conseils au cours de l'élaboration de ce mémoire. Il nous a fait encore le grand honneur de présider le Jury de cette soutenance. Qu'il veuille bien agréer l'expression de notre profonde gratitude et entier dévouement.

- à Monsieur RAKOTONDRAVELO Jean Chrysostôme, Enseignant à l'E.S.S.A., qui n'a ménagé ni son temps ni ses conseils pour nous guider dans les travaux effectués sur terrain et a aussi accepté aimablement de faire partie des membres de Jury. Qu'il veuille trouver ici le fruit de toutes ses aides et notre profonde reconnaissance.

- à Monsieur RABEMANANTSOA Samüel, Conseiller Technique au Ministère de la Production Agricole et du Patrimoine Foncier, qui, malgré ses nombreuses occupations a bien voulu faire partie des membres de Jury. Qu'il veuille bien accepter nos remerciements les plus sincères.

.../...

.../...

- à Monsieur RANDRIANARISOA Emmanuël, Secrétaire Général de l'Energie au Ministère de l'Industrie, de l'Energie et des Mines (M.I.E.M.) qui, malgré sa grande responsabilité, a bien voulu juger notre travail et accepter de faire membre de Jury. Qu'il veuille agréer, l'expression de nos remerciements les plus chaleureux.

- aux Responsables du Conseil pour le Développement de la Recherche Economique et Sociale en Afrique (CODESRIA) qui, dans le cadre du programme de petite subvention destinée à l'élaboration des mémoires et thèses, ont contribué au financement de la réalisation pratique de ce mémoire. Qu'ils veuillent bien agréer, l'expression de notre profonde gratitude et nos remerciements les plus sincères.

- Enfin, à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Qu'ils trouvent ici l'expression de nos vifs remerciements.

ANDRIANASOLO Jean Lalao Aimé.

LISTE DES SCHEMAS

	Pages
- Schéma n°01 : Processus de la biométhanisation	05
- Schéma n°02 : Type discontinu	14
- Schéma n°03 : Type continu	14
- Schéma n°04 : Type Isman-Ducellier	15
- Schéma n°05 : Type Indien	15
- Schéma n°06 : Type Chinois	16
- Schéma n°07 : Gazomètre souple	22
- Schéma n°08 : Gazomètre en durs	23
- Schéma n°09 : Installation n°1 : "5 PAGODES"	33
- Schéma n°10 : Installation n°2 : "5 PAGODES"	34
- Schéma n°11 : Installation n°3 : "5 PAGODES"	35
- Schéma n°12 : Installation N.D. de CLAIRVAUX	37
- Schéma n°13 : Installation n°1 BEVALALA	39
- Schéma n°14 : Installation n°2 BEVALALA	40
- Schéma n°15 : Modèle GTZ à dôme fixe	51
- Schéma n°16 : Digestion à dôme avec mur de séparation et à ballon souple	52
- Schéma n°17 : Digesteur Plug-Flow	53
- Schéma n°18 : Type bordas à cloche	54
- Schéma n°19 : Les fosses annexes	55
- Schéma n°20 : Installation type Chinois	59
- Schéma n°21 : Installation type Chinois à AMBOHIMANGAKELY	66
- Schéma n°22 : Le couvercle	68
- Schéma n°23 : Le manomètre	68
- Schéma n°24 : Le brûleur	69

LISTE DES PHOTOS

- 1 - L'installation de biogaz à AMBOHIMANGAKELY
- 2 - Travaux des parois
- 3 - Construction du dôme
- 4 - Le couvercle
- 5 - Installation des tuyaux d'amenée
- 6 - Le manomètre
- 7 - Le foyer

LISTE DES TABLEAUX

<u>TABLEAU N°1</u> : Composition de quelques substrats	10
<u>TABLEAU N°2</u> : Productions estimées de méthane pour la fermentation anaéro- bie des différents déchets animaux	11
<u>TABLEAU N°3</u> : Production de biométhane par divers substrats	11
<u>TABLEAU N°4</u> : Type de digesteur en fonction de matière première	17
<u>TABLEAU N°5</u> : Avantages et inconvénients systèmes continu - discontinu	21
<u>TABLEAU N°6</u> : Composition du biométhane	25
<u>TABLEAU N°7</u> : Facteur de conversion de différents combustibles	26
<u>TABLEAU N°8</u> : Valeur fertilisante de quelques boues	28
<u>TABLEAU N°9</u> : Comparaison de valeur fertilisante	28
<u>TABLEAU N°10</u> : Rendement de biogaz/volume des digesteurs	36
<u>TABLEAU N°11</u> : Coût des digesteurs	41
<u>TABLEAU N°12</u> : Localisation et type de digesteur	44
<u>TABLEAU N°13</u> : Conduite des digesteurs	57
<u>TABLEAU N°14</u> : Coût des différents types de digesteur	60
<u>TABLEAU N°15</u> : Importance des principales cultures à Ambohimangakely ..	65
<u>TABLEAU N°16</u> : Coût des matériels et des matériaux	70
<u>TABLEAU N°17</u> : Production de biogaz	71
<u>TABLEAU N°18</u> : Coût moyen de cuisson avec les bois de chauffe	72
<u>TABLEAU N°19</u> : Coût moyen avec le charbon	73
<u>TABLEAU N°20</u> : Coût de cuisson au biogaz	74
<u>TABLEAU N°21</u> : Bénéfice par l'utilisation du biogaz	74
<u>TABLEAU N°22</u> : Résultats d'expériences	76
<u>TABLEAU N°23</u> : Comparaison d'énergie consommée	76

LISTE DES ABREVIATIONS UTILISEES

- E.C.Ma.T. : Etablissement Central des Matériels Techniques
E.S.S.Agro. : Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques
F.A.O. : Organisation des Nations-Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
F.E.D. ; Fonds Européen de Développement
FI.FA.MA.NOR.: Association Malgache Norvégienne pour l'Agriculture et l'Elevage
F.M.G. : France Malgache
FO.FI.FA. : Centre de Recherches agronomiques pour le développement
Max. : Maximum
M.B.A. : Marge Brute d'Autofinancement
Min. : Minimum
M.O. : Matière organique
M.R.S.T.D. : Ministère de Recherches Scientifiques Techniques pour le développement
M.S. : Matière sèche
O.DE.M.O. : Opération de développement du Moyen-Ouest
O.D.R. : Opération de développement rural
O.N.U. : Organisation des Nations Unies
P.K. : Point kilométrique
R.D.M. : République Démocratique de Madagascar
R.N. : Route Nationale

S O M M A I R E

Pages

0 - <u>INTRODUCTION</u>	01
<u>1ère PARTIE</u>	
PRINCIPES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES DE LA PRODUCTION DU BIOMETHANE	03
10 - <u>GENERALITES</u>	04
11 - <u>CHIMIE, MICROBIOLOGIE ET BIOCHIMIE DE LA FERMENTATION METHANIQUE</u>	04
12 - <u>LES DIFFERENTES CHAINES DE FERMENTATION</u>	06
121 - Destruction des corps azotés	06
122 - Degradation du cellulose	06
123 - La conversion en méthane	07
13 - <u>LES PARAMETRES DE LA BIOMETHANISATION</u>	09
131 - Surpression	09
132 - Température	09
133 - pH	09
134 - Ensemencement	10
135 - Les matières premières	10
135.1 - Le carbone	12
135.2 - L'azote	12
135.3 - Le phosphore	12
135.4 - Le soufre	
136 - Les matériaux toxiques	12
137 - Choix des dimensions du digesteur	12
138 - La matière première	13
138.1 - Choix de la matière première	13
138.2 - Caractéristiques d'une matière digestible	13
14 - <u>LES DIFFERENTS SYSTEMES DE DIGESTEUR</u>	14
141 - Le digesteur discontinu du type ISMAN - DUCELLIER	15
141.1 - Installation type	15
141.2 - Variantes	15
142 - Le digesteur continu du type Indien	15
142.1 - Installation type	15
142.2 - Variante	16
143 - Le digesteur continu du type Chinois	16
143.1 - Installation type	16
143.2 - Variante	16

144 - Choix des types de digesteur en fonction de la matière première	16
144.1 - Digesteur en continu : moyen d'épuration	17
144.1.1 - Principe	18
144.1.2 - Caractéristique des matières premières à digérer	18
144.1.3 - Le renouvellement des bactéries	18
144.1.4 - Le taux de dilution	18
144.1.5 - Apport périodique	19
144.1.6 - La conduite de la digestion	19
144.1.7 - Agitation	19
144.2 - Digesteur en discontinu	19
144.2.1 - Principe	20
144.2.2 - Caractéristique du fumier.....	20
144.2.3 - La préfermentation aérobie	20
144.2.4 - La conduite de la digestion	20
145 - Avantages et inconvénients respectifs des systèmes "continu" et "discontinu"	21
15 - <u>INSTALLATIONS ANNEXES</u>	22
151 - Le stockage	22
151.1 - Les gazomètres souples	22
151.2 - Les gazomètres en durs	23
152 - Le circuit de distribution	23
16 - <u>L'EPURATION DU BIOMETHANE</u>	23
161 - La vapeur d'eau	24
162 - Le gaz carbonique	24
163 - L'hydrogène sulfuré	24
17 - <u>CARACTERISTIQUES DES GAZ FORMANT LA BIOMETHANE</u>	25
18 - <u>LES UTILISATIONS PRATIQUES DU BIOMETHANE</u>	25
181 - La combustion	26
181.1 - Reglage des brûleurs	26
181.2 - L'éclairage	27
19 - <u>UTILISATIONS DES EFFLUENTS DE LA DIGESTION</u>	27
191 - Les produits de la digestion comme engrais	27
192 - Les effluents de la digestion comme alimentation des systèmes intégrés	29
1.10 - Conclusions	29

2ème PARTIE

	LES REALISATIONS MALGACHES EN MATIERE DE BIOGAZ	30
21 -	<u>LES ACTIONS PASSES</u>	31
	210 - Généralités	31
	211 - Les recherches en laboratoire	31
	211.1 - Recherches en laboratoire	31
	211.2 - Les unités de démonstration et d'expérimentation	31
	211.3 - Les expérimentations à petite échelle chez des particuliers	31
	212 - Les unités de production de biogaz en milieu rural	32
	212.1 - Conception et gestion des digesteurs	32
	212.1.1 - Cas de l'Institution Militaire "5 PAGODES" à Iavoloha	32
	212.1.2 - Centre de Notre Dame de CLAIRVEAUX	36
	212.1.3 - Centre de Bevalala	38
	212.2 - Les coûts de chaque installation	41
	213 - Conclusion	42
22 -	<u>LES ACTIONS EN COURS</u>	42
	220 - Généralités	42
	221 - Le projet F.A.O. TCP/MAG/6652 (T)	43
	221.1 - Situation du projet	43
	221.2 - Localisation et type de digesteur pilote projet ..	44
	221.3 - Financement des installations pilotes	45
	221.3.1 - Apport du bénéficiaire	45
	221.3.2 - Contre-partie malgache	45
	221.3.3 - Contribution de la F.A.O.	45
	222 - Réalisation des digesteurs en milieu rural	45
	222.1 - Réalisation par le groupe des consultants MRSTD	45
	222.1.1 - Généralités	45
	222.1.2 - Description succincte des régions d'implantation ..	47
	222.1.3 - Conception et réalisation de ces digesteurs ..	51
	222.2 - Réalisation par le groupe des consultants fournis par l'E.S.S.Agronomiques	57
	222.2.1 - Généralités	57
	222.2.2 - Représentation succincte des sites	58
	222.2.3 - Conception et réalisation de ces unités ..	59
	222.2.4 - Conduite de la digestion	59
	222.3 - Coûts des installations réalisées par les deux groupes ..	60
	222.4 - Conclusions	60

3ème PARTIE

REALISATION ET ANALYSE SOCIO-ECO-ENERGETIQUE D'UN DIGESTEUR VULGARISABLE EN MILIEU RURAL		63
30 - <u>GENERALITES</u>		63
31 - <u>DESCRIPTION SUCCINCTE DU SECTEUR D'INSTALLATION</u>		64
311 - Le climat		64
312 - Les sols		64
313 - Les activités agricoles		64
314 - Les activités d'élevage		65
315 - Autres activités		66
32 - <u>REALISATION DE L'INSTALLATION</u>		66
321 - Conception du digesteur		66
322 - Les opérations effectuées		66
322.1 - Excavation		66
322.2 - Bétonnage du fond		66
322.3 - Les parois		66
322.4 - La voûte		67
322.5 - Les compartiments		67
322.6 - Les enduits		67
322.7 - Le couvercle		67
322.8 - Les opérations annexes		68
323 - Coût du digesteur		70
33 - <u>GESTION DU DIGESTEUR ET PRODUCTION</u>		70
331 - Matière première		70
332 - Production de biogaz		71
322.1 - Utilisation		71
322.2 - Débit		71
34 - <u>AVANTAGES TANGIBLES</u>		72
341 - Enquête socio-économique sans digesteur		72
342 - Enquête socio-économique avec digesteur		73
343 - Conclusion		74
35 - <u>LES AVANTAGES INTANGIBLES</u>		75
36 - <u>ANALYSE ECO-ENERGETIQUE</u>		75
361 - Données expérimentales		75
362 - Calcul du bénéfice énergétique		76
363 - Conclusion sur l'analyse éco-énergétique		77
37 - <u>CONCLUSION</u>		77

4ème PARTIE

CONCLUSION GENERALE	78
<u>ANNEXE - I</u> : Dosage des matériaux	80
<u>ANNEXE - II</u> : Comment dépanner un digesteur	
<u>ANNEXE - III</u> : Dossier de demande de prêt pour l'installation d'un digesteur	84
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	91

I N T R O D U C T I O N

La valorisation énergétique de la biomasse par la fermentation méthanique ou conversion par voie humide anaérobie, qui tolère les résidus à forte teneur en humidité (supérieure à 40 %) avec divers états et textures physiques, aboutit principalement à la production de biométhane ou biogaz.

Le rendement en gaz est satisfaisant, et on obtient en plus une matière organique résiduelle, fertilisante pour les sols.

Les enjeux sont très intéressants et il n'est guère de pays qui ne soient concernés. En plus du problème énergétique, il y a ceux de la préservation de l'environnement, de la lutte contre la pollution, du déboisement et de la désertification.

A Madagascar, un essai de vulgarisation de cette technologie a été récemment entrepris. Grâce à une coopération entre la F.A.O. et le Gouvernement Malgache, quelques installations ont été réalisées dans des couches socio-économiques différentes.

Avec les expériences acquises sur les diverses installations réalisées depuis, on en a déduit que la vulgarisation d'un type de digesteur fiable, facile à maîtriser tant pour la technique de construction que pour son fonctionnement, est à encourager auprès de la cible bien déterminée qu'est la couche paysannale moyenne (70 à 80 % de la population malgache). Le coût d'une telle installation étant relativement modéré donc accessible.

Son exploitation pourrait efficacement contribuer, non seulement à la transformation de leurs modes de vie, mais se fait aussi un moyen de corriger, sinon d'abolir certaines habitudes destructives de l'environnement.

De là vient en premier lieu, l'idée de la sensibilisation de la population en leur faisant comprendre l'utilité et les avantages qu'entraîne l'emploi du biogaz.

Une fois la sensibilisation accomplie, la vulgarisation doit être entreprise avec soin, car il ne faut pas oublier que la confiance des paysans ne saurait être totalement acquise qu'au vu d'une démonstration convaincante.

Ainsi, notre étude se propose de présenter :

- 1°) Le principe scientifique de la technologie du biogaz.
- 2°) La conception et la gestion des réalisations malgaches en matière de biogaz.
- 3°) La réalisation, gestion et analyses socio-économiques d'un type de digesteur vulgarisable au niveau d'un paysan moyen malgache.
- 4°) L'établissement d'un dossier type pour l'obtention d'un prêt bancaire en vue de l'acquisition d'un digesteur.

1ère PARTIE

PRINCIPES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES
DE LA PRODUCTION DU BIOMETHANE

Les bioconversions sont les techniques de transformation par des mécanismes biologiques, des matières organiques provenant des plantes et des divers déchets en énergie, suivant de multiples traitements.

Pour la production de biométhane, de nombreux paramètres devront être respectés pour maintenir à un niveau maximum l'activité des bactéries dans des digesteurs fonctionnant en continu ou en discontinu.

Cette technologie par le biogaz produit, se révèle comme une source d'énergie peu coûteuse et l'effluent de la digestion peut être utilisé pour la fertilisation du sol.

11 - CHIMIE, MICROBIOLOGIE ET BIOCHIMIE DE LA FERMENTATION MÉTHANIQUE

Les fermentations sont des processus métaboliques utilisés par les microorganismes anaérobies pour assurer la production biologique de composés chimiques et énergétiques (éthanol, butanol, acide acétique, acétone, méthane).

En fait, il existe un ensemble de fermentations anaérobies qui, à partir de la biomasse constituée de résidus et des cultures énergétiques, produisent une variété de produits finaux à valeur ajoutée importante.

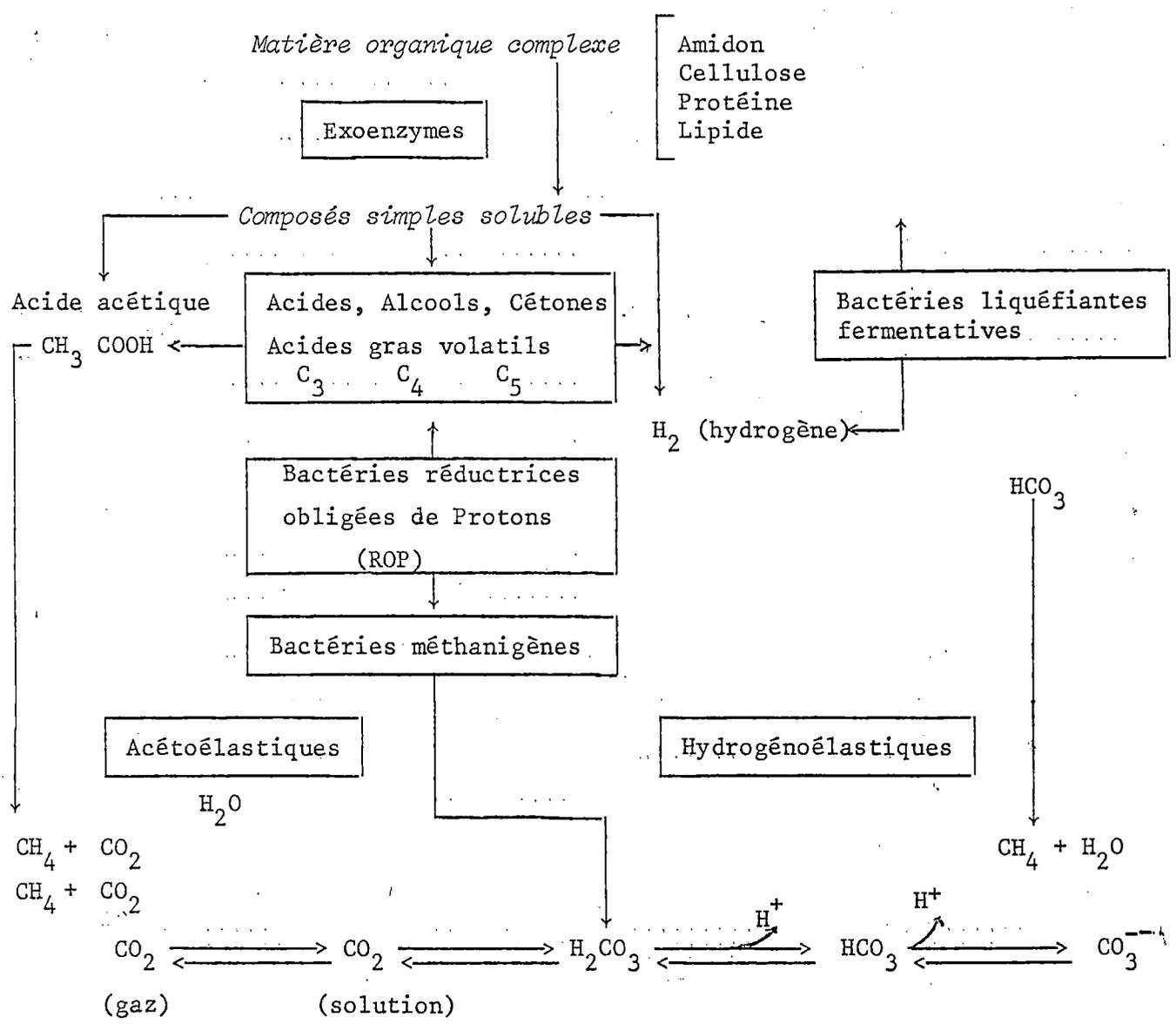
Pour l'obtention d'un produit précis, des espèces voire des souches sélectionnées de bactéries travaillent en conditions contrôlées et souvent stériles.

La méthanogénèse qui nous intéresse ici est un de ces processus microbiens qui implique différentes étapes, chacune d'elles étant gouvernée par une communauté bactérienne spécifique.

Le biométhane est composé à 50 - 80 % de méthane (CH_4) identique au gaz naturel et à 50 - 20 % d'anhydride carbonique (CO_2).

SCHEMA - 1

PROCESSUS DE LA BIOMETHANISATION



La matière organique complexe est d'abord décomposée en molécules simples, puis en produits plus réduits tels l'acétate, le biocarbonate, l'hydrogène moléculaire, les acides gras volatiles (2 à 5 carbones) l'éthanol...

L'acétate, l'hydrogène moléculaire, le bicarbonate sont ensuite utilisés par les bactéries méthanigènes proprement dites pour produire finalement ce gaz composé approximativement de 2/3 de CH₄ et 1/3 de CO₂.

La transformation de la matière organique en diverses substances chimiques se fait tout au long d'une chaîne de dégradations successives qui

s'effectuent pendant la fermentation anaérobie, grâce à de nombreuses espèces de bactéries, d'où la qualification de méthane biologique ou biométhane.

12 - LES DIFFÉRENTES CHAÎNES DE FERMENTATION

On distingue deux phases fondamentalement différentes dans le processus de fermentation méthanogène :

- la première phase consiste l'acidification en liquéfaction ou une gazéification avec transformation de molécules organiques gras, en sels ou même en gaz ;

- la deuxième étant la transformation, grâce à d'autres souches bactériennes de ces acides, sels ou gaz en méthane et autres gaz.

A chaque phase de fermentation ou chaque étape, interviennent des microorganismes spécifiques.

121 - DESTRUCTION DES CORPS AZOTES (urées et protides)

- En milieu plutôt aérobie : elle est l'oeuvre des microorganismes de la putréfaction (moisissures : *Penicillium*, *Aspergillus*, *Rhizopus* ; bactéries : *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Proteus*).

- En milieu strictement anaérobie : *Clostridium*.

Il se forme aussi de l'ammoniac (NH_3) du gaz carbonique (CO_2) et de l'hydrogène (H_2).

122 - DEGRADATION DE LA CELLULOSE

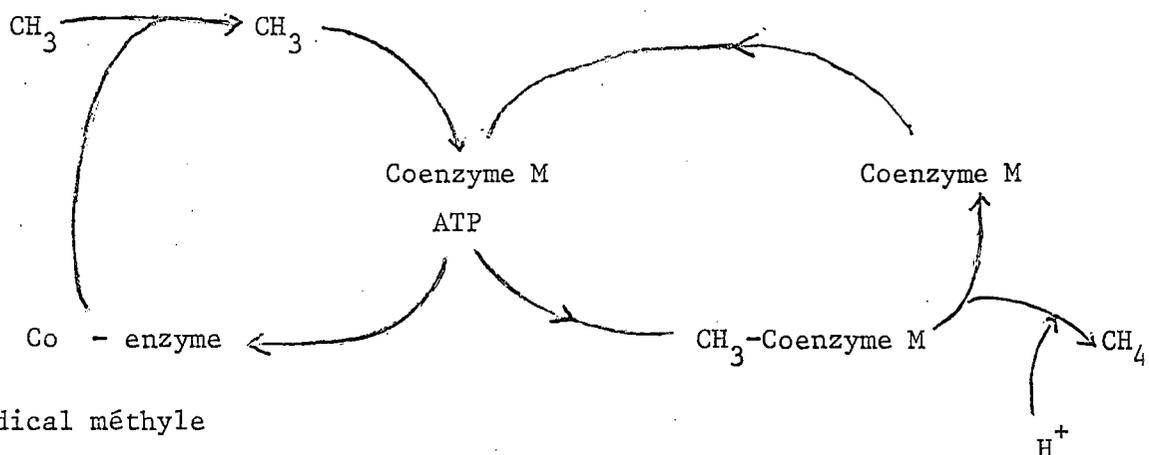
Les microbiologistes admettent que la cellulose est d'abord dégradée en cellobiose, puis en glucose. Interviennent ensuite de nombreux microorganismes parmi lesquels des bactéries (*Bacterium*, *Bacillus*, *Cellulomonas*, *Pseudomonas*...) des moisissures (*Aspergillus*, *Penicillium*, *Trichoderma*...) et des actinomycètes.

Le glucose est décomposé en nombre très varié de constituants, réactions plus ou moins complexes compte-tenu du fait que des populations bactériennes très diverses interviennent simultanément ou successivement. Les produits obtenus sont des alcools, des cétones et acides organiques.

123 - LA CONVERSION EN METHANE

Les acides organiques (ou les sels) peuvent-être convertis directement en méthane. Les bactéries méthanogènes, très répandues dans les sédiments naturels, champs d'épandage, le rumen du bétail, les eaux usées... n'utilisent spécifiquement que les acides organiques. Celles-ci sont regroupées sous les genres *Méthanobactérium* (cellule incurvée en forme de vibron avec un flagelle), *Méthanobacillus* (forme bacillaire pointu) et *Méthanosarcina* (sarcine).

Les bactéries méthanogènes possèdent des enzymes utilisant la vitamine B_{12} comme coenzyme. Par simple réduction, le radical méthyle se transforme en méthane, où il peut s'associer avec un coenzyme M selon la réaction



CH_3 : radical méthyle

Co : cobalamine ou vit. B_{12}

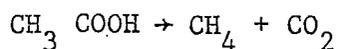
ATP : transporteur d'énergie

Coenzyme M : 2-mercaptoéthyle - sulfonate de formule $HS - CH_2SO_3^-$

On ne connaît pas encore l'importance d'une voie par rapport à l'autre ou si elles sont associées en réactions principales et secondaires.

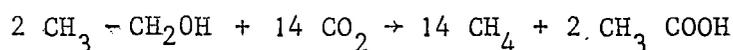
Les acides, alcools ou sels, peuvent être convertis en méthane suivant deux voies :

- par fermentation de l'acide (exemple de l'acide acétique)



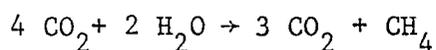
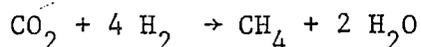
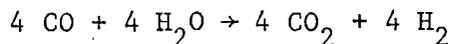
Acide acétique Méthane

- par réduction du gaz carbonique (exemple de l'éthanol)



éthanol

On ne connaît pas encore les mécanismes de la réduction du CO_2 en CH_4 . Néanmoins, des travaux américains récents* tendent à prouver que c'est l'oxyde de carbone (CO), issu principalement des groupes carboxydes ($-\text{COOH}$) d'acides gras décomposés, qui serait à la base du dioxyde de carbone (CO_2 , carbone totalement oxydé) et du méthane (CH_4 , carbone réduit). Ces réactions se résumeraient ainsi :



L'utilisation du CO_2 radioactif (C^{14}) dans une solution qu'on a introduit dans le digesteur expérimental a démontré que près de 98 % du carbone traceur ont été retrouvés dans le méthane et très peu dans la biomasse ou les acides organiques.

Ces types et ces espèces de microorganisme participant aux réactions de fermentation sont d'une part, sélectionnés par les conditions du milieu. Selon le principe de base de l'adaptation sélective, une espèce se développe et prédomine en réponse à une modification de l'habitat ou l'apparition de nouveaux types d'aliments carbonés.

D'autre part, les populations bactériennes sont très interdépendantes, les bactéries productrices d'acides éliminent l'oxygène, elles produisent la matière de base pour la production de méthane et l'action de leur enzyme sur les protéines et les acides aminés, libère des sels d'ammonium qui sont la seule source d'azote que les producteurs de méthane peuvent accepter. A leur tour, bien qu'elles ne soient pas capables de vivre sans les bactéries formatrices d'acides, les bactéries méthanogènes éliminent les acides qui leur sont toxiques et les convertissent en gaz. Si cette conversion n'avait pas lieu, même les bactéries productrices d'acides ne pourraient plus survivre. Le résultat est qu'à l'intérieur des digesteurs, une population équilibrée se construit, à partir d'une relation d'interdépendance (Symbiose) entre les 2 communautés bactériennes.

**Chemical engineering*, 28 Nov. au 02 Déc. 1976. CHICAGO, ILLINOIS, ERDA - Contrat n° (49-18) - 2203.

13 - LES PARAMÈTRES DE LA BIOMÉTHANISATION

En milieu aérobie, la décomposition des matières organiques constituant les déchets, conduit à la formation de gaz : hydrogène sulfuré (H_2S), hydrogène (H_2), ammoniac (NH_3), et à une production de chaleur importante : c'est le processus qui se déroule en préfèrmentation. La suite de la fermentation se passera en milieu strictement anaérobie.

131 - SURPRESSION

Une certaine pression du gaz est nécessaire pour alimenter les appareils d'utilisation.

132 - TEMPERATURE

Il faut distinguer deux phases optima :

- phase mésophile (20 à 45°) pour les digesteurs familiaux, car cette température est plus facile à maintenir constante ;
- phase thermophile (45 à 75°). L'activité des microorganismes étant plus intense à ces températures, mais les souches de bactéries thermophiles sont difficiles à sélectionner, les variations de températures sont beaucoup plus critiques. A plus de 51°C, la moindre variation de température peut stopper irréversiblement la fermentation.

Ainsi, il vaudrait mieux se contenter d'une température plus faible et de s'y maintenir que d'utiliser une haute température et ne pas pouvoir la maintenir constante durant la durée de la fermentation, car une variation de plus de 2°C par jour peut être fatale aux bactéries méthanogènes.

133 - pH

La digestion peut s'effectuer entre des pH de 6,6 et 7,6 avec un optimum entre 7 et 7,2.

En dessous de 6,2, l'acidité augmente très rapidement et la fermentation s'arrêtera à coup sur, puisque, en milieu acide, l'activité enzymatique des bactéries méthanogènes est bloquée et il y a butyrisation (avec odeur de beurre rance).

En milieu très alcalin, il y a production d'hydrogène sulfuré (H_2S) et d'hydrogène (H_2).

134 - ENSEMENCEMENT

La présence des bactéries méthanogènes dans les déjections animales peut faire démarrer un digesteur sans l'aide d'ensemencement mais on peut gagner du temps si on ensemence du substrat en pleine fermentation à raison de 15 à 20 % de la matière à fermenter.

Pour cela, on peut utiliser du vieux fumier, le jus d'une précédente fermentation ou tout simplement de la bouse de vache avec de l'eau dans un fût et qu'on laisse fermenter.

135 - LES MATIERES PREMIERES

Il n'y a pas de substrat spécifique de production du méthane. Théoriquement, les lipides, les glucides et les protéines peuvent servir comme matière première. Néanmoins, la cellulose est la matière qui produit le plus de gaz par unité de poids, mais c'est surtout le rapport C/N des matériaux (maximum:35 ; optimum:30) qui donne une production optimale de gaz.

A titre indicatif, nous donnons ci-dessous les rapports C/N de quelques substrats d'après MARAMBA*.

TABLEAU N°1 : COMPOSITION DE QUELQUES SUBSTRATS

Substrats	M.S. %	C %	N %	C/N
Animal				
• bouse de vache	77,0	55,8	1,8	19,9
• lisier de porc	80,7	38,3	2,8	13,7
• fientes de poulet	77,4	35,7	3,7	09,65
• fientes de canard	23,6	21,9	0,8	27,4
• excréments humains	90,0	47,7	7,1	06,72
Végétal				
• paille de riz	79,0	35,7	0,7	51,0
• coque d'arachide	95,5	52,7	1,7	31,0
• tige de maïs	92,0	43,9	1,2	56,6
• jacinthe d'eau	77,0	33,0	2,9	11,4

* MARAMBA (Félix D.) 1978 - Biogaz and waste Recycling, the Philippine Experience - Metro Manila, Philippines, Maya-Farm Division, Liberty Flour Mills, Inc., 230 p.

Ainsi, les substrats disponibles dans la nature ne présentent que rarement le rapport C/N adéquat, aussi, faut-il les mélanger pour que le rapport soit plus proche de sa valeur optimale.

TABLEAU N°2: PRODUCTIONS ESTIMEES DE METHANE POUR LA FERMENTATION ANAEROBIE DE DIFFERENTS DECHETS ANIMAUX *

	Vache laitière	Boeuf	Porc	Volaille
Production de lisier humide (kg/500 kg poids vif x jours)	47	23	25	33
Taux d'efficacité de la diges. (kg M.O. éliminée/kg M.O. ajoutée)	0,35	0,50	0,55	0,65
Production de biométhane (m ³ /500 kg poids vif x jours)	1,26	1,23	2,35	3,45
Production de méthane (60% du biométhane) (m ³ /500 kg poids vif x jours (m ³ /kg M.O.))	0,76 0,17	0,73 0,25	0,80 0,27	2,07 0,32

D'après G. DUCCELLIER, après une préfermentation aérobie, les productions de biométhane par kg de M.S. de divers déchets végétaux ci-après seraient :

TABLEAU N°3

Substrats	Production de biométhane par kg de M.S.
. Paille de riz	360 l
. Tige de maïs	295 l
. paille de blé	300 - 318 l
. Paille d'avoine	368 l
. Graines de coton	357 l
. Sisal	358 l
. Fanes d'arachides	298 l
. Farines de feuilles	222 l
. Farine de cartons	385 l
. Fumiers	330 l
. Algues	320 l

*BIOM "Production et utilisation du biogaz en Afrique", 2è Sess. de formation post-universitaire technologique, BUJUMBURA, Burundi, 10-25 Juil. 1985, n°4 et 5, Juil. 1986 - AUPELF, DAKAR.

135.1 - Le carbone

Les microorganismes utilisent exclusivement la cellulose par leur enzyme, et la transforment en cellobiose et en glucose soluble.

135.2 - L'azote

Tous les organismes vivants ont besoin d'azote pour former des protéines. S'il n'y a pas assez d'azote, les bactéries ne pourront pas utiliser tout le carbone présent et le processus sera peu efficace d'où la nécessité d'un rapport C/N adéquat.

135.3 - Le phosphore

Le manque de phosphore inhibera la fermentation. Les besoins en cet élément sont dans la proportion d'un cinquième des besoins en azote. L'optimum sera un rapport C/P = 150.

135.4 - Le soufre

Le besoin est moindre, mais s'il y a excès, les bactéries sulfato-réductrices se développent et transforment le soufre en hydrogène sulfuré. Cette communauté est prédominante sur les méthanogènes pour diverses raisons d'ordre métabolique.

136 - LES MATERIAUX TOXIQUES

Seules les matières dissoutes sont toxiques. Ce sont les :

- ions minéraux : bénéfiques à des petites concentrations, inhibiteurs à forte concentration :

Exemple : le sodium Na^+ stimulant à 100 - 200 mg/l, inhibiteur à 8000 mg/l.

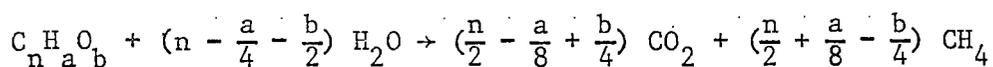
- ions métaux lourds (< 1 mg/l) ;

- détergents et autres produits chimiques tels que les organochlorés, les antibiotiques...

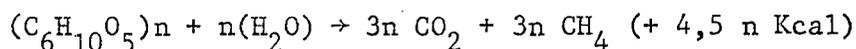
137 - CHOIX DES DIMENSIONS DU DIGESTEUR

La quantité de méthane produit, peut être calculée à partir de la formule* suivante :

*Formule déterminée par BUSWELLE et MULLER en 1954, qui permet de calculer la quantité de méthane produit à partir de la composition chimique du déchet contenant du C, H, O.



Exemple : Cellulose $(C_6H_{10}O_5)_n$



La décomposition de $\frac{1}{n}$ mole de cellulose (soit 162 g) fournit 3 moles de CH_4 (soit 67,2 l). Ce $\frac{1}{n}$ mole de cellulose fournit donc 135 litres de gaz (50 % de CO_2 et 50 % de CH_4) Un kilo de cellulose complètement décomposé donnera donc théoriquement 830 litres de gaz dont 415 litres de méthane.

Pratiquement, la taille du digesteur est déterminée par deux éléments fondamentaux, d'une part, la qualité de matières premières disponibles, et d'autre part, la quantité de gaz dont on a besoin. On estime que dans les conditions normales, une famille, pour la cuisson des aliments et l'éclairage, a besoin de 0,5 à 1 mètre cube de biométhane par jour et par personne.

138 - LA MATIERE PREMIERE

138.1 - Choix de matière première

Le substrat est déterminé par les conditions suivantes :

- apport éléments nutritifs : rapport C/N
- caractéristique physique : facilement fermentescible
- absence d'éléments toxiques.

138.2 - Caractéristiques d'une matière digestible

a.) Degré d'humidité : le pourcentage d'eau dans la matière organique est déterminé en établissant la différence entre le matériau frais et la même quantité chauffée à 100°C jusqu'à poids constant.

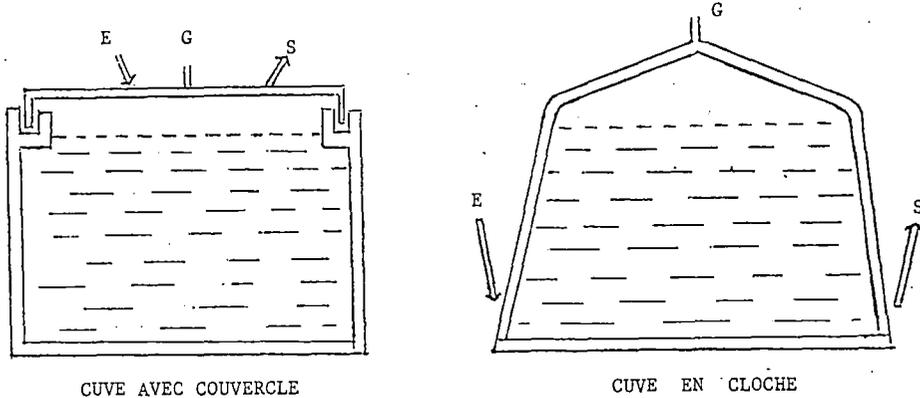
b.) Taux de matière organique : c'est le pourcentage des matières qui sont susceptibles d'être décomposées. On établira ce taux par incinération d'une certaine quantité de matière sèche au four à 550° pendant plusieurs heures.

c.) Solide inorganique : résidu qui reste après le passage au four et qui constitue les débris minéraux.

14 - LES DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE DIGESTEUR

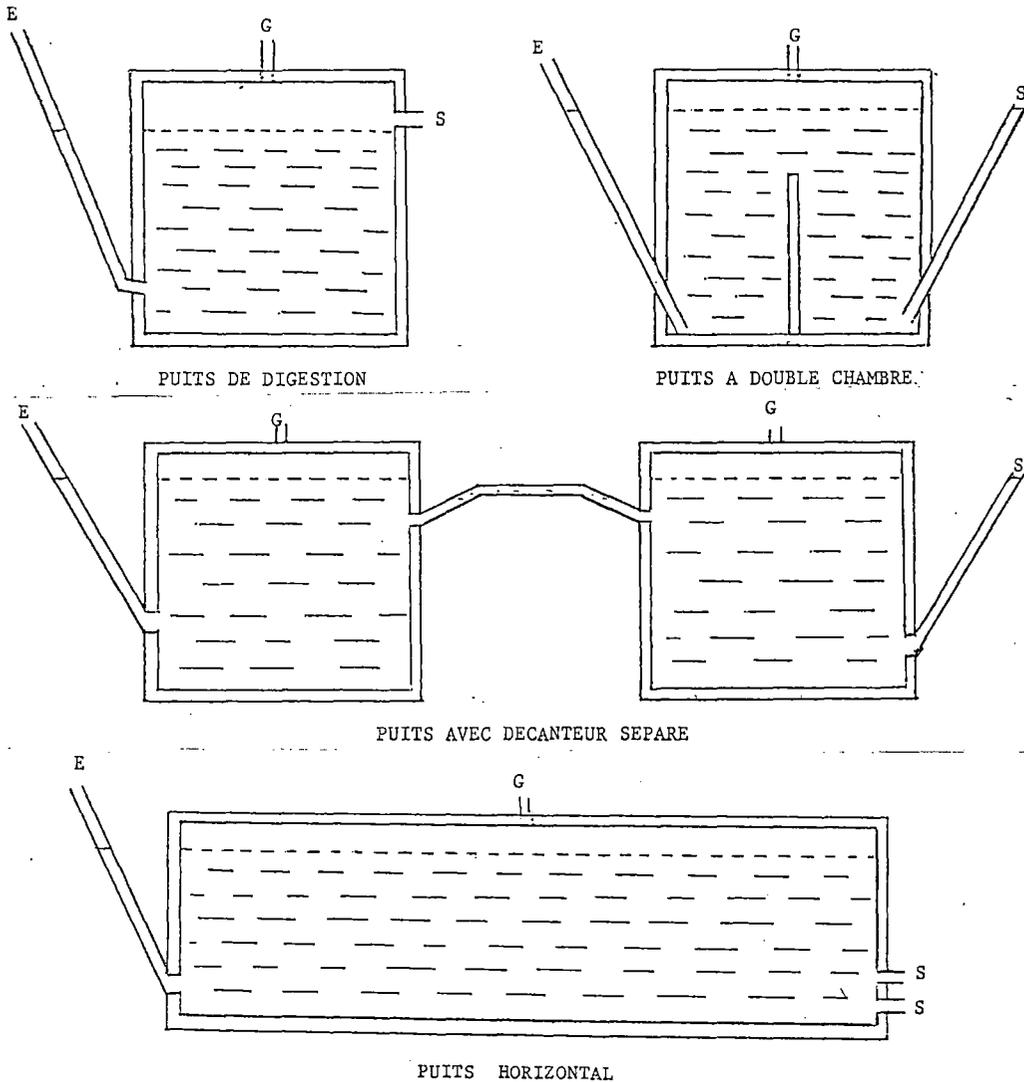
Schématiquement, nous pouvons figurer les principaux types de digesteurs comme suit :

TYPE DISCONTINU (SCHEMA N°2)



G : Sortie du gaz
 E : Entrée du substrat
 S : Sortie du substrat

TYPE CONTINU (SCHEMA N°3)



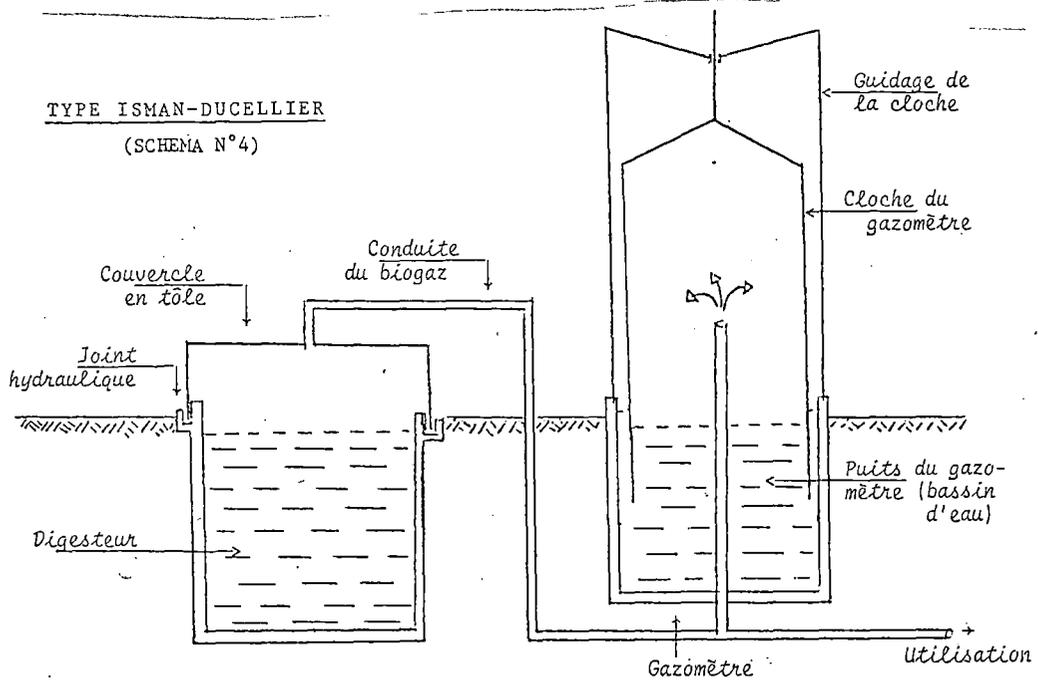
G : Sortie du gaz ; E ; Entrée du substrat ; S ; Sortie du substrat.

Trois types de digesteurs sont couramment utilisés. Ce sont

- le digesteur discontinu d'origine française de type ISMAN - DUCCELLIER
- le digesteur continu de type Chinois
- le digesteur continu de type Indien.

141 - LE DIGESTEUR DISCONTINU DE TYPE ISMAN-DUCCELLIER

141.1 - Installation type



141.2 - Variantes

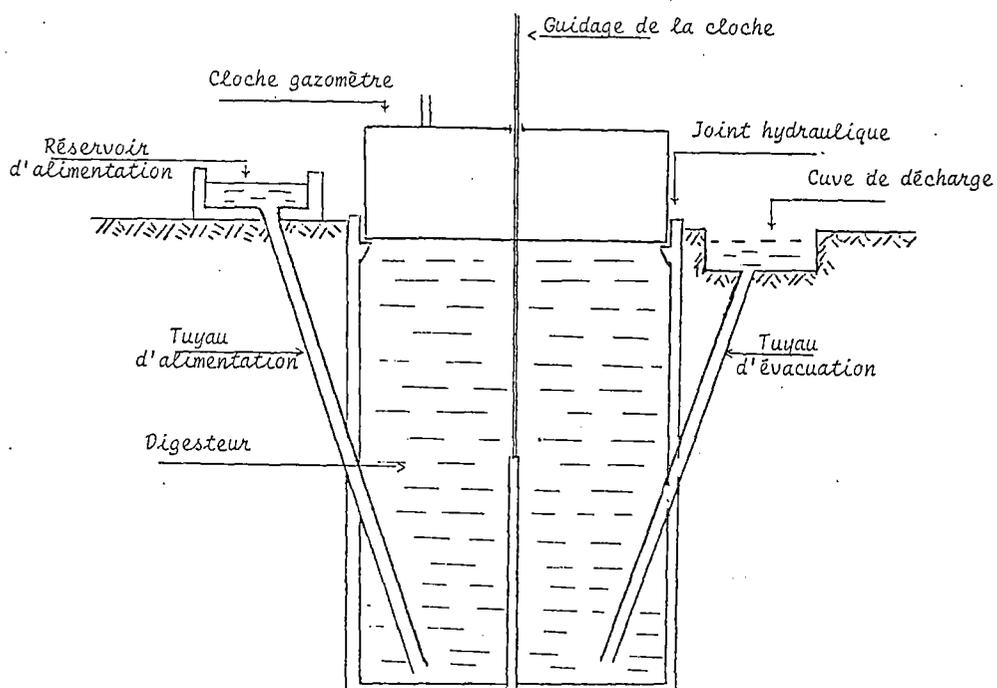
Forme du digesteur : parallélépipédique, cylindrique.

Gazomètre : métallique ou en bache souple; incorporé ou séparé au digesteur.

142 - LE DIGESTEUR CONTINU DE TYPE INDIEN

142.1 - Installation type

TYPE INDIEN (SCHEMA N°5)



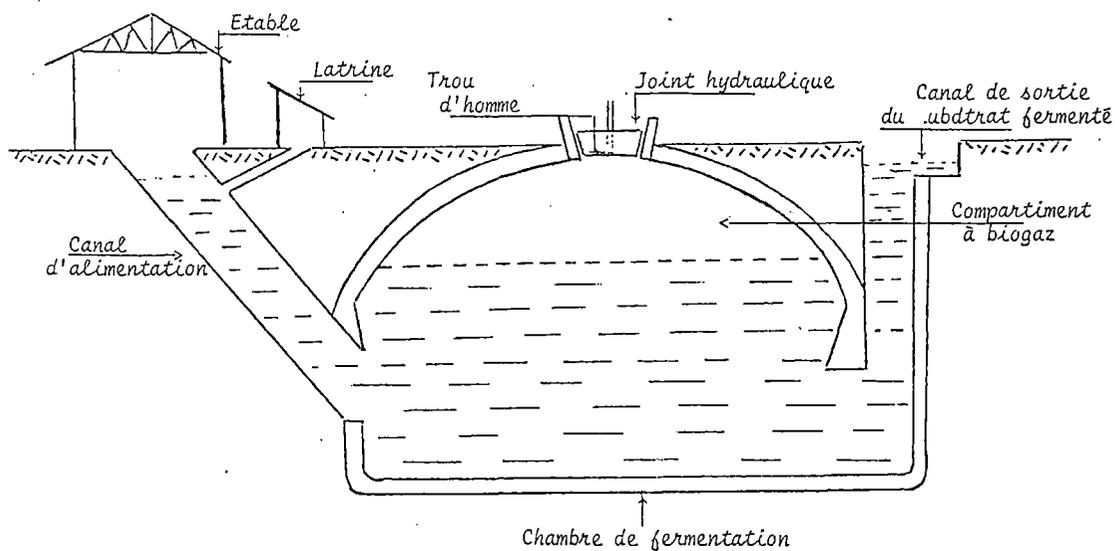
142.2 - Variantes

Forme de digesteur : cylindrique, compartimentée ou non, digesteur avec cuve de décantation séparée.

Gazomètre : incorporé.

143 - DIGESTEUR CONTINU DE TYPE *CHINOIS*143.1 - Installation type

TYPE CHINOIS (SCHEMA N°6)

143.2 - Variante

Forme de cuve : parallélépipédique, sphérique, hémisphérique.

Notons que les digesteurs continus n'acceptent des matières solides que sous forme très fragmentées.

144 - CHOIX DES TYPES DE DIGESTEUR EN FONCTION DE LA MATIERE PREMIERE

On peut le résumer dans le tableau suivant :

TABELAU N°4 : TYPE DE DIGESTEUR EN FONCTION DES MATIERES

Matières premières	Type de digesteur	Temps de rétention	Remarques
- Déchets liquides industriels très dilués	Digesteur filtre continu	12 h à 5 j	très sophistiqué
- Déchets réguliers industriels	Digesteur continu à recyclage de la biomasse	"-	"-
- Déchets domestiques triés et broyés	Digesteur thermophile (55 - 60°) à recyclage	5 j	"-
- Boues d'égoût fortement polluées, lisier peu dilué	Digesteur simple Digesteur horizontal Puits de digestion	30 - 60 j	rustique problème avec les dépôts et l'écume ou la croûte
- Boues d'égoût lisier dilué	Digesteur à double chambre ou avec décanteur séparé	1 ^è : 10 - 30 j 2 ^è : 20 - 60 j	agitation de la 1 ^{ère} chambre ou la 1 ^{ère} cuve
- Déchets agricoles ou industriels produits régulièrement	Digesteur à haut rendement	5 - 20 j	alimentation continue, peut-être automatisé
- Fumiers hachés et liquides	Digesteur à entrée et sortie de la matière spéciale	60 j	plus grande production de gaz qu'avec le lisier seul
- Fumiers pailleux ou paille brute	Digesteur discontinu à couvercle ou en cloche	"-	plusieurs cuves sont nécessaires
- Importante quantité de fumier	Digesteur semi-continu	"-	plus coûteux que le précédent, mais plus pratique
- Excréments humains	Décanteur digesteur continu	90 j	problème d'hygiène

144.1 - Digesteur en continu

Bien que producteur de méthane, le digesteur continu est souvent apprécié par ses qualités d'épuration.

141.1.1 - Principe

La caractéristique principale du système continu est sa ressemblance avec un système digestif. Tout comme lui, il cultive des bactéries, a besoin d'une certaine température pour être efficace et reçoit régulièrement une alimentation.

141.1.2 - Caractéristiques des matières à digérer

Au point de vue consistance, il faut pouvoir disposer de matières où se trouveront le minimum de fibres végétales et de résidus minéraux : bouses de vaches, fientes de basse-cour...

Le taux de dilution du substrat est important à déterminer, car il influera sur le temps de rétention de la matière organique. En pratique, le taux de matière fraîche préconisé est de 15 % ; il faut donc diluer la plupart des excréments dans leurs poids d'eau pour avoir une consistance "crémeuse".

141.1.3 - Temps de rétention

Le temps de rétention de la matière à digérer dans le digesteur se détermine en calculant les quantités d'apports périodiques jusqu'au remplacement complet du volume de la matière dans le digesteur.

Exemple : L'apport périodique est hebdomadaire et chaque apport occupe 1/5ème du volume total ; toute la matière aura été renouvelée au bout de 5 semaines. Un certain nombre de facteurs influencent ce temps de rétention et dont l'optimum devra être déterminé par l'expérience.

141.1.4 - Le renouvellement des bactéries

Pour chaque température, il existe un temps minimum pour que autant de bactéries évacuées avec l'effluent se forment

141.1.5 - Le taux de dilution

Ce facteur intervient également dans la rapidité de la digestion. Il existe une densité optimale où les bactéries interviennent le plus efficacement au-dessous, il n'y a pas assez de solides pour fixer les colonies bactériennes, et au-dessus de cette dilution optimale, une consistance plus épaisse ralentit la digestion.

Notons que la production de gaz n'augmente pas du fait l'augmentation de la quantité d'eau ajoutée mais par une meilleure digestion de la matière organique.

144.1.6 - Apport périodique

On a toujours intérêt à alimenter régulièrement le digesteur, et un apport quotidien est à préconiser.

Si on veut rejeter des matériaux non polluants dans l'environnement, la digestion devra être beaucoup plus longue et même suivie d'un traitement de l'effluent. Mais si on veut les récupérer en engrais, la digestion ne devra pas être trop longue pour ne pas détruire toute la matière organique

144.1.7 - La conduite de la digestion

On peut remplir le digesteur complètement, la première fois avec 50 % de pied de cuve.

Dans ce cas, la durée de stabilisation de la digestion jusqu'à une production régulière d'un gaz combustible pourra être longue.

144.1.8 - Agitation au cours de la digestion

Pour obtenir une bonne homogénéité de la matière première avant de l'introduire dans le digesteur, on devra bien malaxer l'eau et les déchets.

L'agitation sert à éparpiller les bactéries qui s'agglutinent autour des particules de matières organiques. La concentration des particules organiques, accentuant le phénomène des poches acides, doit être combattu pour stimuler toutes les espèces de bactéries et éviter l'acidification complète du milieu.

L'agitation pour être efficace ne devra pas être continue, mais se faire à intervalles réguliers et pendant un certain temps.

144.2 - Digestion en discontinu

Le système en discontinu ou "par fournées" a été mis au point spécialement pour la fabrication des gaz. La transformation des matières organiques ne vient qu'au second plan.

144.2.1 - Principe

A l'inverse du système continu, la production dans ce système ne peut être régulière.

144.2.2 - Caractéristique du fumier

Il n'y a pas de problème de consistance des matières, car plus elles sont fibreuses, plus elles seront faciles à manipuler à la fourche. Toutes les matières végétales conviendront comme substrat.

144.2.3 - La préfermentation aérobie

Cette première phase de fermentation (en fait une dégradation aérobie), se fait à l'air libre et libère beaucoup de chaleur qui élève la température de la masse de fumier à 50 - 60°C. Elle présente un certain nombre d'avantages pour l'utilisation ultérieure du fumier. Elle dégrade les molécules peu polymérisées (sucres, amidon...) qui seraient susceptibles d'acidifier trop rapidement le milieu ; elle produit une partie des substances qui serviront à la fermentation anaérobie, elle détruit les microbes pathogènes et les semences des graines (mauvaises herbes). La durée ne doit pas être trop longue (épuisement prématuré du stock de matières organiques fermentescibles) ni trop courte (excès d'acides organiques).

La préfermentation peut être accélérée en apportant de l'urée.

144.2.4 - La conduite de la digestion

a) *La préparation de la fermentation* : le remplissage est fait avec du fumier noyé dans du purin et de l'eau.

b) *La production* : pour avoir une production régulière, il faut disposer de plusieurs cuves qu'on fait fonctionner successivement.

c) *Maintien de la température* : la température à l'intérieur du digesteur influe sur la production comme il a été souligné précédemment.

145 - AVANTAGES ET INCONVENIENTS RESPECTIFS DES SYSTEMES "CONTINU"
ET "DISCONTINU"

TABLEAU N°5

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<p style="text-align: center;">continu / discontinu</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnement en continu avec une seule cuve. - Production stable, régulière et continue de gaz. - Bien adapté au traitement des effluents d'élevage (déjections animales...). - Peu de manipulation, et n'exigeant ni beaucoup de main-d'oeuvre, ni de matériels mécanisés ou motorisés. - Expérience déjà importante en Inde et en Chine. - Investissement moins élevé qu'en système discontinu pour avoir une production régulière car une seule cuve suffit. 	<p style="text-align: center;">discontinu / continu</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nécessité d'avoir plusieurs cuves si l'on souhaite avoir une production régulière (augmentation des coûts). - Importance des manipulations exigeant beaucoup de main-d'oeuvre (chargement et déchargement). - Expérience encore limitée notamment pour le fonctionnement en l'absence de fumier. - Investissement élevé car nécessite plusieurs cuves pour une production continue. - Laisse échapper du gaz entre parois du digesteur et la cloche.
<p style="text-align: center;">discontinu / continu</p> <ul style="list-style-type: none"> - Accepte toutes les matières cellulosiques quelles que soient leurs textures (fumier, pailles, ordures ménagères..) en mélange avec des déjections animales. - Peut fonctionner avec du fumier contenant 75 % de matières végétales et 25 % de déjections animales. - Rusticité facilitant sa diffusion. - Relative simplicité de fonctionnement ne nécessitant pratiquement pas de surveillance : risque d'acidification à ne pas craindre, matières premières plus ou moins solides, plus facilement disponibles. 	<p style="text-align: center;">continu / discontinu</p> <ul style="list-style-type: none"> - N'accepte pas les pailles et les déchets végétaux courants. - Fonctionnement plus délicat nécessitant une surveillance : <ul style="list-style-type: none"> . bouchage des tuyaux d'alimentation et d'évacuation ; . acidification ; . apparition des mousses ; . formation des sédiments dans le fond du digesteur ; . formation des croûtes. <p style="text-align: right;">.../...</p>

.../...

discontinu / continu

- Faible consommation en eau
- Déchargement et chargement une seule fois pendant la durée de la digestion
- Elimination des germes pathogènes et semences des mauvaises herbes en pré-fermentation.
- Fermentation complète des matières premières.

continu / discontinu

- Consommation élevée en eau, difficulté pour le choix d'installation.
- Alimentation régulière.
- Faible rendement.
- Possibilité de fuite de gaz difficile à localiser.

15 - LES INSTALLATIONS ANNEXES

Ce sont principalement les matériaux de stockage du biométhane et éventuellement, celle d'épuration.

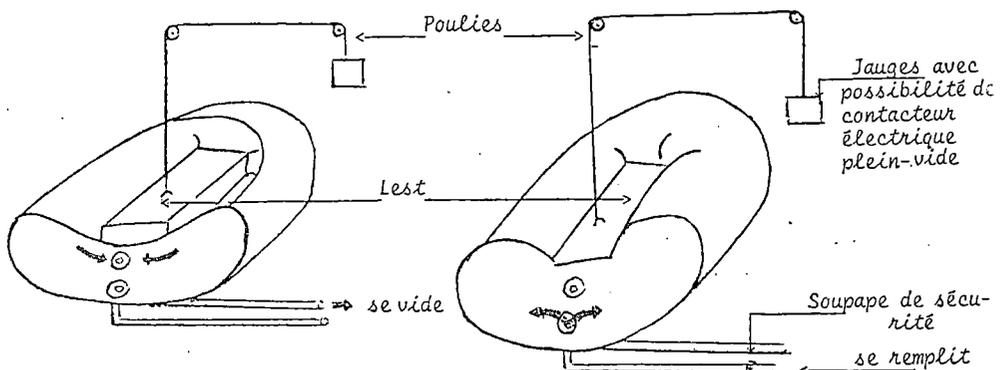
151 - LE STOCKAGE

Pour une consommation continue et régulière de gaz, il faut disposer d'une réserve fournissant le gaz aux "pointes" de consommation et en le stockant le reste du temps. C'est le rôle des gazomètres qui se rangent en 2 catégories. Ils peuvent être séparés ou couplés au digesteur (cas de digesteur type Indien et non du type Chinois).

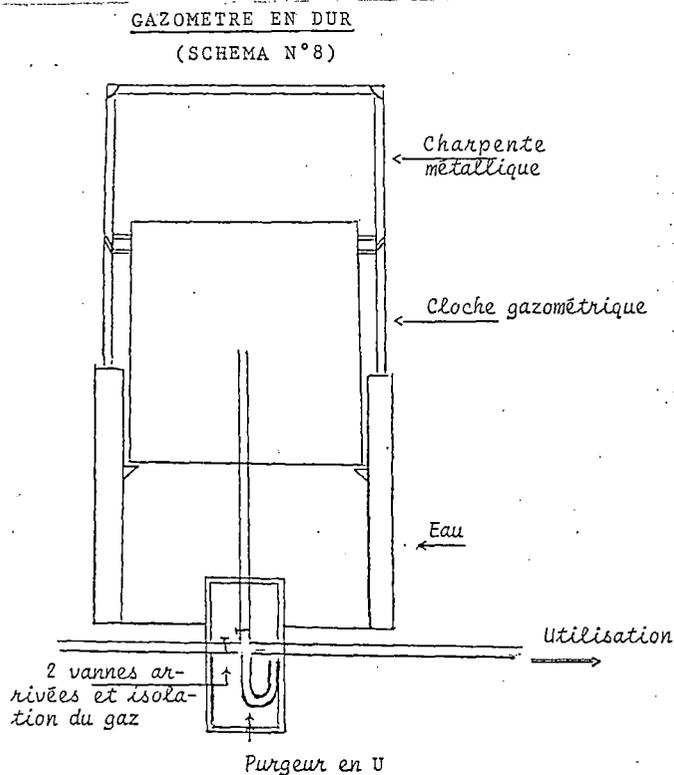
151.1 - Les gazomètres souples

C'est le système le plus simple de stockage. Le gaz gonfle ou dégonfle une outre à la manière d'une baudruche. Ils sont faits en bâche plastique gonflable, chambre à air.

C.T. D'UNE BACHE SOUPLE
(SCHEMA N°7)



151.2 - Les gazomètres en durs



Ce sont les gazomètres les plus couramment utilisés et ont un volume d'eau qui forme un joint d'étanchéité. C'est le poids de la cloche qui déterminera la pression du gaz. Toutefois, au fur et à mesure que la cloche plonge dans l'eau, elle sera allégée (principe d'Archimède). Pour remédier à cela, un système de contre-poids résoudra le problème.

152 - LE CIRCUIT DE DISTRIBUTION

En général, l'installation du digesteur n'étant pas à proximité du point d'utilisation, d'où la nécessité d'une tuyauterie d'amenée avec un stockage intermédiaire si possible.

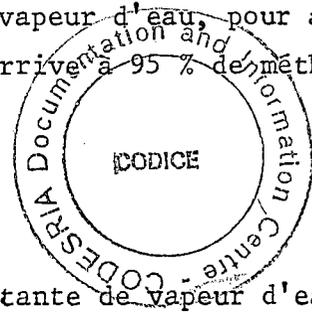
En partant du digesteur, un raccord branche le digesteur à la ligne principale sur laquelle on intercale le gazomètre. La distance entre le gazomètre et le point d'utilisation ne devrait pas dépasser 30 mètres, car la pression ne serait pas suffisante pour alimenter correctement les brûleurs. Si on veut dépasser cette distance, il faudrait un petit gazomètre intermédiaire tous les 35 mètres, capable de stocker assez de gaz pour assurer une demande soudaine. Le gaz serait transféré d'un gazomètre à l'autre par l'intermédiaire du contre-poids croissants et de valves empêchant le retour vers le digesteur.

Pour une distance vraiment importante, il faudrait utiliser une pompe à gaz.

16 - L'ÉPURATION DU BIOMÉTHANE

Le biométhane contient des gaz dont les propriétés anticombustibles ou oxydantes pouvaient être gênantes. L'épuration peut se faire sans trop de

difficulté, notamment pour le CO_2 , H_2S , NH_3 , la vapeur d'eau, pour améliorer la qualité du combustible. Un biométhane épuré arrivant à 95 % de méthane et devient tout à fait comparable au gaz naturel.



161 - LA VAPEUR D'EAU

Le gaz, contenant une proportion importante de vapeur d'eau à la fermentation, ira condenser cette humidité dans les parties plus froides que le digesteur (35°C), c'est-à-dire, en premier lieu, dans la tuyauterie de collecte. On s'en protégera par une tuyauterie en pente (1 pour 75 à 1 pour 150) qui sera équipée au point le plus bas d'un purgeur en U ou en T plongeant dans un tube rempli d'eau. La hauteur du tube en U sera prévue pour que la pression maxima calculée en centimètre d'eau ne puisse chasser toute l'eau, et que le siphon assure son rôle dans tous les cas. Ce système très simple évite toute manipulation, l'eau étant évacuée au fur et à mesure.

162 - LE GAZ CARBONIQUE (CO_2)

Le gaz carbonique n'empêche pas la combustion du méthane mais il peut être intéressant de diminuer le volume de stockage du gaz. Le plus simple est de procéder à un lavage du gaz à l'eau, car le CO_2 est très soluble ($878 \text{ cm}^3/1$ à 20°) alors que le méthane l'est très peu. Si on ne dispose pas assez d'eau, on relave l'eau par une insufflation d'air et le CO_2 part avec l'air qui s'échappe.

Une autre système assez simple consiste à faire passer le gaz dans de l'eau de chaux ou lait de chaux, fournie par la chaux vive.

163 - L'HYDROGENE SULFURE (H_2S)

Sa présence est nuisible d'où il faut l'éviter au maximum et en maintenant le pH de la fourchette 6,6 - 7,6.

Pour l'éliminer, on fait passer le biométhane à travers du charbon de bois qui sert de matériau filtrant ou encore sur de l'oxyde de fer ou à défaut sur de la limaille (paille de fer, tampon "jex").

17 - CARACTÉRISTIQUES DES GAZ FORMANT LE BIOMÉTHANE

Le biométhane est formé par un certain nombre de gaz. Mais les proportions de ces gaz varient beaucoup d'un digesteur à l'autre. De même, que tel ou tel matériau tendait à produire de l'hydrogène sulfuré ou de l'ammoniac.

La composition moyenne du biométhane au cours d'une fermentation bien maîtrisée peut être donnée par le tableau suivant :

TABLEAU N°6 : COMPOSITION DU BIOMETHANE

G a z	Symbole	%
- Méthane	CH ₄	50 - 70
- Gaz carbonique	CO ₂	35 - 45
- Hydrogène	H ₂	1 - 3
- Oxygène	O ₂	0,1 - 1
- Oxyde de carbone	CO	0 - 0,1
- Azote	N ₂	0,5 - 3
- Gaz divers	H ₂ S, NH ₃ , ...	1 - 5
- Vapeur d'eau	H ₂ O	variable

Le biométhane est moins calorigène que le méthane, son pouvoir calorifique supérieur (P.C.S.) étant de 4500 à 6500 Kcal suivant la proportion de gaz carbonique.

18 - LES UTILISATIONS PRATIQUES DU BIOMÉTHANE

Le biométhane doit être convenablement utilisé après avoir été produit dans le digesteur. L'utilisation du biométhane est appliquée surtout à des fins énergétiques. Aussi quelle que soit l'application envisagée, il faut utiliser des appareils à haut rendement énergétique, ce qui suppose une adaptation des appareils au biométhane.

181 - LA COMBUSTION

Comme nous l'avons écrit un peu plus haut, le biométhane est mélangé avec du CO_2 non combustible donc il est moins calorigène que le CH_4 pur.

TABLEAU N°7 : FACTEUR DE CONVERSION DE DIFFERENTS COMBUSTIBLES

Combustible	P.C.I.*	Biométhane	Biométhane épuré	Propane	Fuel	Essence	Charbon	Electricité	Rendements	
									Chauffage %	Moteur %
Biométhane à 60% CH_4	5130 Kcal/ m^3	1,00	0,68	0,53	0,60	0,70	0,78	5,9	50	-
Biométhane épuré	7600 Kcal/ m^3	1,48	1,00	0,69	0,88	1,05	1,15	8,8	82	28
Propane	22000 Kcal/ m^3 11000 Kcal/ m^3	2,15	1,54	1,00	1,28	1,55	1,70	12,8	82	28
Fuel, mazout, gaz-oil, gazole	8585 Kcal/l	1,67	1,13	0,78	1,00	1,18	10,30	10,0	82	31
Essence	7280 Kcal/l	1,42	0,96	0,66	0,85	1,00	1,10	8,5	82	25
Charbon	6600 Kcal/ kg	1,30	0,86	0,60	0,77	0,90	1,00	7,70	60	-
Electricité	860 Kcal/ Kwh	0,17	0,13	0,07	1,00	0,12	0,13	1,00	95	25

* Pouvoir Calorifique Inférieur.

La vitesse de front de flamme du méthane étant déjà lente et le gaz carbonique retardant cette combustion, un certain nombre de dispositifs seront nécessaires pour en maîtriser la combustion. L'allumage, par exemple se fait très difficilement avec les allume-gaz à étincelle. Le mélange optimum théorique de biométhane et d'air sera un mélange respectivement de 14 à 86 %. Mais la proportion élevée de gaz carbonique fait qu'il faut pratiquement doubler l'apport d'air pour combattre son action anticomburante et arriver ainsi à un mélange de 7 et 93 %.

Rapport volumétrique $\frac{\text{Air comburant}}{\text{Gaz carburant}}$ théorique :

- Biométhane (60% CH_4) 07 (10 - 13 en pratique)
- Méthane (CH_4) 10
- Propane (C_3H_8) 30
- Butane (C_4H_{10}) 32,5

181.1 - Reglage des brûleurs

Il est très important de noter que la vitesse d'inflammation du biométhane est de moins de 130 centimètres/seconde, de sorte que si on

laissait les brûleurs tels quels, les flammes seraient soufflées avant d'avoir pu enflammer le gaz.

Pour remédier à cela, la solution consiste à réduire ou même à supprimer l'arrivée d'air primaire, agrandir les orifices de sortie, ou encore, abaisser au maximum la pression d'arrivée de gaz. Ces opérations visent à ralentir la sortie du gaz et à coller les flammes au brûleur.

181.2 - L'éclairage

Après la cuisson, l'éclairage vient en second lieu dans l'application du biométhane. Comme dans l'utilisation des brûleurs, l'utilisation des lampes comporte la détermination de la pression d'alimentation ainsi que la gazométrie des orifices. Les lampes à gaz se divisent en trois catégories :

- à simple courant d'air
- à double courant d'air
- à manchon.

182 - AUTRES UTILISATIONS

Ce sont ces deux applications qui intéressent les gens au plus haut point, mais d'autres besoins peuvent être prioritaires selon l'activité du paysan. D'autres utilisations sont possibles. A titre indicatif, voici quelques consommations d'appareils divers pouvant donner une idée de leur importance :

- Eclairage	70 dm ³ par manchon/heure
- Cuisinière	225 à 450dm ³ par brûleur de 5 - 10 cm de ϕ /heure
- Réfrigérateur	8 dm ³ par dm ² de parois/jour
- Couveuse	1 m ³ par 300 oeufs/jour
- Moteur à essence	1,35 à 1,90 m ³ de cylindrée/heure
- Moteur diésel	1,5 à 2 m ³ par dm ³ de cylindrée/heure

19 - UTILISATIONS DES EFFLUENTS DE LA DIGESTION

191 - LES PRODUITS DE LA DIGESTION

Le rapport C/N dépend beaucoup du temps de digestion de la matière organique, donc du temps de rétention. Les pertes en éléments minéraux

sont minima car le gaz ne contient que du carbone, d'hydrogène et d'oxygène. Le tableau suivant donne la valeur fertilisante de quelques boues**.

TABLEAU N° 8 : VALEUR FERTILISANTE DE QUELQUES BOUES

	Humidité %	M.O.***	N***	P ₂ O ₅ ***	K ₂ O ***
Digesteur de fumier	89,44	(C/N=9,6) 65,4	3,42 (dont 38% de NH ₄)	1,24	2,57
Digesteur 50 % bouse de vache, 50 % autres					
- digestion primaire	82,20	62,5	1,38	1,01	0,63
- digestion secondaire	78,60	60,8	1,26	1,00	0,61
Digesteur de bouse	78,00	60,0	1,52	0,98	0,54

Tableau comparatif de la valeur fertilisante d'un fumier laissé à l'air libre et d'un autre de la même origine, mais a subi une fermentation anaérobie**.

TABLEAU N° 9 : COMPARAISON DE VALEUR FERTILISANTE

	Fumier décuvé	Fumier après 4 mois de maturation
- En % de matière brute		
. humidité	86,80	81,80
. matière sèche	13,20	18,20
. cendre	04,63	03,80
. organique	08,57	14,40
- En % de matière sèche		
. cendre	35,00	21,00
. organique	65,00	79,00
. carbone	40,40	38,80
. azote total	1,95	1,28
. humus total	8,75	4,93
. humus précipitable	3,75	2,65
. matières minérales dont		
. CaO	6,77	2,80
. MgO	2,62	0,72
. K ₂ O	1,51	2,67
. P ₂ O ₅	4,30	0,85
- Rapports : % humus précipitable/ humus total	43,00	53,00
. C/N	20,70	30,00
. P/K	5,50	0,63
. équivalence NPK	1/2,2 / 0,75	1,065 / 2,1

* En pourcentage de la matière sèche

** LAGRANGE B., biométhane: principe technique, utilisations. Tome 2, 1979 EDSUD/Energie alternative, Aix en Provence.

192 - LES EFFLUENTS DE LA DIGESTION COMME ALIMENTATION DU SYSTEME INTEGRE

Dans un système intégré, l'effluent peut servir à entretenir un bassin d'algues ou de cultures hydroponiques qui servent ensuite à l'alimentation de poissons.

1.10 - CONCLUSION

Cette première partie nous a montré la faisabilité de la technique du biogaz ainsi que les avantages qu'on peut en retirer surtout en milieu rural malgache.

A première vue, cette technologie semble théoriquement facile, mais il faut respecter certaines contraintes locales, sinon toute tentative pour son installation sera un échec qui s'opposera à son développement ultérieur. Elle est encore à l'état embryonnaire en milieu rural malgache. En effet, seules quelques institutions ou entreprises ont pu l'exploiter. Ce n'est qu'un peu plus tard que le Gouvernement, par la création d'une commission de biogaz a pris en main l'essai de vulgariser le biogaz en milieu rural malgache.

2ème PARTIE

LES REALISATIONS MALGACHES EN MATIERE DE BIOGAZ

21 - LES ACTIONS PASSÉES

210 - GENERALITES

Les installations malgaches en matière de biogaz ont été surtout réalisées par des Institutions (militaires ou religieuses); elles avaient l'avantage d'être financées par des organismes nationaux ou internationaux et d'avoir de la main-d'oeuvre gratuite.

Ces diverses réalisations nous ont permis d'acquérir une expérience non négligeable, étayée par des recherches faites en labo pour la maîtrise de cette nouvelle technologie.

211 - LES RECHERCHES EN LABORATOIRES ET LES UNITES DE DEMONSTRATION

211.1 - Recherches en laboratoires

Les recherches effectuées au Département d'Agriculture de l'Université d'Antananarivo (E.S.S.Agronomiques) ont eu pour but de maîtriser à petite échelle le projet de fermentation de certains substrats tels que jacinthe d'eau, vinasse, déchets végétaux, ordures ménagères, mais dont la biométhanisation n'est pas totalement maîtrisée.

Le CUR de Tuléar essaie de produire du biogaz à partir d'algues marines, de l'eau salée et des microorganismes méthanogènes isolées de la mer. Cette étude servira ultérieurement de base pour l'implantation des digesteurs dans le Sud-Ouest aride de l'Ile.

211.2 - Les Unités de démonstration et d'expérimentation

Quelques organismes publics ou para-publics comme la Société HERY VAO, l'Institut Malgache d'Innovation (I.M.I.) et le Département AGRICULTURE de l'Université d'Antananarivo, ainsi que des particuliers ont entrepris des expériences de biométhanisation sur terrain.

Les expériences faites par ces organismes dont les résultats obtenus sont satisfaisants, serviront ultérieurement pour la diffusion de la technologie.

211.3 - Les expériences à petite échelle chez des particuliers

Ces expériences avaient pour objet de maîtriser la fermentation des substrats plus moins différents, disponibles chez les utilisateurs. Elles ont

été menées dans des fûts de récupération de 200 litres. Tel fut le cas de l'essai de Frère MARCEL de Saint-Gabriel d'AMBOROVY à MAHAJANGA et celui de Frère ETIENNE du Monastère des Bénédictins d'AMBOHILMANJAKARANO MAHITSY

Le sieur RANDRIANJANAHARISON, mécanicien au Centre de Bevalala, a construit chez lui à VOLOTARA ANDOHARANOFOTSY, ANTANANARIVO, une petite unité de digesteur, de capacité utile d'environ 1,25 m³ et de gazomètre en fût de 200 litres.

Ces petites unités ont réussi à produire du biométhane parfois en quantité suffisante. Toutefois, elles ont incité ces particuliers à la construction de plus grands digesteurs ou du moins suscité l'espoir de pouvoir en construire d'autres plus grands dans l'avenir.

212 - LES UNITES DE PRODUCTION DE BIOGAZ EN MILIEU REEL

La première unité productrice de biométhane en milieu réel fut installée en 1981 à MAHAJANGA à l'Institution Saint-Gabriel, après l'essai réussi par Frère MARCEL. Il y eut ensuite celle de l'Institution Militaire d'IAVOLOHA en 1983, après des expérimentations sur des unités à modèle réduit.

Puis deux Institutions religieuses se sont lancées à leur tour : Centre de Notre-Dame de CLAIRVAUX à IVATO (1984) et le Centre d'Apprentissage Rural de BEVALALA (1984-1985). L'expérience ainsi acquise a entraîné la réalisation d'une petite installation de type familial (la première réalisation de ce genre en 1985) à MAHALO - AMPANEFY, ANTANANARIVO-ATSIMONDRANO. Enfin, celle de l'Institution Saint-Benoît à MAHITSY (1986) vient s'ajouter au nombre de celle déjà en marche.

D'autres installations pourraient être implantées dans diverses régions de l'Ile, pour le compte de bon nombre de Sociétés, et ce, à l'exemple de celle de l'unité pilote de fermentation de la vinasse réalisée à la Sucrierie de MORONDAVA (SIRANALA).

212.1 - Conception et gestion de quelques digesteurs

212.1.1 - Cas de l'Institution Militaire "5 PAGODES" à IAVOLOHA

a) Généralités :

C'est un détachement de l'Armée Populaire pour le développement à vocation agro-pastorale, possédant 35 hectares de terrain agricole ainsi qu'un

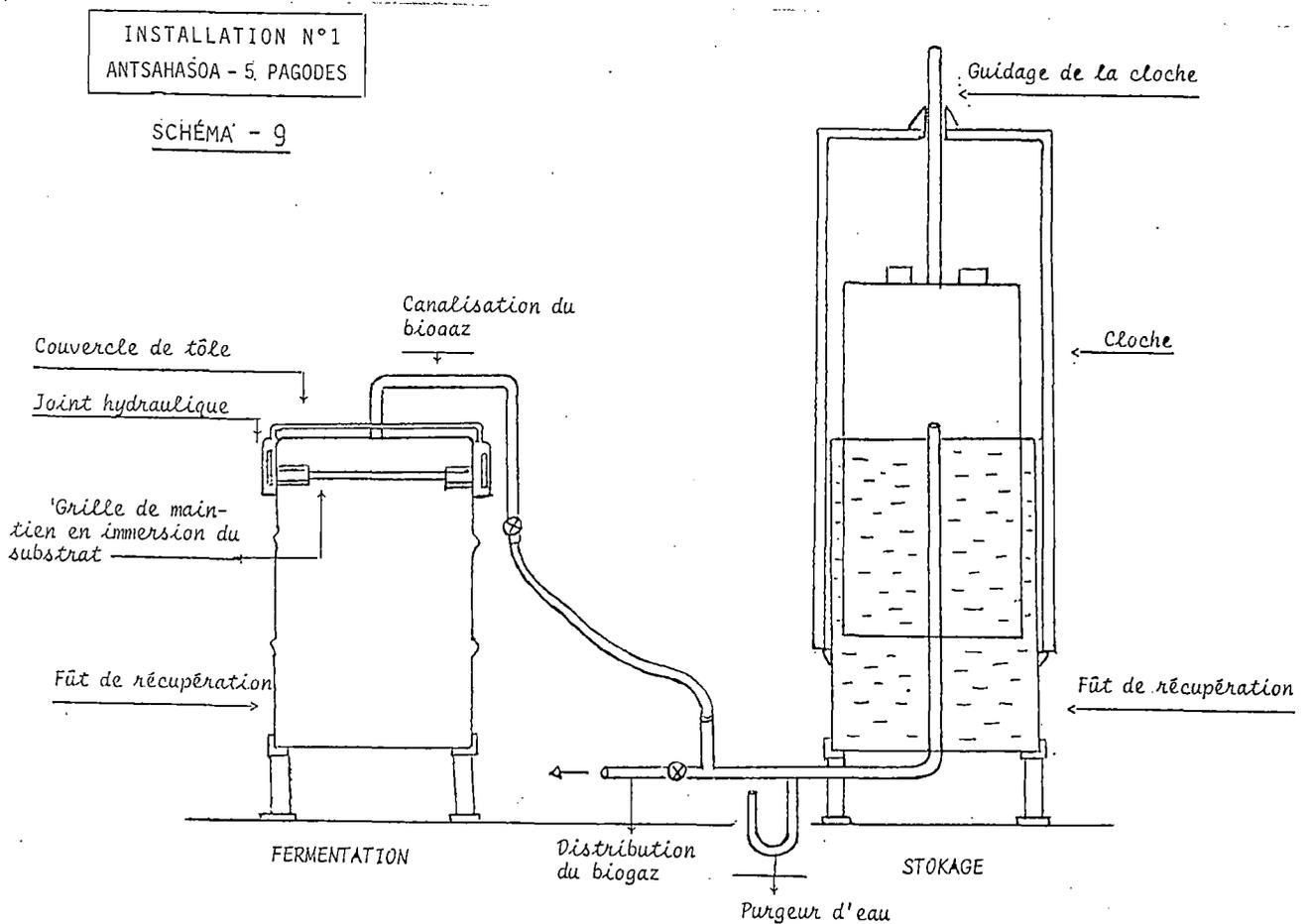
élevage de 70-80 porcs et 20 têtes de bovins parqués dans des étables la nuit.

Cette Institution a réalisé 4 unités de biogaz dont 3 du type ISMAN - DUCELLIER, financés par l'Opération Micro-hydraulique (FRD - RDM) avec la participation de l'E.C.Ma.T* pour la recherche des matières d'oeuvre et un type Chinois résultat d'une coopération de l'Armée Populaire et le M.R.S.T.D.**

b) Conception des digesteurs

b₁) Installation n°1 (schéma n°9) : le fermenteur est un fût de 200 litres fermé par un couvercle en tôle avec un joint hydraulique pour l'étanchéité.

Le gaz est stocké dans un gazomètre en fût de récupération de 200 litres qui, avec un lestage, a une pression constante de 12 millibars.



* Etablissement Central des Matériels Techniques

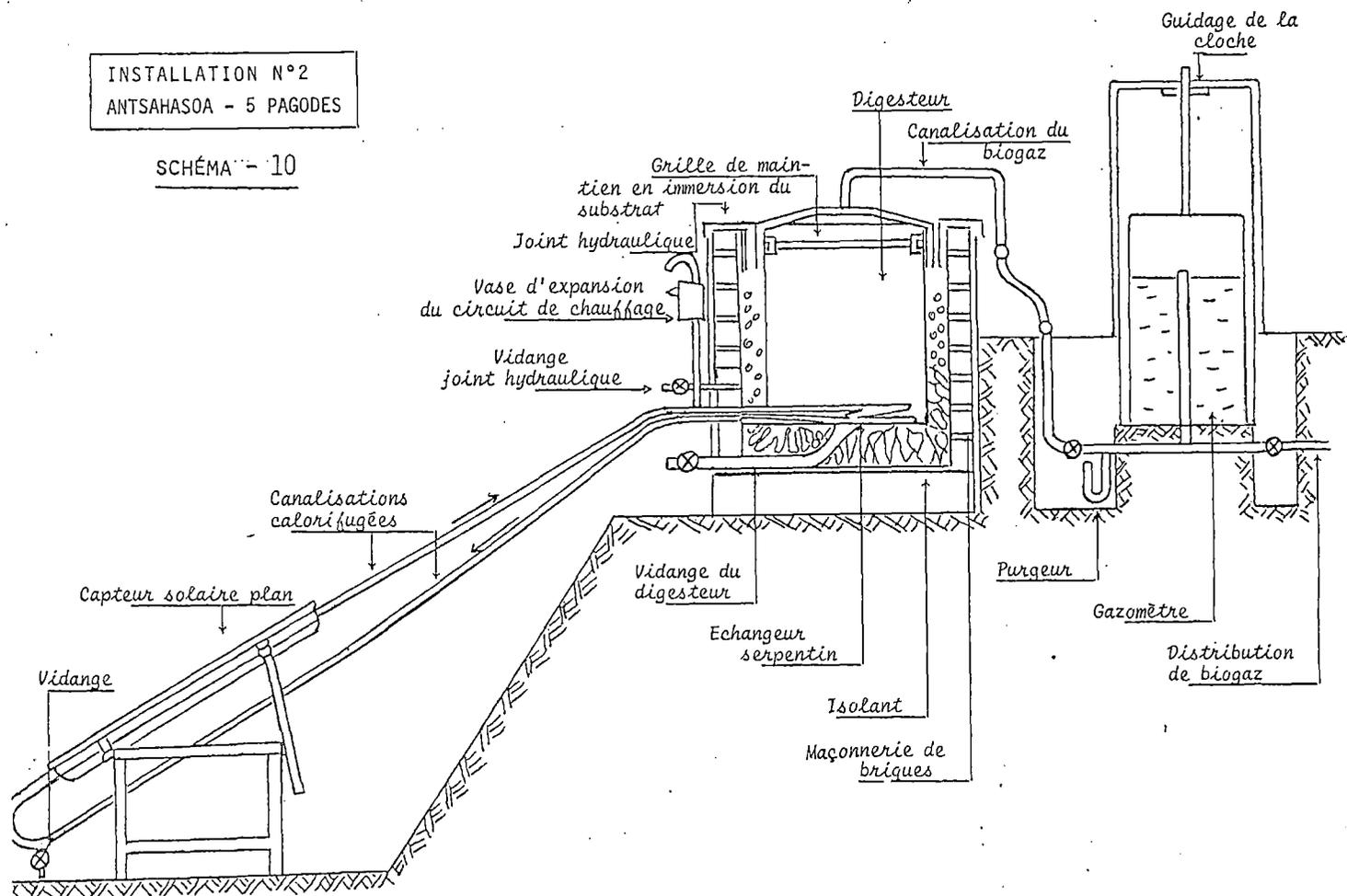
** Ministère de la Recherche Scientifique et Technique pour le Développement

b₂) Installation n° 2 (Schéma n°10): ce digesteur est conçu comme suit :

- le fermenteur : c'est une cuve de 650 litres, faite en tôle de récupération entourée d'une maçonnerie en briques cuites. Entre les parois de la cuve et la maçonnerie, on a bourré de la paille et du polystyrène jouant le rôle d'isolant thermique. La cuve est fermée par un couvercle en tôle avec un joint hydraulique.

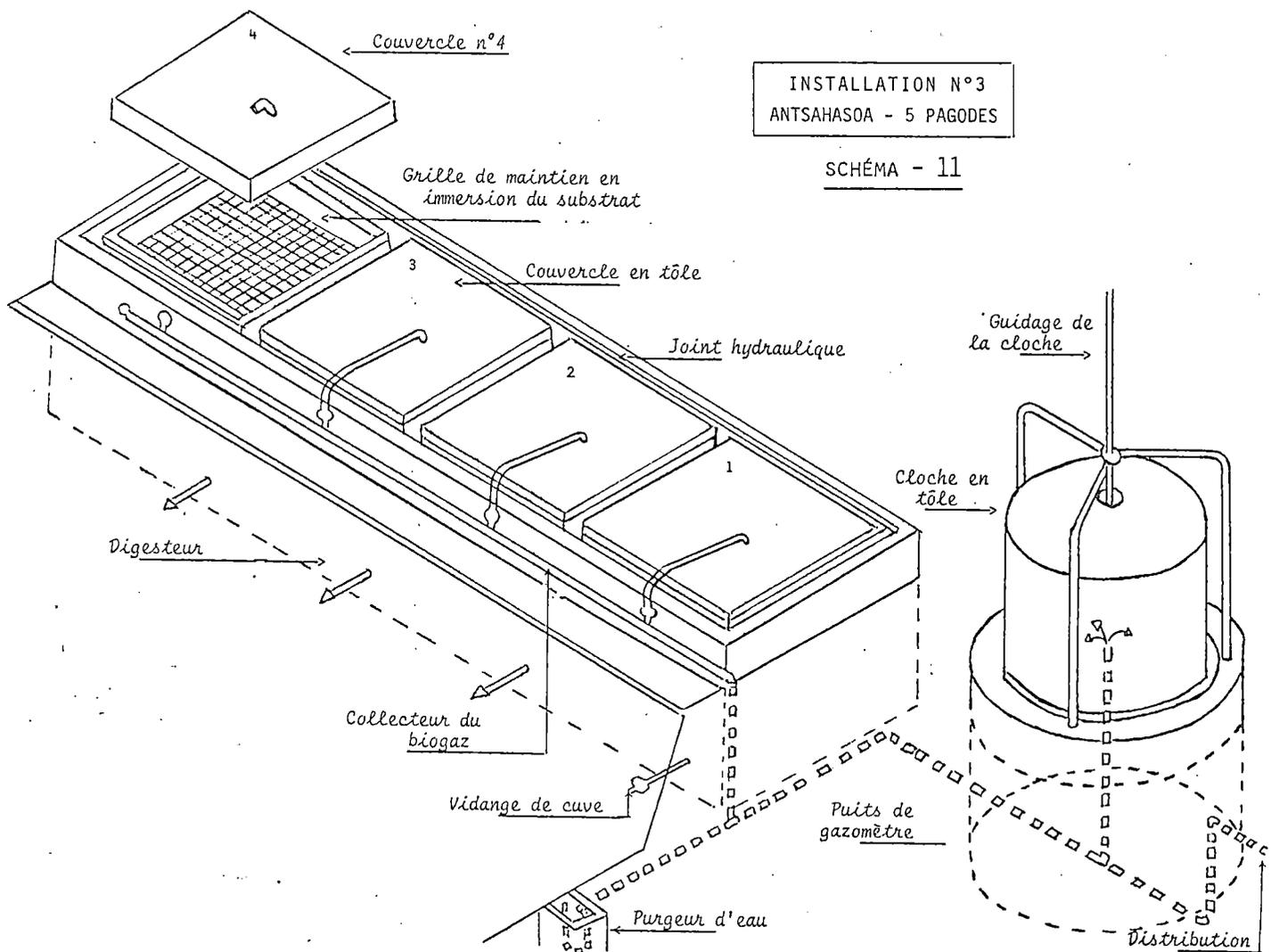
- le stockage : il se fait dans le gazomètre ; c'est une cuve métallique de 370 litres surmontée d'une cloche en tôle avec une pression de 12 millibars.

- le système de réchauffage : un capteur solaire plan de 1,20 m² fonctionne en thermosiphon pour réchauffer le digesteur en vue de maintenir une température constante, mais inutilisable après expérimentation pour des raisons techniques.



b₃) Installation n°3 (Schéma n°11) : c'est une unité de grande taille : elle a pour fermenteur un digesteur de 20 m³, constitué par 4 cuves en béton enduit de 5 m³ chacune. Le tout est enterré en 2/3 de sa hauteur. Cette unité est pourvue d'une double paroi bourrée de paille pour empêcher l'échange de chaleur avec le milieu extérieur.

Le gaz est stocké dans un gazomètre de 6 m³ constitué d'un puits en maçonnerie de briques enduites. Ce gazomètre est surmonté d'une cloche en tôle.



b₄) Le 4ème digesteur : Cette dernière unité est du type Chinois de 10 m³ à dôme fixe. Le stockage est dans le digesteur lui-même. La voûte et les fosses sont construites en maçonnerie de briques cuites assemblées au mortier de ciment, tandis que les parois du fermenteur, le fond et le couvercle sont en béton armé.

c.) Gestion de ces unités

Les trois premières unités décrites ci-dessus utilisent comme substrat, du lisier de porcs qui subit préalablement une préfermentation à l'air libre avant le chargement. Le temps de séjour à l'intérieure de chaque cuve est de 60 jours.

Pour le digesteur du type chinois, l'alimentation est faite de bouse ramassée chaque matin à raison de 70 kg par jour.

Le rendement moyen biogaz/volume de ces digesteurs est de 25 %. Ce rendement pourra s'améliorer*. La production moyenne journalière de chaque unité est donnée par le tableau suivant :

TABLEAU N°10 : RENDEMENT DE BIOGAZ/VOLUME DES DIGESTEURS

Digesteur	Quantité /jour de biogaz	Volume du Digesteur
N°1	50 l	200 l
N°2	185 l	650 l
N°3	5400 l	20 m ³
N°4	2,5 m ³	10 m ³

Les produits de la biométhanisation sont utilisés pour la cuisson de trois repas journaliers des gradés (10 hommes), pour l'éclairage et enfin pour le fonctionnement d'un réfrigérateur.

Les résidus de la fermentation des discontinus sont utilisés pour amender les terrains de cultures tandis que ceux des continus sont recyclés dans les digesteurs discontinus.

212.1.2 - Cas du Centre Notre-Dame de CLAIREV.AUX à IVATO

a) Généralités :

C'est un Orphélinat des Pères SALESIENS de Don BOSCO qui accueille comme pensionnaires des orphélins de sexe masculin de 8 à 15 ans au nombre

* Ces mesures ont été effectuées en saison froide. Avec l'expérience, les utilisateurs pourront trouver le meilleur équilibre entre l'alimentation en substrat et les besoins en biogaz.

de 120. Ces orphélins reçoivent une instruction de base T₁ à T₇* ainsi que des formations techniques et professionnelles.

Le Centre pratique un élevage porcin de 300 têtes et de plus de 2000 poules pondeuses.

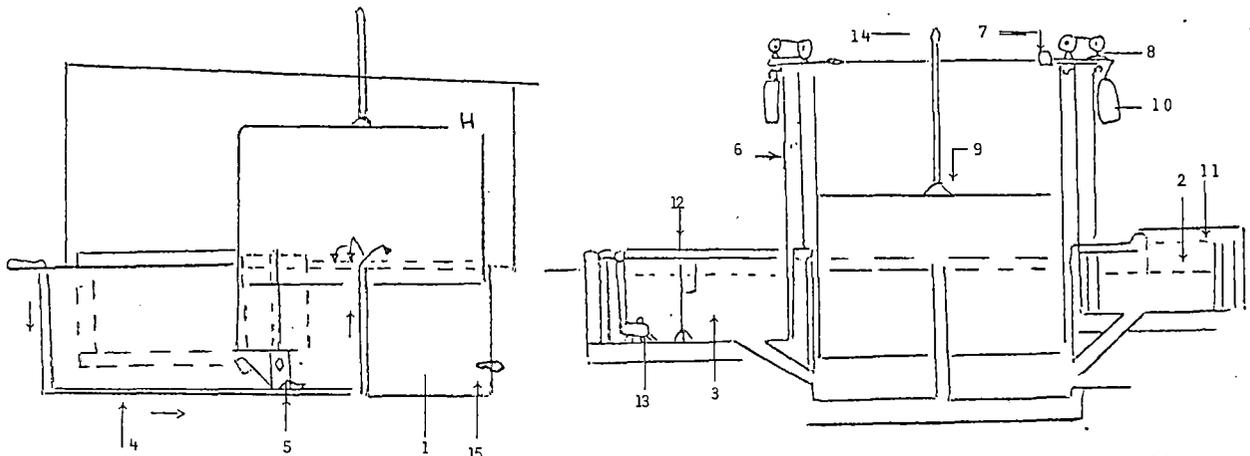
b) Conception du digesteur

Vers les années 1975 - 1976, une première installation du type ISMAN-DUCELLIER a été faite au Centre. Malheureusement, cette unité n'a pu fonctionner du fait de la non-maîtrise de la technologie. Ce n'est qu'en 1984 qu'une nouvelle installation a été réalisée. Le type ISMAN - DUCELLIER a été abandonné et on a construit un digesteur continu, de type indien dont (Schéma n°12) les caractéristiques sont :

- Le digesteur : c'est une cuve en tôle de récupération d'un volume de 23 m³ entièrement enterré ;

INSTALLATION DE BIOGAZ
NOTRE DAME DE CLAIRVEAU

SCHÉMA - 12



- | | |
|----------------------------|---------------------------|
| 1 - Cuve de fermentation | 8 - Train de poulie |
| 2 - Fosse d'alimentation | 9 - Trou d'homme |
| 3 - Fosse de déchargement | 10 - Lest |
| 4 - Tuyau de recirculation | 11 - Tamis d'alimentation |
| 5 - Vanne | 12 - Grille de protection |
| 6 - Poteau | 13 - Pompe |
| 7 - Câble et tendeur | 14 - Anneau de guidage |
| | 15 - Cale |

* Equivalents de la classe de 12ème à celle de la 7ème

- Le gazomètre : c'est une cloche métallique de 23 m³ en tôle de récupération avec une pression de 14 millibars ;

- La fosse de chargement : elle est construite en maçonnerie de briques enduites, de volume utile de 1,5 m³ conçue pour la préfermentation aérobie des substrats ayant le chargement ;

- La fosse de déchargement : même construction que celle du chargement avec un volume utile de 1 m³ relié à la cuve par une buse métallique.

c) Gestion du digesteur

Le substrat utilisé pour la fermentation est du lisier de porcs ou des fientes de volaille à raison de 90 kg de M.S./j .

La production en biogaz de 10 - 15 m³ par jour, est utilisée pour la cuisson des trois repas journaliers de 150 personnes.

En ce qui concerne les résidus de fermentation, les paysans environnants les récupèrent gratuitement pour amender leurs terrains de cultures.

212.1.3 - Cas du Centre de BEVALALA

a) Généralités

C'est un Centre de formation des jeunes paysans en techniques agricoles et rurales. Le Centre pratique des activités multiples dont la principale est l'élevage avec 200 vaches laitières, 600 - 800 têtes de porcs et plus de 2000 poules pondeuses.

L'agriculture, avec ses 75 hectares de cultures, diverses (fourragères, vivrières, maraîchères, potagères, fruitières) est partiellement orientée pour satisfaire les besoins en alimentation des animaux.

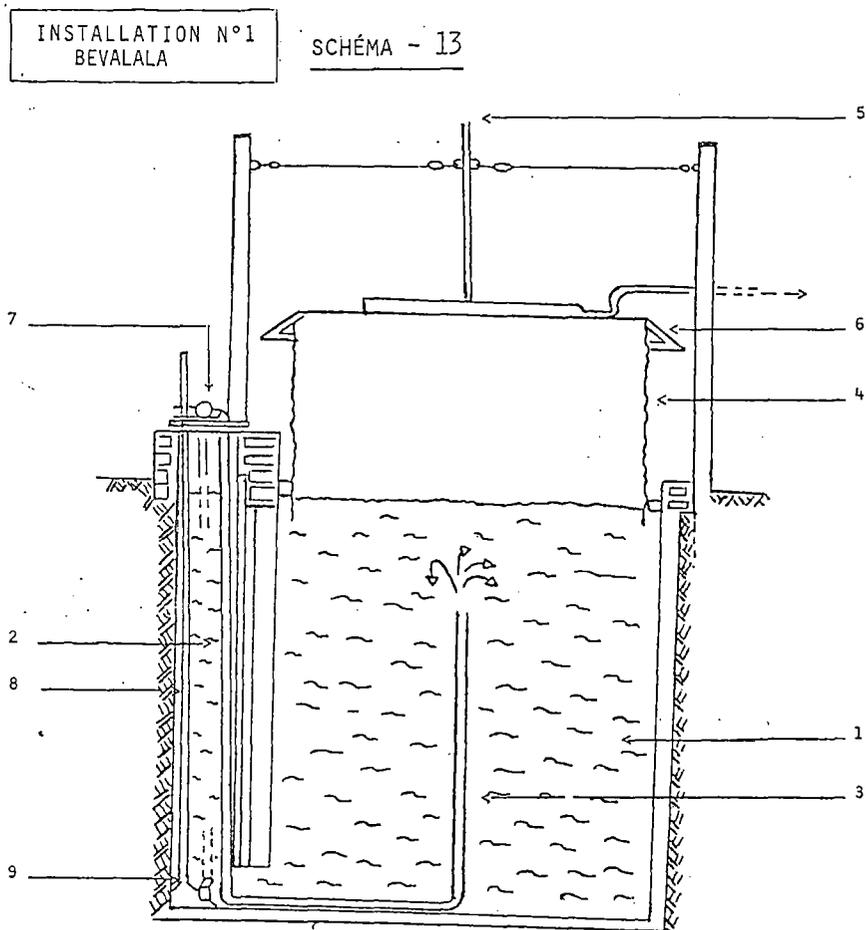
Les activités de transformation agro-alimentaires comprennent la laiterie (fromage, crème, lait en sachet), la charcuterie et la proven-derie.

Dans le cadre de ses activités, le Centre créa deux installations de biogaz.

b) Conception des digesteurs

La conception des deux installations est identique, du type Indien. Seuls, leur capacité et les matériaux de construction utilisés, diffèrent.

Pour le Digesteur n°1 (schéma n°13), le fermenteur est un trou circulaire construit en béton armé d'une capacité utile de 35 m³.

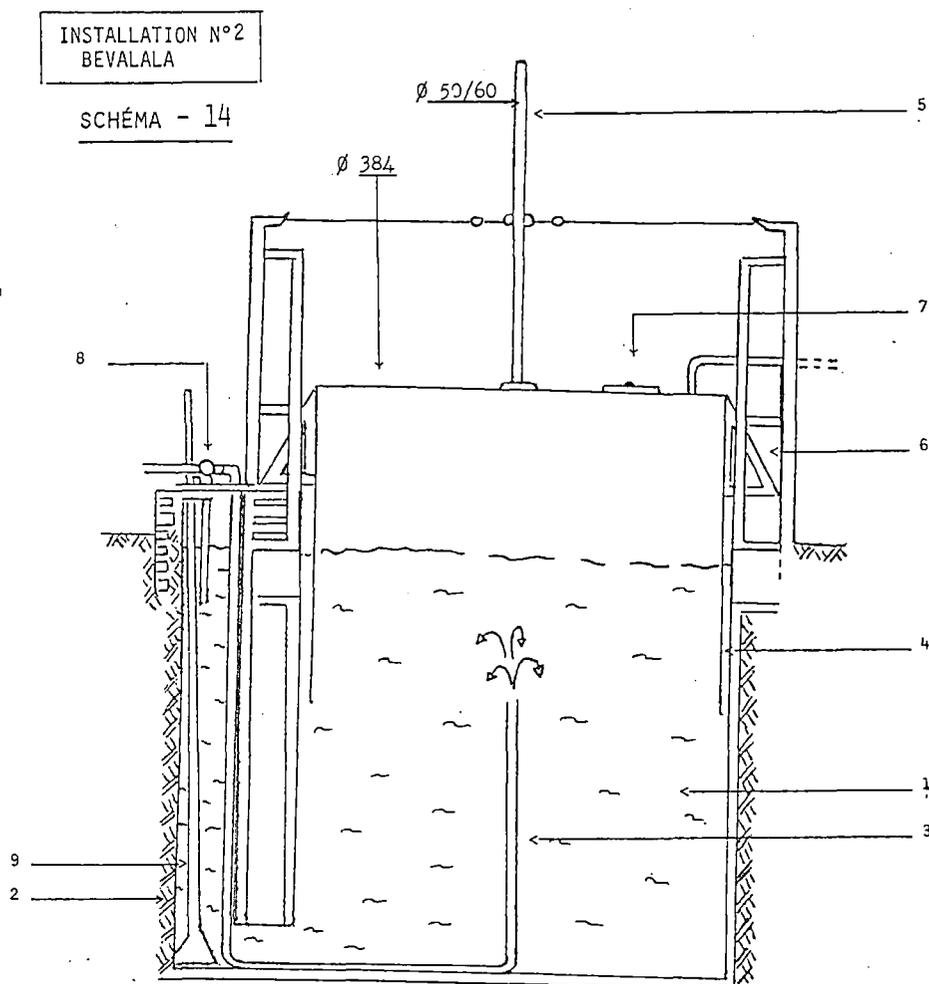


- 1 - Digesteur
- 2 - Fosse d'alimentation
- 3 - Tuyau pour l'agitation hydraulique
- 4 - Gazomètre
- 5 - Guide de la cloche
- 6 - Arrêt du gazomètre
- 7 - Vanne à 3 voies
- 8 - Agitateur d'alimentation
- 9 - Pompe électrique.

Pour le digesteur n°2 (schéma n°14), le fermenteur est un trou protégé par une paroi avec des lattis métalliques déployés et crépissés ; le fond est dallé avec du mortier au ciment. Sa capacité est de 45 m³.

Le stockage du biogaz se fait dans une cloche métallique en tôle avec un trou de pénétration au sommet, hermétiquement fermé par un couvercle en tôle.

Le chargement se fait par une fosse d'alimentation de 4 mètres de profondeur, avec une capacité utile de 1,13 m³. Cette fosse est un assemblage de quatre buses en béton moulé.



- 1 - Digesteur
- 2 - Fosse d'alimentation
- 3 - Tuyau pour l'agitation hydraulique
- 4 - Gazomètre
- 5 - Guide de la cloche
- 6 - Arrêt du gazomètre
- 7 - Trou d'homme
- 8 - Vanne à 3 voies
- 9 - Agitateur d'alimentation.

Le déchargement ou l'évacuation se pratique par le système de trop plein au moyen d'un canal creusé sur le bord supérieur du digesteur.

Le système d'agitation hydraulique adopté comprend une vanne à trois voies : la première est reliée à deux tuyaux métalliques en forme de U

à l'intérieur de la masse à fermenter, la seconde, à une pompe électrique de submersion qui aspire et refoule le substrat, soit dans la première voie (recirculation), soit dans la troisième voie (évacuation) vers la fosse à purin.

c.) Gestion des digesteurs

Le chargement de ces deux unités se fait alternativement tous les deux jours. Le substrat journalièrement admis dans chaque digesteur est de 600 kg de matières fraîches diluées de 88 à 90 % d'eau. Ce substrat est composé de fientes de poules et du lisier de porcs avec une production moyenne journalière de 63 m³ de biogaz. Cette production est utilisée pour la cuisson journalière de trois repas pour dix personnes, le chauffage des poussins dans la poussinière, le chauffage du caillé, la fusion de la cire de protection des fromages à la fromagerie, et enfin, pour la préparation d'eau chaude nécessaire à la fabrication des produits laitiers et charcutiers.

212.2 - Le coût de ces installations

Toutes ces installations satisfaisant aux besoins de ces centres utilisateurs ont été réalisées sur des initiatives personnelles mobilisées en leur sein : les coûts de ces unités diffèrent sensiblement les unes des autres, sans tenir compte de la main-d'oeuvre qui a été toujours gratuite.

Le tableau suivant donne les coûts estimatifs ramenés en 1986 de ces quelques installations.

TABLEAU N° 11 : COÛTS DES DIGESTEURS *

Centre ou Institution	Type de digesteur	Volume	Coût (x 10 ³) FMG
Institution 5 PAGODES	ISMAN - DUCELLIER	200 l	30
	-id°-	650 l	300
	-id°-	20 m ³	2 000
	Type Chinois	10 m ³	?
Centre N-D CLAIRVAUX	Type Indien	23 m ³	3 300
Centre de BEVALALA	Type Indien	35 m ³	3 050
	Type Indien	45 m ³	4 100

* 1\$ US = 627,45 FMG (en Juin 1986)

213 - CONCLUSION

La présentation de ces quelques unités nous montre que la technologie du biogaz, lorsqu'il y a une bonne motivation des utilisateurs peut être bien maîtrisée. Les coûts des installations se révèlent onéreux pour un utilisateur moyen ; ils peuvent baisser avec de l'expérience dans la construction et dans l'utilisation des matériaux de construction.

22 - LES ACTIONS EN COURS

220 - GENERALITE

L'intérêt que présente la technologie du biogaz sur le plan économique et social justifie l'action en faveur de sa diffusion.

Conscient du grave danger qu'entraîne l'utilisation abusive du bois de feu, principale source d'énergie traditionnelle utilisée à Madagascar (60% de la consommation d'énergie totale du pays), le Gouvernement malagasy a mis en place une commission interministérielle présidée par le M.R.S.T.D., chargée de coordonner et d'organiser rationnellement des projets et des programmes concernant la filière biogaz.

Par la voie de cette commission, le Gouvernement a officiellement demandé la participation de la F.A.O., pour la réalisation d'un projet de démonstration et d'évaluation des techniques de production de biogaz à Madagascar. Les principaux buts de ce projet consistaient surtout à

- mettre en place des unités de démonstration de production de biogaz auprès de cibles socio-économiques choisis pour faire connaître la méthode de réalisation et ses avantages, ainsi que les diverses utilisations possibles du biogaz dans le milieu rural ;

- promouvoir une formation permettant aux responsables et techniciens du projet biogaz d'acquérir de l'expérience tant sur place que par le biais des voyages d'études ; faire connaître au monde rural la technologie du biogaz et son application ;

- mettre en place les structures qui vont faciliter le développement et la vulgarisation du biogaz pour l'établissement d'une section biogaz au sein

du centre rattaché au M.R.S.T.D. et établir les contacts nécessaires avec l'industrie et les banques pour une grande diffusion de la filière biogaz.

221 - LE PROJET F.A.O. TCP/MAG/6652 (T)

Le projet dénommé "*Technique de production de biogaz*" a été formulé dans sa version finale par le M.R.S.T.D.

Ce dernier a veillé aussi à l'exécution du projet qui se présentait comme suit :

- mission de consultations pour information générale par un expert international ;
- voyages d'études en Chine et aux Indes ;
- identification des sites et études ;
- construction et expérimentation des différents types de digesteurs et des différentes utilisations ;
- évaluation des projets.

221.1 - Situation du projet

Les résultats obtenus par l'identification des sites ont abouti aux conclusions suivantes :

- les sites retenus étaient des localités où les paysans possédaient suffisamment de bétail pour assurer la disponibilité des matières premières nécessaires au bon fonctionnement de l'installation ;
- les régions prioritaires étaient celles des Hauts-Plateaux qui répondent aux critères suivants :
 - . disponibilité en eau et déjections animales
 - . motivation et intérêt du futur propriétaire
 - . crise de combustible.

- installations de plusieurs types de digesteurs suivant les conditions sociales des paysans (modes de vie, niveau intellectuel, capacité d'accueil des nouvelles techniques ...) ainsi que leurs situations économiques (possibilités financières, priorités familiales, perspectives d'avenir...).

Au vu de ce qui précède, le projet est axé d'abord sur l'utilisation des déchets d'élevage comme substrats. Ensuite, l'installation de plusieurs types de digesteurs appropriés, lesquels par comparaison des résultats obtenus, permettraient plus tard de retenir le moyen le plus économique à utiliser.

Ainsi, le Moyen-Ouest de Madagascar a été choisi comme première région-cible du projet, suivie de celle d'Antsirabe et enfin celles des environs d'Antananarivo.

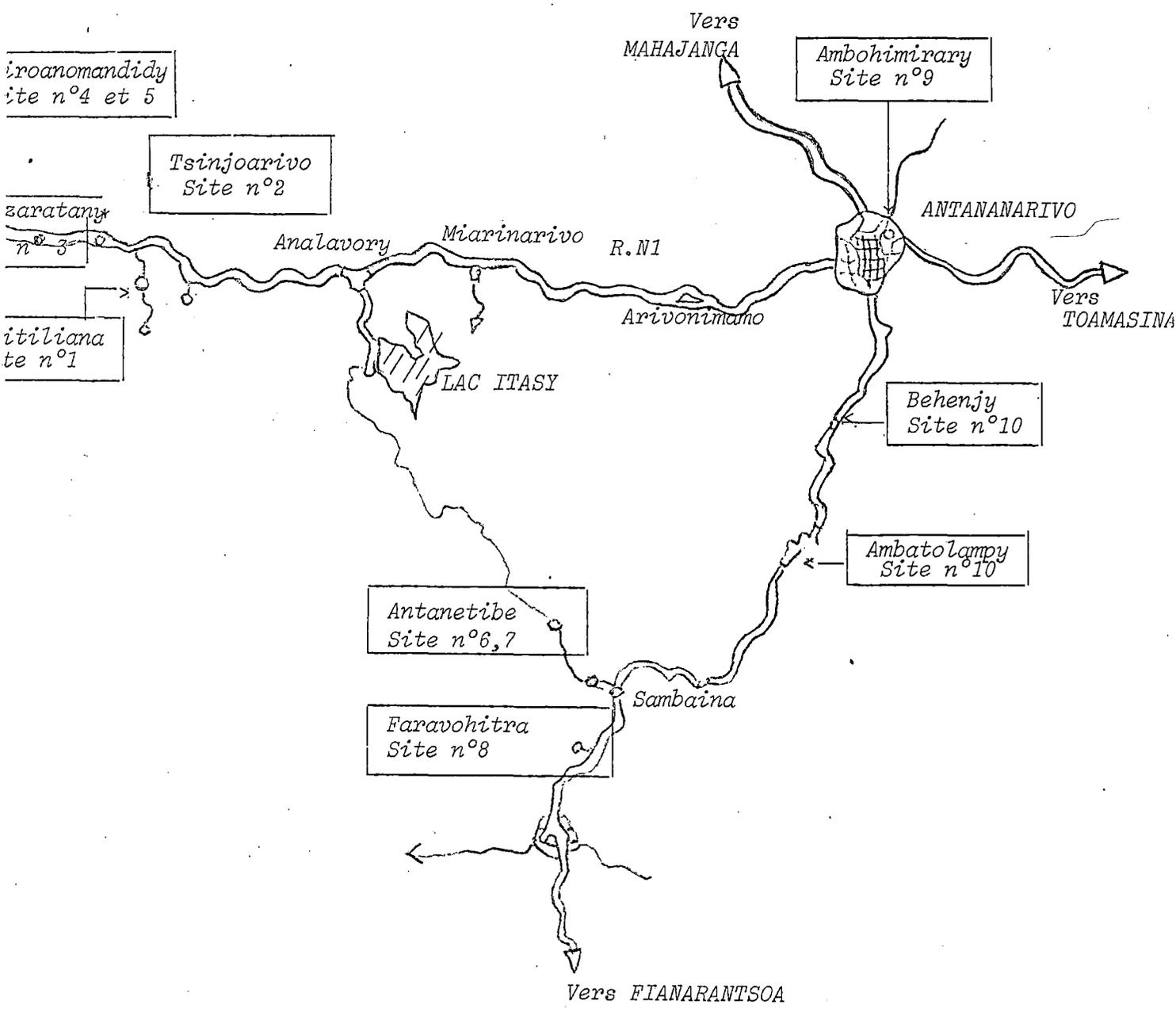
212.2 - Localisation et type de digesteur-pilote du projet

Les résultats des études et enquêtes effectuées par les consultants nationaux ont aboutit à l'implantation de 11 digesteurs répartis comme suit :

TABLEAU N°12 : LOCALISATION ET TYPE DE DIGESTEUR

Région	Modèle	Capacité	Bétail (fin Juin 1988)
<i>Moyen-Ouest</i>			
Site n°1	Borda à cloche métallique	15 m ³	19 zébus
Site n°2	Plug Flow	130 m ³	250 zébus + 100 porcs
Site n°3	Borda à cloche FRP	45 m ³	30 vaches + 20 porcs
Site n°4	à ballon à bâche	10 m ³	40 porcs
Site n°5	G.T.Z. à dôme fixe	15 m ³	13 zébus
<i>Antsirabe</i>			
Site n°6	Borda à cloche FRP	15 m ³	8 boeufs + 9 vaches et 5 porcs
Site n°7	Shanghai	10 m ³	8 boeufs + 3 vaches
Site n°8	Borda à cloche métallique	15 m ³	5 boeufs + 9 vaches
<i>Environs d'Antananarivo</i>			
Site n°9	à ballon à bâche	8 m ³	10 porcs + toilette
Site n°10	Chinois	7,5 m ³	2 boeufs + volaille
Site n°11	Chinois	7,5 m ³	3 vaches + 2 boeufs

SITUATION GEOGRAPHIQUE DES INSTALLATIONS DE DIGESTEURS



10 20 30 40 50 km

221.3 - Financement des installations-pilotes

L'installation de ces unités de biogaz est le fruit d'une coopération technique et financière du Gouvernement malgache et de la F.A.O. Leurs contributions se répartissent comme suit :

221.3.1 - Apports du bénéficiaire

Chaque propriétaire a participé au maximum aux frais de réalisation de son digesteur ; le projet a évalué ce que le paysan pouvait supporter au titre d'apport personnel pour l'achat ou la fourniture des matériaux localement disponibles (briques cuites, sable de rivière, gravillons, bois et planches de coffrage, tuiles, etc...), les transports de ces matériaux, l'infrastructure d'accueil (hébergement et nourriture), la main-d'oeuvre pendant les travaux ; et, dans quelques cas pour l'entretien mensuel des appareils d'utilisation tels que : réfrigérateur, lampe à réchaud. Le volume monétaire de ces apports varie suivant les activités des bénéficiaires.

221.3.2 - Contre-partie malgache

Le M.R.S.T.D. assurait les frais de réalisations des installations d'Antsirabe (n°6, 7, 8) et celle n°9 d'Antananarivo ; la rémunération de la main-d'oeuvre et l'achat de quelques matériaux et des accessoires des digesteurs, ainsi que tous les frais occasionnés par les déplacements des consultants à l'intérieur du pays.

221.3.3 - Contribution de l'O.N.U. par le biais de la F.A.O

Toutes les dépenses locales en dehors de celles déjà énumérées ci-dessus pour réaliser les opérations, ont été prises en charge par l'organisme international, qui a aussi assuré le paiement de toutes les charges d'interventions extérieures.

222 - REALISATIONS DES DIGESTEURS-PILOTES EN MILIEU RURAL

222.1 - Réalisations par le groupe des consultants du M.R.S.T.D.

222.1.1 - Généralités

Les installations-pilotes réalisées par le projet sont au nombre de onze digesteurs dont 9 réalisés par le groupe de consultants nationaux du M.R.S.T.D. Les points d'installations de ces 9 unités se situent comme suit :

- *Au Moyen-Ouest* : 3 groupes de sites.

. 1er Groupe : 3 sites individuels à caractère familial (n°s 3, 4 et 5) pour la cuisson des repas et des aliments du bétail, l'éclairage et la réfrigération des produits périssables.

. 2ème Groupe : 1 site communautaire (n°1) pour la cuisson des repas de trois familles.

. 3ème Groupe : 1 site à caractère professionnel (n°2) pour l'électrification de la ferme et pour l'autonomie énergétique de l'exploitation.

- *A Antsirabe* : 3 sites à caractère professionnel pour la conservation du lait au froid ont été retenus (n°s 6,7,8). Ils appartiennent à des paysans pilotes encadrés par la FIFAMANOR.*

- *A Antananarivo* (tout près de la ville) : 1 site à caractère familial utilisé pour la cuisson des repas.

Sauf le Plug flow du site n°2, toutes ces installations ont une forme identique de base. Cette forme dite hémisphérique, faite en maçonnerie de briques cuites, est récemment développée par le G.T.Z. (R.F.A.) avec des parois minces résistant à la compression. Le fond de la semelle des cuves de fermentation sont en forme de callote sphérique coulée en béton armé.

En fonction du stockage des gaz, on peut classer ces installations en trois catégories :

a) les digesteurs à basse pression : le stockage du gaz est séparé du digesteur ; il utilise un ballon souple en bâche plastifiée ;

b) les digesteurs à moyenne pression : le stockage du gaz fait intervenir l'utilisation des cloches gazométriques mobiles associées au digesteur. Ces cloches sont construites en matériaux spéciaux (tôle plane noire ou TPN, plastique renforcée de fibre ou FRP) ;

c) les digesteurs à haute pression : installation à dôme fixe dont le stockage des gaz est à l'intérieur du digesteur et qui lui confère une grande pression ; elle peut atteindre 100 cm d'eau.

* FIFAMANOR : *Fiompiana, Fambolena, Malagasy Norvegienne.*

222.1.2 - Description succincte des régions d'implantation

a) Le Moyen-Ouest

Cette région se trouve à une altitude comprise entre 900 et 1000 mètres, avec un climat de type tropical humide et de température comprise entre 32°C (max.) et 18°C (min.).

La population est composée de migrants de plusieurs ethnies venues s'y installer. C'est une caractéristique à ne pas négliger pour l'amélioration des techniques de production.

a₁) Activités agricoles : Dans cette région, la riziculture tient une place prépondérante dans l'activité agricole des paysans avec environ 45 % des superficies cultivées. Viennent ensuite les cultures vivrières telles que : manioc, maïs, haricots arachides, taros... Enfin, les cultures maraîchères, bien que marginales, assurent tout de même un revenu d'appoint pour les paysans.

Il convient de noter l'existence de l'ODEMO; un organisme d'encadrement des paysans pour le développement intégré de la région

a₂) Activités d'élevages : L'élevage bovin, traditionnellement pratiqué de façon extensive, est de loin le plus important dans cette région. Le centre zootechnique de la FO.FI.FA.*** de Kianjasoa est chargé de vulgariser la race "Renitelo" destinée à la production de viande race résultant de trois croisements: avec 50% Africander, 25% Zébu malgache, 25% Limousin.

Les paysans s'adonnent aussi à l'élevage de porcs de race "Large White". Un petit éleveur possède en moyenne 20 - 30 têtes de zébus et une dizaine de porcs. En plus, chaque famille élève environ quelques dizaines de têtes de volailles qui leur servent de rentrées d'argent pendant les périodes difficiles.

a₃) Approvisionnement en combustibles : En saison sèche, la région du Moyen-Ouest est la proie facile des feux de brousse intenses

* ODEMO : Opération de Développement du Moyen-Ouest

*** FO.FI.FA. ; Foibe Fikarohana amin'ny Fampandrosoana.

occasionnés par une forte concentration d'éleveurs. Ces feux ravageurs entraînent la dénudation du sol, la végétation arbustive se raréfie, d'où les difficultés d'approvisionnement en bois de chauffe et en charbon servis à partir des Fivondronana des régions avoisinantes distants quelquefois jusqu'à 200 km.

En saison de pluie, le manque de combustible paralyse la population des villages isolés par les crues. Or c'est la saison des travaux des champs qui occupent toutes les familles. Ceci complique le ravitaillement car il faut marcher à pied pendant plusieurs heures, voire même des journées entières pour trouver des bois morts.

Quand à l'utilisation du "bozaka"^{**}, cette pratique secondaire accentue encore le problème car en plus de la coupe qui doit récolter une grande quantité, il faut immobiliser deux personnes pour la cuisson (une pour l'approvisionnement et une pour activer le feu).

b) Région d'Antsirabe

C'est une région de haute altitude (2000 à 2300 m). La plus fraîche de Madagascar pendant la saison hivernale, le climat y est de type tropical avec une pluviométrie totale de 1300 mm (moyenne de 10 ans) et une température de l'ordre de 28°C (max.) et 4°C (min.). La saison chaude (Octobre à Mars) est nettement séparée de la saison fraîche (Avril - Novembre).

b₁) Activités agricoles : Du point de vue agricole, les paysans de cette région sont relativement évolués et adoptent des façons culturales améliorées qui expliquent notamment le rendement moyen élevé de paddy de 3 tonnes à 3 tonnes 500 à l'hectare obtenu.

L'encadrement de ces paysans est pris en charge par l'O.D.R.^{***} et la FI.FA.MA.NOR.^{****} Le rôle de cette dernière est surtout orienté vers la vulgarisation des spéculations de produits tels que : pomme de terre, blé, fourrage (avoine, maïs fourrager). La possibilité de faire deux campagnes par année pour la culture de la pomme de terre rentabilise beaucoup cette spéculation avec un rendement de 7 t/ha.

^{**} Bozaka : herbe séchée, utilisée pour remplacer les bois de chauffe.

^{***} O.D.R. : Opération de Développement Rural.

^{****} FI.FA.MA.NOR. : Fiompiana, Fambolena Malagasy Norvegienne.

b₂) Activités d'élevage : La FI.FA.MA.NOR., en plus de ses activités agricoles, assume parallèlement une activité de vulgarisation de l'élevage de vaches laitières.

Cette action consiste à :

- sensibiliser les paysans pour qu'ils saisissent l'intérêt et la rentabilité de l'élevage des vaches laitières ;
- améliorer le mode d'élevage, notamment en association avec l'agriculture (vulgarisation des étables fermières, de la culture fourragère).

Les races de vaches laitières vulgarisées sont :

- la "pie-rouge" norvégienne,
- le demi-sang résultant d'un croisement pie-rouge/frison ou pie-rouge/zébu malgache.

Ces vaches peuvent donner 15 à 20 litres de lait par jour en moyenne pendant 5 à 7 mois. Bien entretenues, elles peuvent donner jusqu'à 40 litres par jour.

La collecte du produit laitier chez les paysans de la FI.FA.MA.NOR. se fait chaque matin. Or, le soir, les paysans effectuent une deuxième traite, et la conservation de celle-ci pose un problème. La solution adoptée par eux varie selon leur possibilité matérielle :

a) laisser les cruches à lait dans un courant d'eau la nuit. Seulement, l'efficacité est limitée en saison chaude, surtout au moment où l'on a le plus besoin de fraîcheur.

b) pasteuriser le lait en le faisant bouillir quelques minutes mais ce procédé augmente le prix de revient du produit par l'utilisation du combustible et fait diminuer le volume de traite par évaporation ;

c) abandonner la traite du soir. Cette solution est à déconseiller car elle entraîne conséquemment une maladie appelée "fièvre de lait" qui atteint les vaches ;

d) utiliser des réfrigérateurs autonomes. C'est la solution la moins courante car l'électricité fait défaut.

b₃) Approvisionnement en combustible

L'approvisionnement en bois de chauffe et en charbon qui constituent les principaux combustibles utilisés ne rencontre pas encore, pour le moment, les problèmes existants dans d'autres régions de l'Ile, car le Mimosa (*Accacia dealbata*) y est encore abondant. De plus, le reboisement de pins a acquis en deux décennies, des dimensions de forêt. Cette couverture n'abaisse pas pour autant le coût du combustible.

Malheureusement, l'exploitation intensive et inconsidérée de ces ressources laisse prévoir que d'ici deux à trois ans, cette région connaîtra le même sort que les autres contrées.

c) Région d'Antananarivo

c₁) Activités agricoles : Les paysans agriculteurs d'Antananarivo ont surtout pour activité principale la production rizicole avec un rendement moyen de 1,5 t à 2,5 t/ha. La région d'Antananarivo est aussi la première productrice de légumes avec ses cultures maraîchères qui viennent en seconde position, tandis que les cultures sèches qui englobent le manioc, le maïs et l'haricot, précèdent celles des arbres fruitiers.

c₂) Activités d'élevage : L'exploitation dominante est surtout celle de l'élevage porcin et de la basse-cour. L'élevage des boeufs y est pratiqué pour les besoins du travail et de la traite.

On distingue, dans cette région, deux groupes d'exploitation :

- les grandes et moyennes fermes implantées aux environs de l'agglomération tananarivienne ou dans les proches banlieux ;

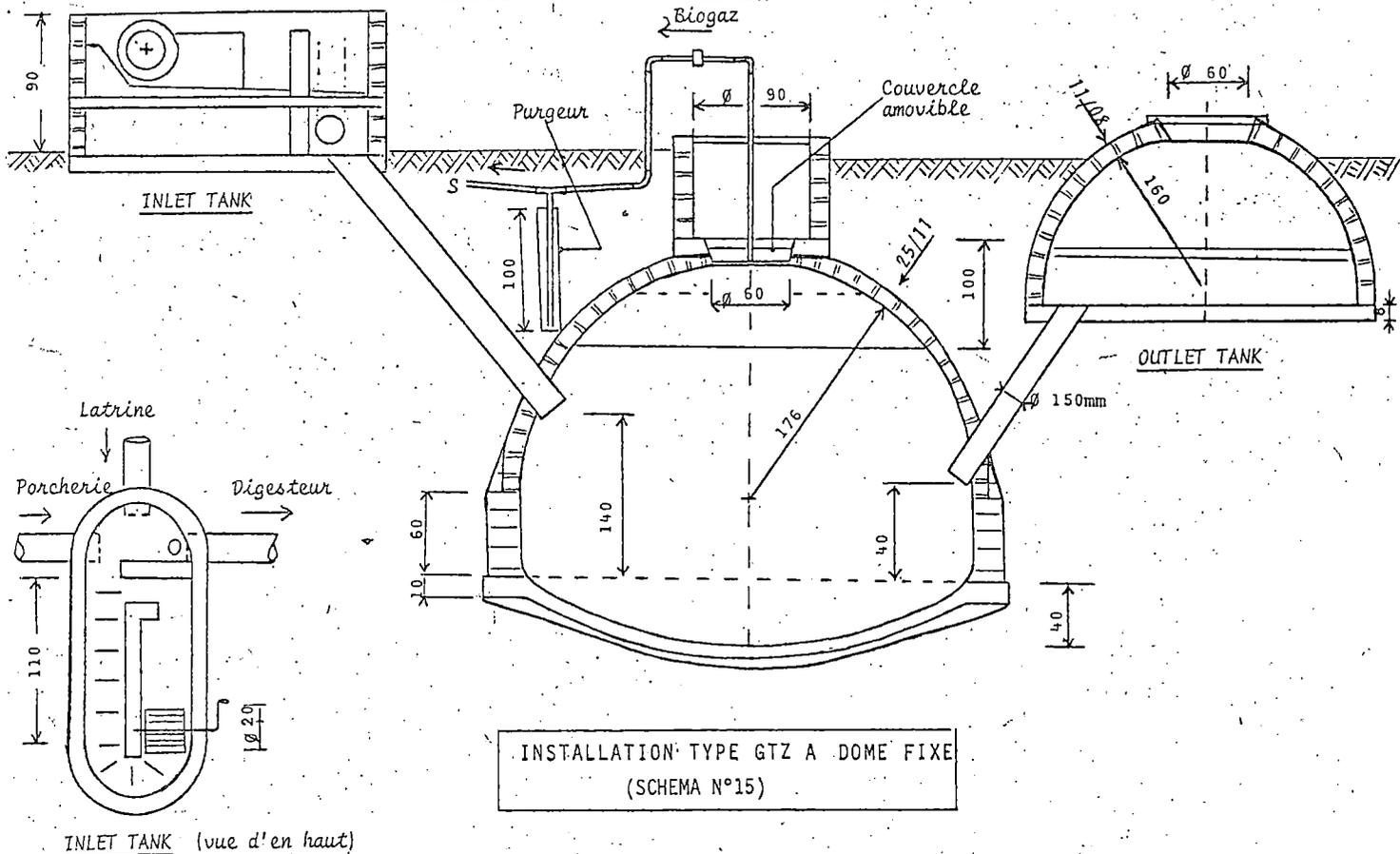
- les petits élevages familiaux qui se réduisent à quelques têtes (volaille, porc, boeuf...). Malheureusement, ils sont exposés à des vols qui découragent les honnêtes paysans.

c₃) Approvisionnement en combustibles : Rares sont les familles qui utilisent l'électricité et le gaz comme source d'énergie en guise de combustible. Les bois de chauffe et le charbon restent toujours les plus fréquemment utilisés dans beaucoup de foyers. L'approvisionnement en ces matières devient de plus en plus difficile et coûteux du fait de la dégradation continue de l'environnement.

222.1.3 - Conception et réalisation de ces digesteurs

C'est le M.R.S.T.D. qui a participé à l'étude, la conception et la réalisation des digesteurs ainsi que les enquêtes socio-économiques avant l'installation.

a) Le digesteur à haute pression (schéma n°15)



Les bénéficiaires de ce type de digesteur sont :

- le site n°5, modèle GTZ à dôme fixe de capacité 15 m³(M.O.) ;
- le site n°7, modèle Shanghai; de capacité 10 m³ (Antsirabe).

L'appellation de ce type de digesteur est très variée selon les formes les caractéristiques et les pays promoteurs de la technologie (Chine, Shanghai, Snathaplant, GTZ à dôme fixe, etc...). Pourtant, ils présentent les mêmes traits caractéristiques suivants :

- construction entièrement en maçonnerie (béton, briques cuites en-duites) ;
- ils sont entièrement enterrés
- stockage des gaz dans la partie supérieure du digesteur lui-même, ce qui réduit énormément les coûts de la construction.

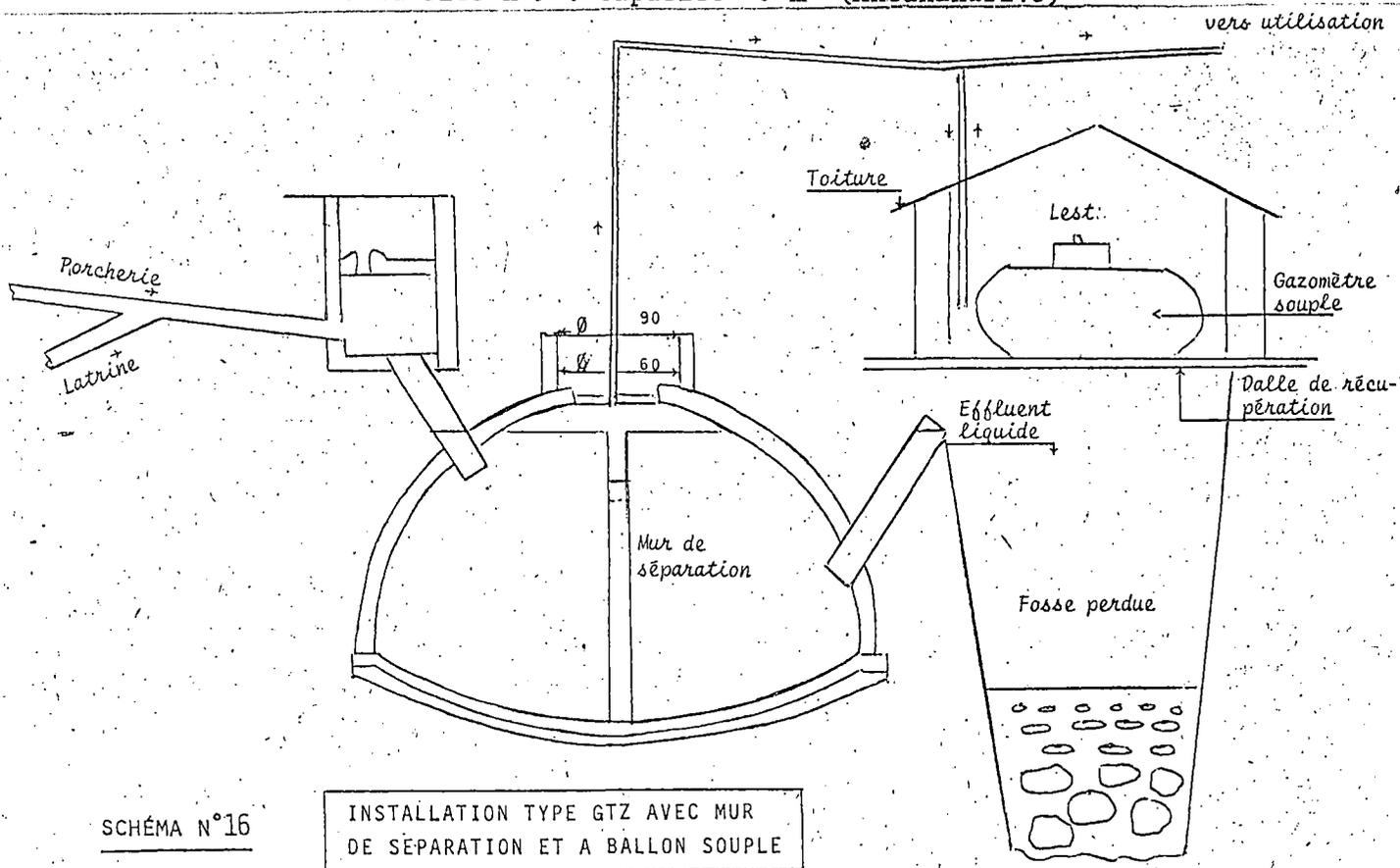
L'inconvénient majeur de ce type d'installation est surtout marqué par la faible capacité de stockage et les variations de pression au fur et à mesure de l'utilisation des gaz stockés.

L'opération la plus délicate dans la construction de tels digesteurs porte sur l'édification du dôme qui doit être bien étanche et apte à supporter des pressions élevées.

b) Digester à basse pression

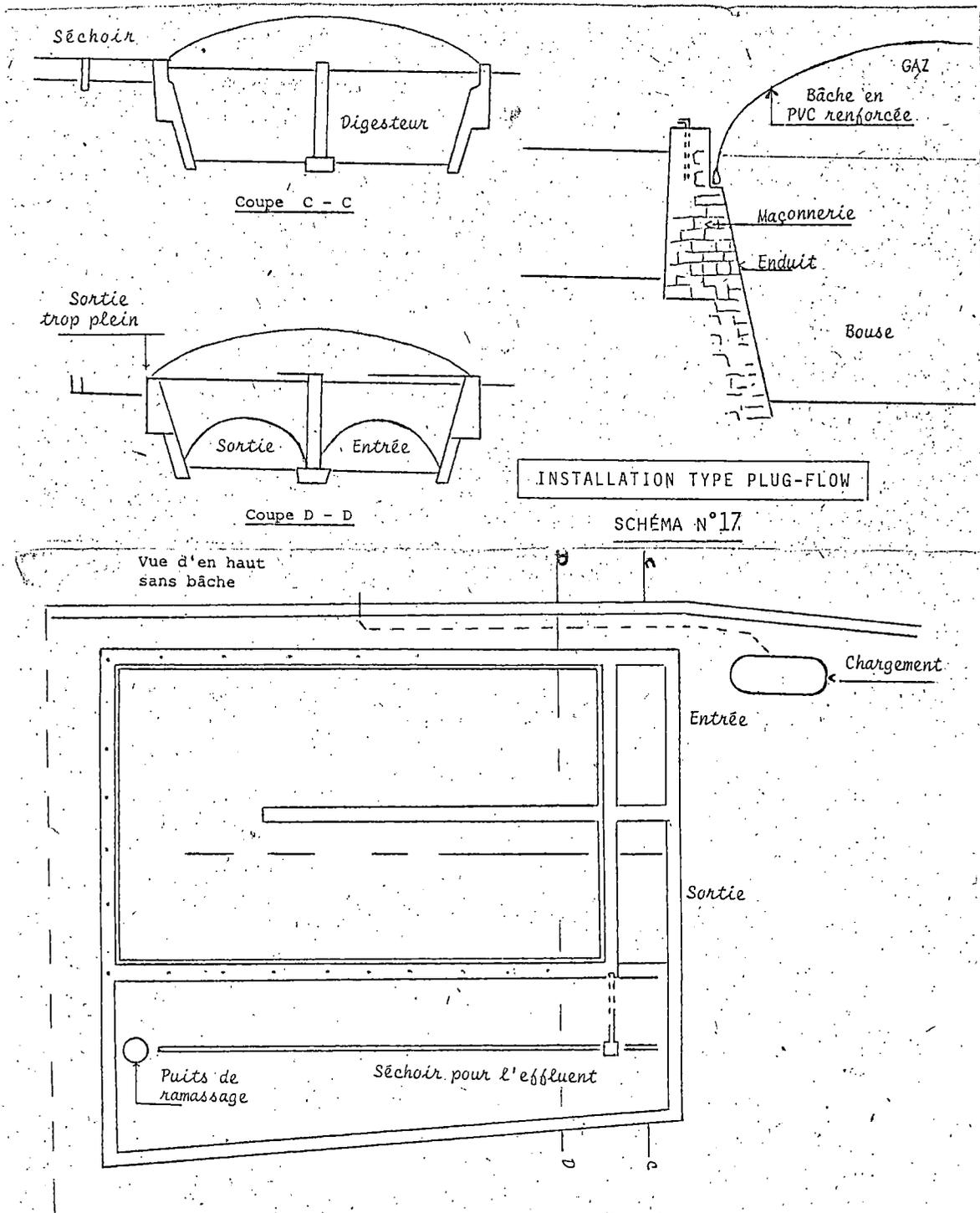
Deux catégories de modèle de ce type sont construites :

- Digester à dôme (schéma n°16) :
 - . au site n°4 : capacité 10 m³ (Moyen-Ouest)
 - . au site n°9 : capacité 8 m³ (Antananarivo)



- Digester Plug-Flow (schéma n°17) appartenant au site n°2 (Moyen-Ouest) avec une capacité de 130 m³ couvert de tissu en bâche.

Le digester à basse pression utilise des ballons en toile bâche souple pour le stockage des gaz refoulés du digesteur.



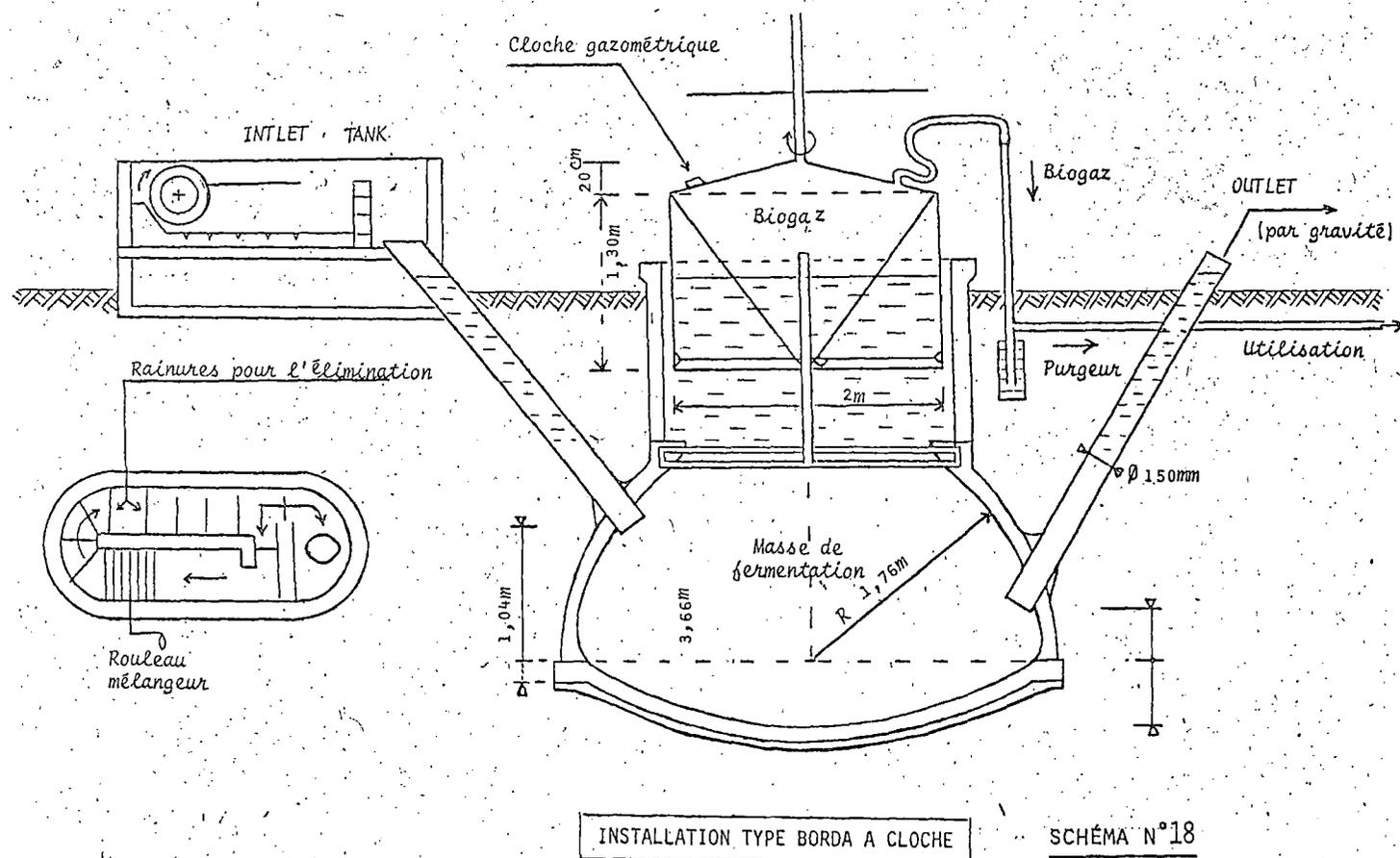
Ces types d'installations ont pour avantages :

- l'augmentation du volume de stockage,
- l'augmentation du rendement des appareils d'utilisation du biogaz (utilisation de gaz à basse pression pour alimenter les brûleurs),
- le réglage des pressions par lestage du ballon selon les appareils utilisés.

L'inconvénient de l'utilisation de ce genre de stockage est la fragilité de la bâche dont la réparation nécessite le recours à un spécialiste (éloignement du site...).

c) Digesteur à moyenne pression (schéma n°18)

Le digesteur à moyenne pression est surtout caractérisé par la présence d'un gazomètre associé au digesteur. C'est une variante du type Indien, à cloche flottante qui a l'avantage d'avoir une pression strictement constante, donc une utilisation meilleure. Malheureusement, le gazomètre augmente considérablement le coût du digesteur.



Les matériaux qui entrent dans la fabrication de cette cloche sont en plastique renforcé de fibre de verre (FRP) dont les avantages sont :

- insensibilité à la corrosion, donc une durée de vie plus longue ;
- construction et réparation réalisable sur place, ou localement.

Toutefois, son prix est assez élevé car il faut importer les matériaux utilisés pour sa fabrication. Pour les régions où l'agressivité du climat est minime on peut utiliser de la tôle plane noire (TPN) enduite de goudron.

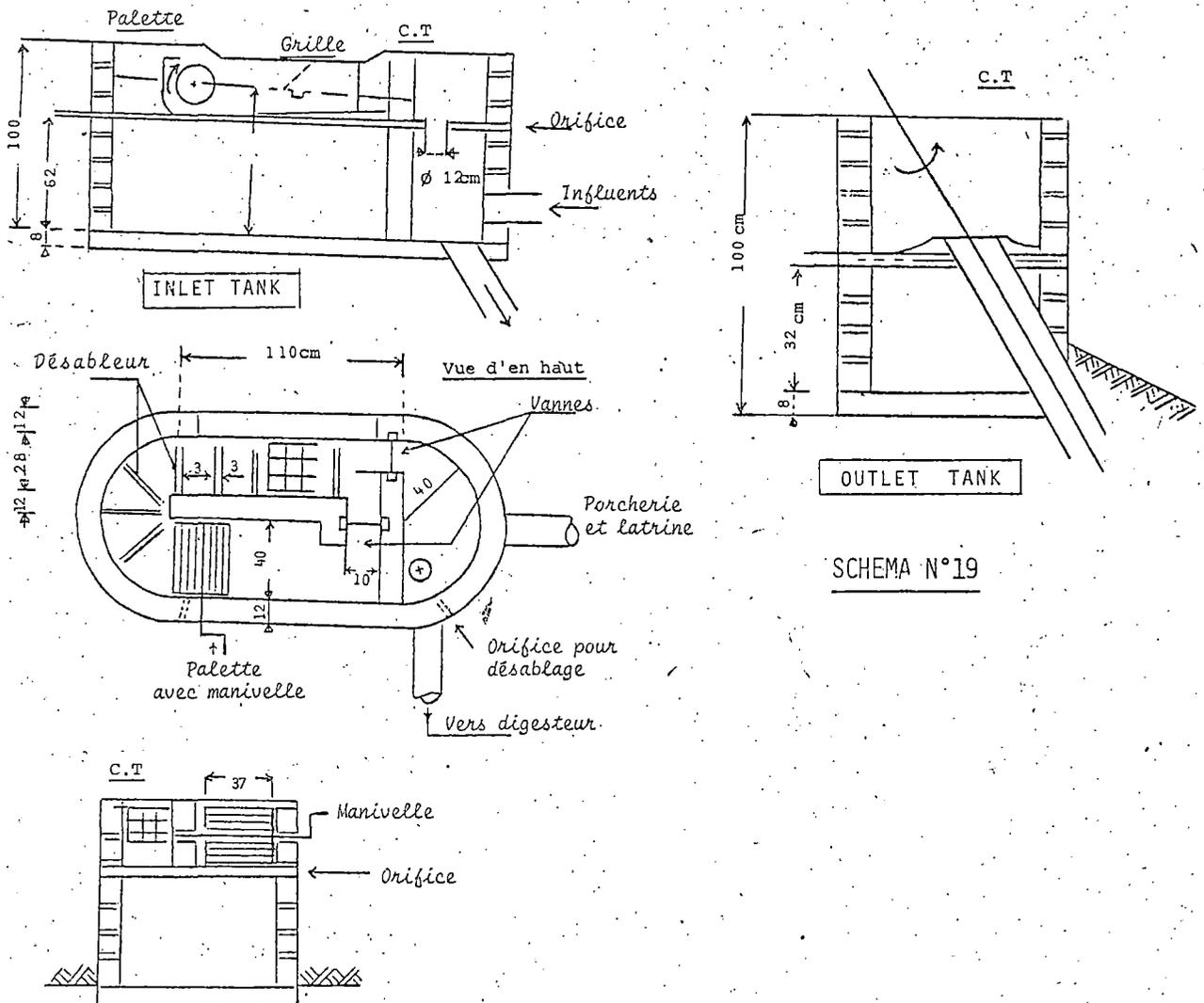
Les sites bénéficiaires de ces modèles sont :

- le site n°1 : installation communautaire; capacité 15 m³ ; bordas à cloche en TPN (Moyen-Ouest) ;

- le site n°3 : installation intégrée. Capacité 15 m³. Bordas à cloche en cloche FRP (Moyen-Ouest);
- le site n°6 : installation de 15 m³ de volume. Bordas à cloche en FRP (Antsirabe);
- le site n°8 : installation de 15 m³ de volume. Bordas à cloche en TPN (Antsirabe).

d) Les fosses annexes (schéma n°19)

Le chargement des digesteurs pose deux problèmes qui nécessitent l'installation des fosses annexes, selon les cas. Ces problèmes sont d'une part dûs au parçage à l'air libre des zébus. Ce qui fait qu'au ramassage des



excréments, une certaine proportion de sable est incorporée au substrat, et pourra nuire au fil du temps, au bon fonctionnement du digesteur. Parallèlement avec une bonne stabulation des animaux, le mélange bouse/pailles peut former une croûte à l'intérieur du digesteur.

D'autre part, le mélange bouse et eau doit être fait dans une proportion bien déterminée. Aussi, pour pallier à ces contraintes, on a conçu les "INLET-TANKS" ou bacs de chargement avec lesquels on élimine le sable et les particules lourdes dans les rainures aménagées au fond, tandis qu'avec une petite grille fixée en travers du bac, on élimine aussi les particules fibreuses. Avec les mêmes matériels, on obtient une homogénéisation du mélange eau-bouse.

Les "OUTLET-TANKS" ou bacs de compensation sont les fosses de déchargement qui jouent un rôle important dans le cas des digesteurs à haute pression, surtout pour la détente de la masse en fermentation lors du stockage des gaz.

Quant aux fosses de stockage des effluents, elles récupèrent les résidus provenant de la fermentation.

e) Système d'amenée de gaz

Deux procédés ont été adoptés pour la conduite du gaz vers les lieux d'utilisation : le procédé aérien et le procédé souterrain.

Dans le premier cas, les tuyauteries utilisées sont en galva ou matériaux souples (Normagaz ou PVC souple) protégées par des gaines (bambou par exemple) à l'extérieur.

Dans le second cas, le plus usité d'ailleurs, le PVC dur a l'avantage d'être à l'abri des agressions mécaniques (rats, enfants...) et naturelles (climat...). De plus, les tuyaux utilisés sont en PVC dur de moindre coût par rapport aux autres tuyaux.

f) Conduite du digesteur

Avant le démarrage de la fermentation, des tests détanchéité à l'eau et au gaz ont été faits et ont donné des résultats positifs. Le démarrage se fait de deux manières :

- soit par remplissage avec du mélange bouse/eau en proportion respective 1/2 en volume. Ici, le démarrage est un peu long ;

- soit par remplissage avec apport de boue de fermentation d'un autre digesteur déjà en marche. Le démarrage, ici, est plus rapide.

L'apport journalier en substrats à ces installations dépend du volume du digesteur et de la quantité de gaz voulu. La nature des substrats pour chaque site est donnée par le tableau du § 221.2,

Le tableau ci-dessous indique la conduite des digesteurs constatée lors de notre passage auprès de ces sites.

TABLEAU N°13 : CONDUITE DES DIGESTEURS

N° Sites		1	3	4	5	9
Volume digesteur		15 m ³	15 m ³	10 m ³	15 m ³	8 m ³
Substrats	Nature	bouse	bouse+lisier	lisier	bouse	lisier
	Quantité	12 seaux	1 à 3 brouettes	2 brouettes	1 brouette	1 brouette
	Périodicité apport	1 fois/jour	1 fois/3 jours	2 fois/jour	1 fois/3 jours	1 fois/jour
Quantité d'eau		160 litres	Eau de lavage porc. 150 l.	100 litres	115 litres	95 litres
Matériel de chargement	Eau	seau	seau	seau	seau	seau
	Substrats	seau	brouette	brouette	brouette	brouette
Matériel de déchargement		seau	seau	trop plein	seau	seau
Utilisation du biogaz		culinaire	culinaire éclairage réfrigérateur	culinaire cuisson aliment porc	culinaire éclairage	culinaire
Utilisation des résidus de fermentation		engrais aliment de poissons	engrais aliment de poissons	engrais	engrais aliment de poissons	fosses perdues

L'unité du site n°2 ne fonctionne pas encore pour le moment à cause de l'absence du matériel (moteur) devant conditionner l'utilisation du biogaz. La production attendue sur cette installation serait aussi minime, car les substrats disponibles surplace ne seront pas suffisants pour les besoins du digesteur déjà construit.

222.2 - Réalisations par le groupe de Consultants fournis par l'E.S.S.Agro.

222.2.1 - Généralités

Les deux installations réalisées par ce 2ème groupe sont de type de digesteur à prix modéré utilisé uniquement à des fins culinaires.

222.2.2. - La présentation succincte des sites

Les sites choisis pour ces deux installations sont ceux de Behenjy et d'Ambatolampy, distant respectivement de 44 km et 68 km d'Antananarivo, sur le R.N.7. Ces régions sont la proie d'une déforestation intense et les prix de combustibles deviennent de plus en plus élevés.

Le climat y est du type tropical, de pluviométrie totale de 1541 mm/an (moyenne sur 36 ans) avec une température moyenne annuelle de 16°2 C. L'année est divisée en deux saisons bien distinctes : l'été, chaud et humide, va de novembre à mars ; tandis que l'hiver, froid et sec, couvre la période de mois d'avril à octobre.

a) Activités agricoles

La culture du riz, avec 55 % de l'ensemble des superficies cultivées, est de loin la principale activité de la population de ces régions. Viennent ensuite les cultures sèches (maïs, manioc, haricot, patate douce, pomme de terre, taro, soja et blé).

La culture d'arbres fruitiers comme les pêchers et les cultures maraîchères dominées par la production des potirons sont particulièrement florissantes dans la région d'Ambatolampy.

b) Activités d'élevage

Outre les petits élevages de basse-cours, le Fivondronana compte beaucoup de cheptels dont :

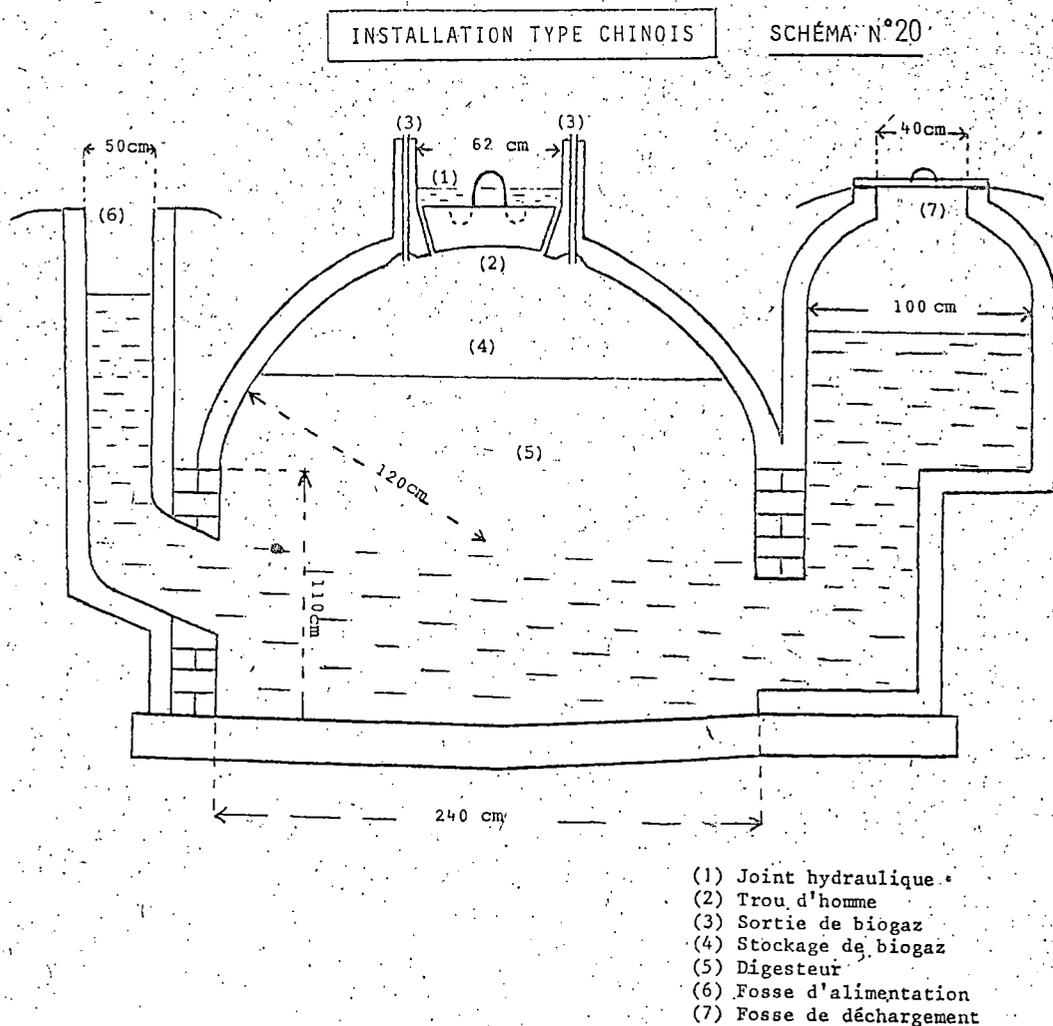
- l'élevage bovin : 24.400 têtes
- l'élevage porcin : 14.895 têtes
- l'élevage équin : 113 têtes.

c) Mode d'approvisionnement en combustibles

L'approvisionnement en combustibles qui sont principalement les bois de chauffe et le charbon, se fait, soit par collecte, soit par achat, soit les deux. Cette région n'a pas non plus échappé à l'exploitation inconsiderée de la forêt comme partout ailleurs.

222.2.3 - Conception et réalisation de ces unités

La conception et la réalisation de ces deux unités sont inspirées sur l'installation de digesteur du type chinois continu d'un volume total de $7,5 \text{ m}^3$, dont $2,5 \text{ m}^3$ pour le stockage de gaz. La construction a été réalisée par deux ouvriers-maçons encadrés par un technicien.



222.2.4 - Conduite de la digestion

Avant toute opération de mise en service, ces deux unités ont subi un test d'étanchéité à l'eau et au gaz. Les résultats ont été positifs.

Le chargement journalier en substrat de chaque digesteur est effectué avec 40 kg de bouse fraîche. Le rendement est de l'ordre de 0,2 à 0,25 m de gaz par mètre cube de digesteur.

222.3 - Coût des installations réalisées par le projet

Le tableau suivant nous donne le coût total des installations (matériaux, outillages, transports, main-d'oeuvre) en Juin 1988.

TABLEAU N° 14 : COÛTS DES DIFFÉRENTS TYPES DE DIGESTEUR

N°s Site	T y p e	Volume	Coût x 10 ³ FMG
1	Bordas à cloche métallique	15 m ³	2.200.-
2	Plug-Flow	130 m ³	9.000.-
3	Bordas à cloche F.R.P.	15 m ³	2.500.-
4	A ballon à bâche	10 m ³	1.650.-
5	G.T.Z. à dôme fixe	15 m ³	1.600.-
6	Bordas à cloche F.R.P.	15 m ³	2.500.-
7	Shanghai	10 m ³	1.400.-
8	Bordas à cloche métallique	15 m ³	2.200.-
9	A ballon à bâche	8 m ³	1.350.-
10	Chinois	7,5 m ³	600.-
11	Chinois	7,5 m ³	600.-

1\$ US = 1.500 FMG

222.4 - Conclusions

L'installation des unités de démonstration du biogaz en milieu rural a été réalisée conformément au projet du Gouvernement Malagasy, tout en apportant aux responsables et techniciens nationaux des expériences pratiques dans ce domaine.

Nous avons cependant pu remarquer quelques inconvénients sur certaines installations déjà existantes.

Mis à part les installations n°4, 10 et 11 tous les autres digesteurs sont apparemment sous-utilisés, car les digesteurs sont trop grands et les utilisateurs n'arrivent pas à consommer toute la production.

Des matériels divers nécessaires à l'utilisation du biogaz n'existent pas encore dans le pays, ce qui explique le non fonctionnement des digesteurs.

Le plus important est enfin, le problème du coût élevé de chaque installation qui fait hésiter les paysans environnants à prendre des décisions pour l'acquisition de digesteur.

Ainsi, face aux inconvénients cités ci-dessus, la vulgarisation d'un type de digesteur, n'utilisant que des matériels disponibles sur le marché local, comme ceux conçus par l'E.S.S. Agro, semble indiquée.

3^{ème} PARTIE

REALISATION ET ANALYSE SOCIO-ECONOMIQUE D'UN DIGESTEUR
VULGARISABLE EN MILIEU RURAL

30 - GÉNÉRALITÉS

Les problèmes rencontrés sur les diverses installations de digesteur dans le milieu rural malgache doivent être résolus si on voulait réellement vulgariser la technologie du biogaz.

Notre réalisation aura donc pour objectif :

- sur le plan économique, au niveau familial, réduire au maximum le coût du digesteur pour que le paysan puisse l'acquérir et surtout constater la différence entre l'utilisation du biogaz à celle du charbon ou du bois de chauffe.

Au niveau national, l'utilisation généralisée du biogaz en milieu rural donnera au pays une indépendance énergétique avec une économie de devises, une limitation de la déforestation notable.

- sur le plan technique, choisir un type de digesteur peu sophistiqué quant à sa conception et son fonctionnement.

Les matériaux et les matériels de construction devraient être disponibles localement et de bonne qualité pour que l'installation ait une durée acceptable.

L'E.S.S.Agronomiques a construit un digesteur de type chinois de 4,5m³ qui a montré une fiabilité et une durabilité satisfaisante : il fonctionne depuis 1982, il a l'avantage d'avoir un coût modéré (150 \$ US en 1982) et sa construction n'avait pas besoin d'une grande technicité.

L'existence d'un digesteur analogue chez un paysan, constituera l'argument décisif auprès des autres paysans identiques pour les inciter à adopter la technologie.

Ainsi, cette troisième partie de notre travail traitera de la réalisation d'un digesteur de démonstration fiable, répondant au besoin de l'utilisateur avec un coût accessible ainsi que des analyses éco-sociales et éco-énergétiques qui s'y rapportent.

31 - DESCRIPTION SUCCINCTE DU SECTEUR D'INSTALLATION

La nécessité d'assurer, le suivi de la bonne marche du digesteur

et la réalisation des analyses économiques une fois l'installation terminée nous a obligé à choisir une région dans un milieu rural aux environs de Tananarive, à AMBOHIMANGAKELY.

Cette localité à 12 km de la Capitale, sur la R.N. 2 est située sur l'axe Tananarive - Côte-Est, où le déboisement est intensif et où aucune installation de biogaz n'a été encore mise en place.

311 - LE CLIMAT

On distingue deux saisons bien marquées :

- une hivernale froide et sèche d'avril à septembre. La température moyenne de 7-8°C peut descendre à 2°C ;

- une estivale chaude et humide d'octobre à mars, avec une température moyenne de 18 à 20°C et maximum de 30°C.

312 - LES SOLS

Deux classes de sols dominant dans la région :

- les sols hydromorphes des bas-fonds réservés à la riziculture et aux cultures de contre-saison ;

- les sols ferrallitiques des tanety*, pauvres en matière organique et peu fertiles.

313 - Les activités agricoles

Les bas-fonds, 40 % des surfaces cultivées, ont un rendement en riz de 800 kg à 1,5 t/ha en méthode traditionnelle et de 3 à 5 t/ha en riziculture améliorée.

Les cultures de contre-saison sur ces bas-fonds sont très pratiquées dans la région : la pomme de terre avec un rendement moyen de 20 t/ha, ensuite le haricot et tout récemment le tritical qui s'adapte très bien dans cette région avec un rendement moyen de 3,5 t/ha.

* *Tanety* : sols des collines.

Les cultures sur tanety ou cultures sèches : manioc, maïs, haricot, patate douce, voandzea ,représentent environ 35 % des surfaces cultivées.

Depuis près de 3 ans, la culture du manioc était l'objet d'une action de vulgarisation dont la finalité visée est un rendement de 30 - 35 t/ha.

Enfin, les diverses cultures maraîchères sont dominées par les choux et les choux-fleurs qui occupent 20 % des surfaces cultivées et sont surtout destinées à ravitailler les marchés d'Antananarivo.

Les 5 % restantes sont destinées à des cultures diverses tels que les arbres fruitiers, caféier...

TABLEAU N° 15 : IMPORTANCE DES PRINCIPALES CULTURES
A AMBOHIMANGAKELY*

Terrain	Type de cult.	Surface (ha)	Rendement (t/ha)
Bas-fonds	Riz	205,26	Cult.trad.:1,5 Cult.amél.:3 - 5
	Haricot	100	
	Pomme de t.	20	20
	Tritical	7	3,5
Tanety	Manioc	200	30 - 35
	Maïs	30	1,2

* Source : Service de la Vulgarisation en 1988.

314 - LES ACTIVITES D'ELEVAGE

Pour le paysan malgache des Hauts-Plateaux, l'élevage est indissociable de l'agriculture, Le secteur d'AMBOHIMANGAKELY possède un centre d'insémination artificielle et de vaccination. Malheureusement, l'insémination n'intéresse que les éleveurs de boeufs de races frison et normande.

Par ordre d'importance, voici l'effectif*** des espèces d'animaux élevés dans la région :

- volaille : 24.526
- porcins : 1.824
- bovins : 320
- moutons : 49

*** Chiffre recensé par le Centre de Vaccination - Janvier 1988.

315 - LES AUTRES ACTIVITES

Il y a des paysans-artisans et la région est productrice de "Ranomena"* utilisé pour soulager les maux de tête, la grippe, les maux de ventre et pour servir de lotion de massage.

On obtient ce médicament en distillant à sec des os de boeufs, dégagés de toute fibre musculaire, dans une marmite en terre cuite : le produit obtenu est une eau de couleur rouge, d'où son nom.

32 - RÉALISATION DE L'INSTALLATION

Les sites répondant aux critères que nous avons préétablis pour l'installation de digesteur dans le secteur choisi sont nombreux.

Nous avons fixé notre choix sur le site le plus favorable au bon fonctionnement du futur digesteur car notre objectif est la réussite de la première installation pour qu'elle fasse tâche d'huile.

321 - CONCEPTION DU DIGESTEUR

C'est un digesteur "type Chinois" de capacité de 7,5 m³ utilisé pour des besoins culinaires de 3 repas/jour d'une famille de 6 à 8 personnes (Schéma n°21).

322 - LES OPERATIONS DE REALISATION

322.1 - Excavation

L'emplacement de l'installation a été choisi dans un terrain ferme non loin du centre d'utilisation. Le puits a un diamètre de 2,85 m avec les fosses annexes et dont la profondeur est de 2,30 m.

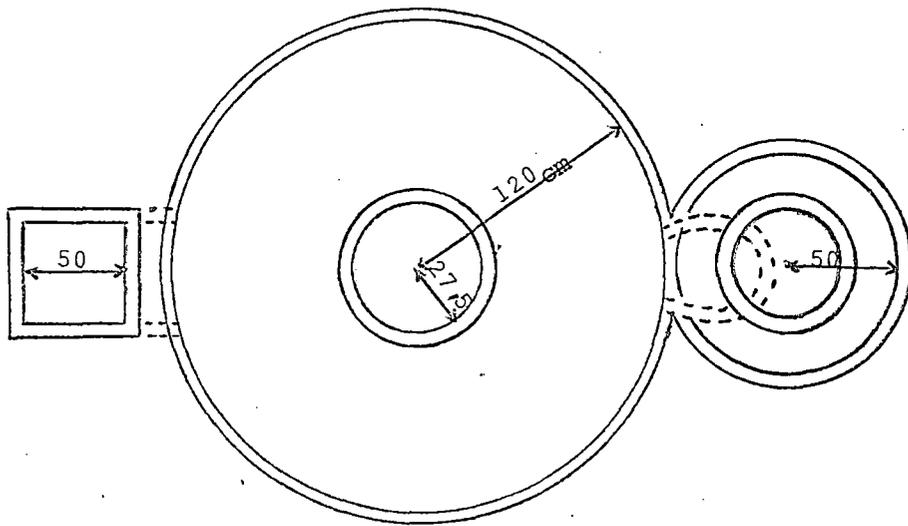
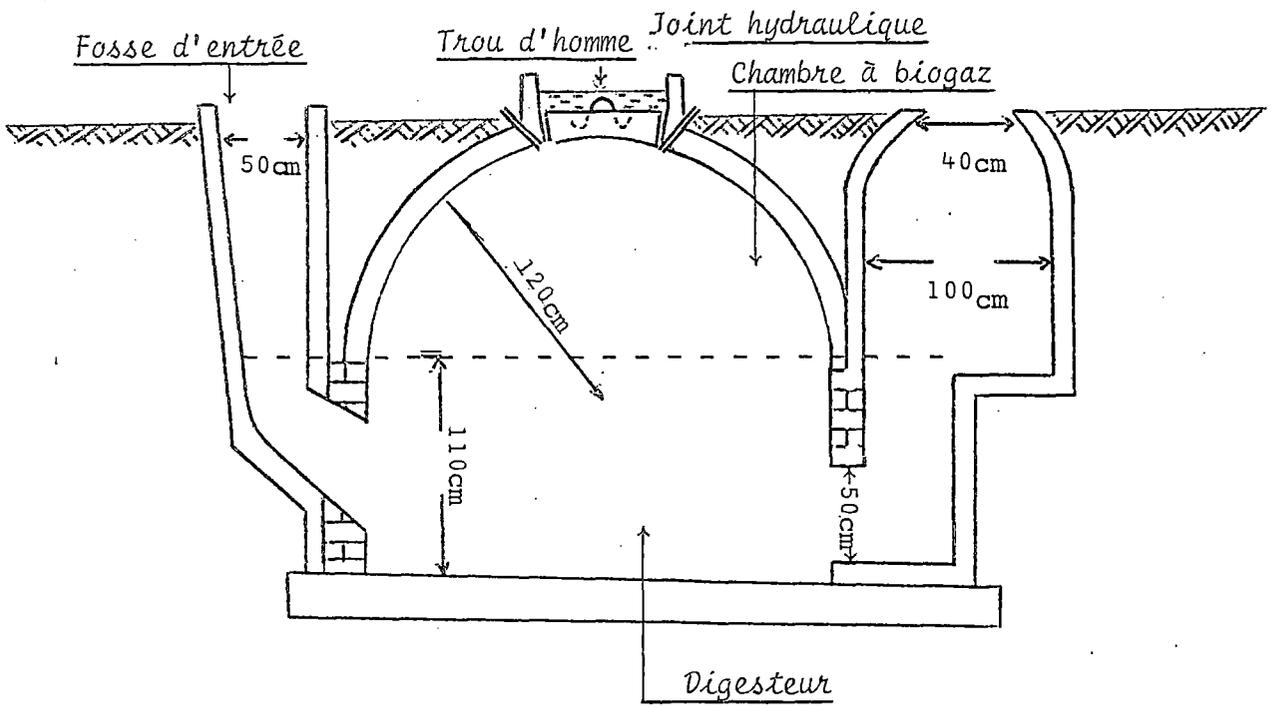
322.2 - Bétonnage du fond

Après avoir bien aplani le sol du fond du puits, on l'a recouvert de béton, un mélange sable, chaux, ciment, gravillons qu'on jette du sommet du puits pour qu'il y ait entassement sur une épaisseur de 15 cm et, est pilonné pour qu'il prenne bien.

322.3 - Les parois

Les parois, un mur 22 sont élevées jusqu'à 1,10 m de hauteur, de

* Textuellement "eau rouge" : produit de distillation des os, riche en ammoniac.



INSTALLATION TYPE CHINOIS
AMBOHIMANGAKELY

SCHÉMA N°21



Photo n°1

Installation de biogaz
à AMBOHIMANGAKELY
(Cliché de l'Auteur)

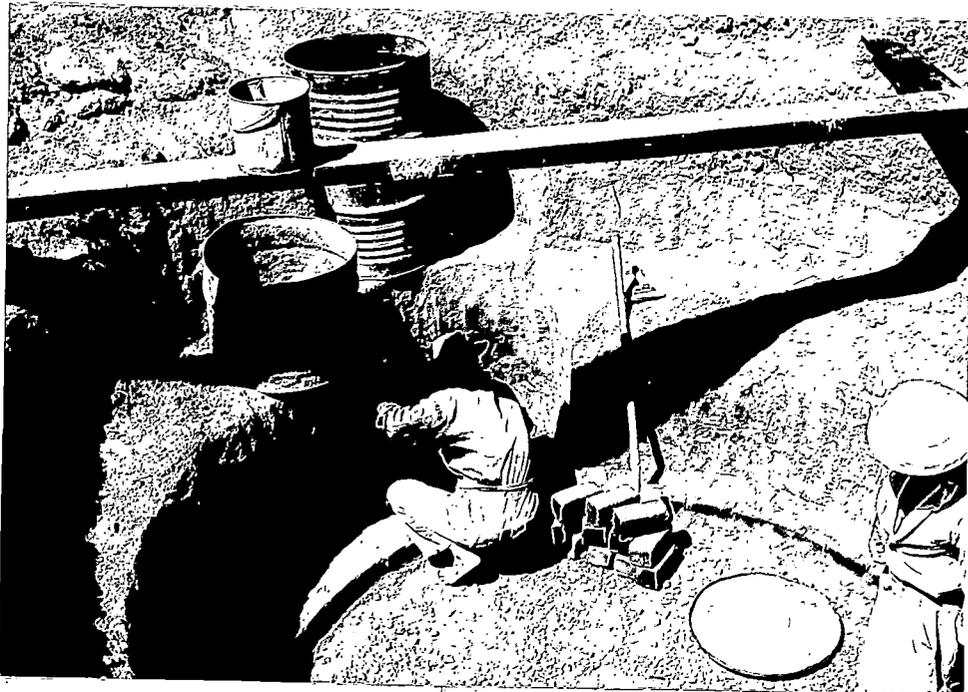


Photo n°2

Travaux des parois
(Cliché de l'Auteur)

la manière suivante : les briques sont placées de façon à ce que chaque rangée soit terminée à ses exactes dimensions avant de passer à la rangée supérieure. Chaque brique doit tenir solidement à son emplacement. Les matériaux servant de liant entre les espaces et le bas de chaque brique est un mortier de sable, ciment. Les trous pour les compartiments d'entrée et de sortie sont laissés vides en utilisant un coffrage.

322.4 - La voûte

C'est le point essentiel dans la construction du digesteur. La voûte, un mur 11 est construit sans support et l'inclinaison suit un guide en fer rond préalablement recourbé. La première brique posée sera retenue par un crochet, de même que la seconde et la troisième qui sera enlevée, retiendra la quatrième et ainsi de suite jusqu'à la dernière brique de la même rangée qu'il faut terminer avant de remonter à la rangée supérieure. Le mortier sable, ciment, utilisé pour la voûte est plus riche en ciment que celui du mur des parois, et ce mélange ne doit pas être ni trop humide ni trop sec.

322.5 - Le travail des fosses de compartiments

La fosse d'entrée et celle de la sortie de la matière sont diamétralement opposées. La pose des briques est la même que celle de la voûte. La fosse de sortie a un diamètre plus grand dans sa partie supérieure et servira de sécurité du digesteur au cas où il y aura une surpression et pour éviter aussi le débordement de la matière.

322.6 - Les enduits

Avant de couvrir du mélange ciment, sable fin sur 2 cm d'épaisseur toute la surface intérieure du digesteur, les compartiments y compris, la paroi interne de la voûte est tapissée de grillage poulailler pour servir de maille. La première couche bien sèche, on remet une deuxième couche qui est cette fois-ci un mélange chaux, ciment et sable fin sur 2 cm d'épaisseur. Cette dernière séchée, la troisième couche sera composée seulement du ciment pur pour que l'intérieur du digesteur présente une forme lisse.

322.7 - Le couvercle

Le couvercle est fait en béton armé. Le mélange ciment, sable est tassé dans une moule faite dans le sol, de forme cônica et doit être bien juste au trou d'homme du digesteur. Lors du séchage, il ne faut pas le laisser



Photo n°3

Construction du dôme
(Cliché de l'Auteur)



Photo n°4

Le couvercle
(Cliché de l'Auteur)

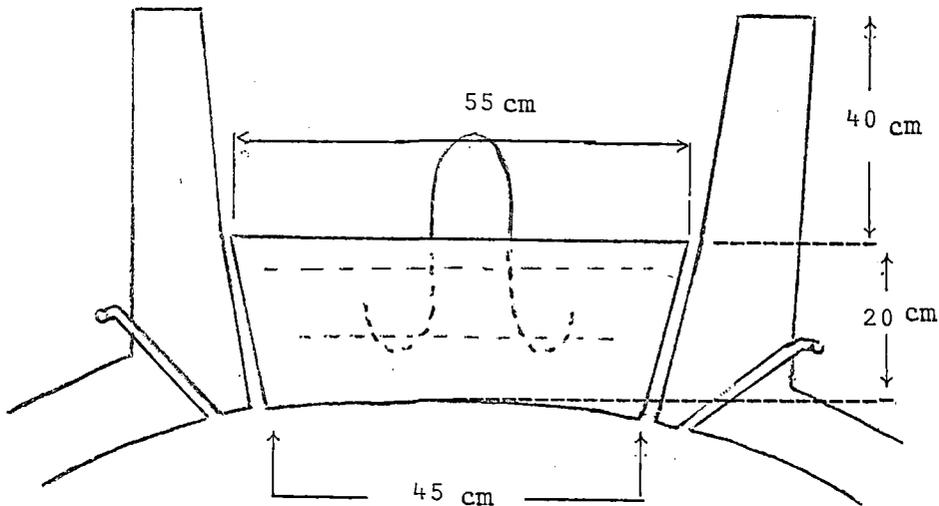


Photo n°5

Installation des tuyaux
d'amenée
(Cliché de l'Auteur)

au soleil, sinon il se fend . Quand le béton est bien pris, on le recouvre d'une couche de ciment pur sur une épaisseur de 2 cm.

SCHEMA N°22 : LE COUVERCLE



322.8 - Les opérations annexes

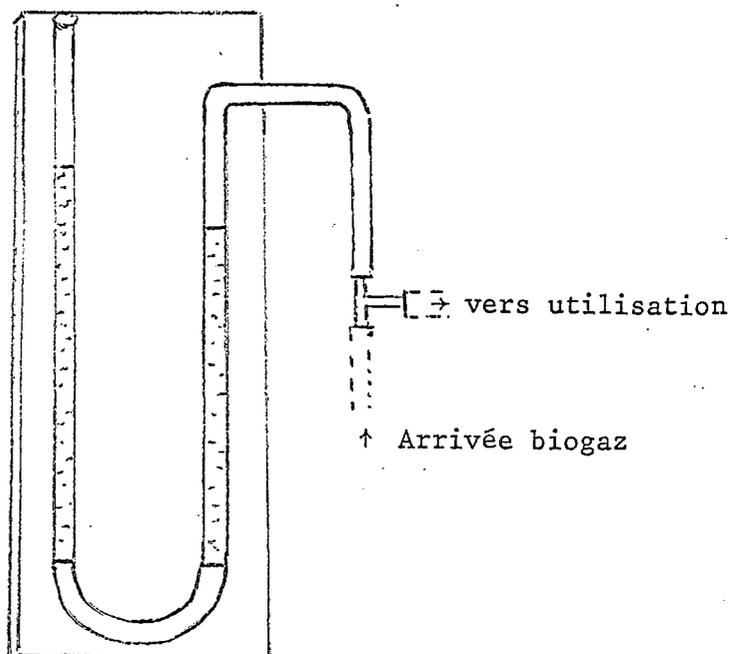
1°) Les tuyaux pour acheminer le biogaz :

Deux tuyaux en galva sont placés sur la bordure du trou d'homme pour l'évacuation du biogaz, ils sont réunis par un tuyau en T à l'extérieur par une seule conduite. Dans la partie la plus basse du conduit, un tube en U rempli d'eau est placé servant de purgeur ou de piège à eau.

2°) Le manomètre :

Placé devant le foyer, pour être bien visible par l'utilisateur, entre le tuyau venant de l'extérieur et le foyer, le manomètre est fait d'un tube gradué de récupération, rempli d'eau coloré jusqu'à un certain niveau pour vérifier la pression du biogaz dans le digesteur.

SCHEMA N°23 : LE MANOMETRE



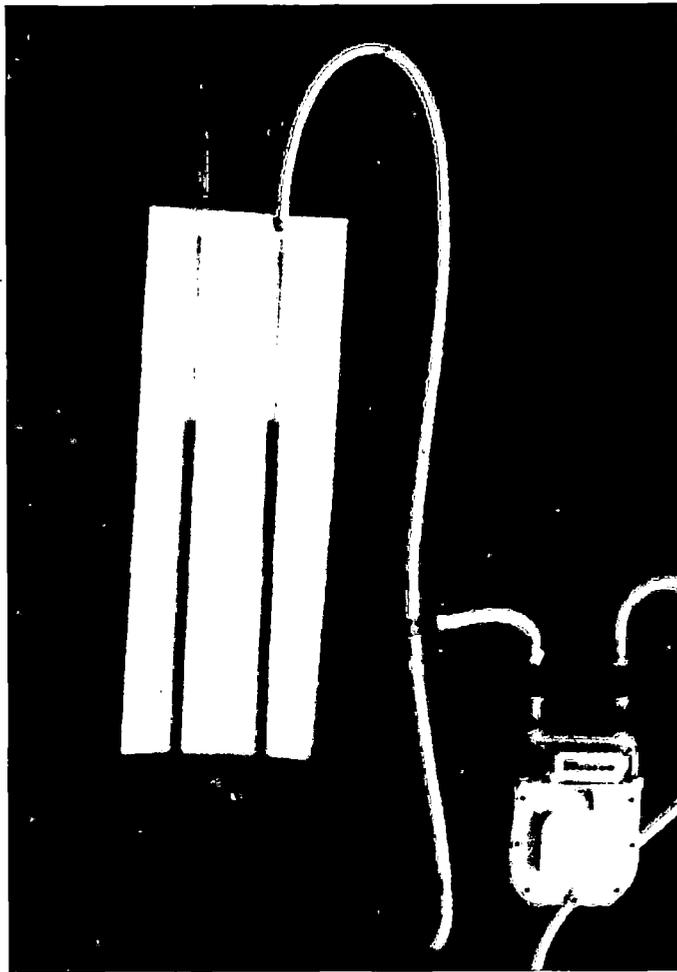


Photo n°6 : Le manomètre (Cliché de l'Auteur)

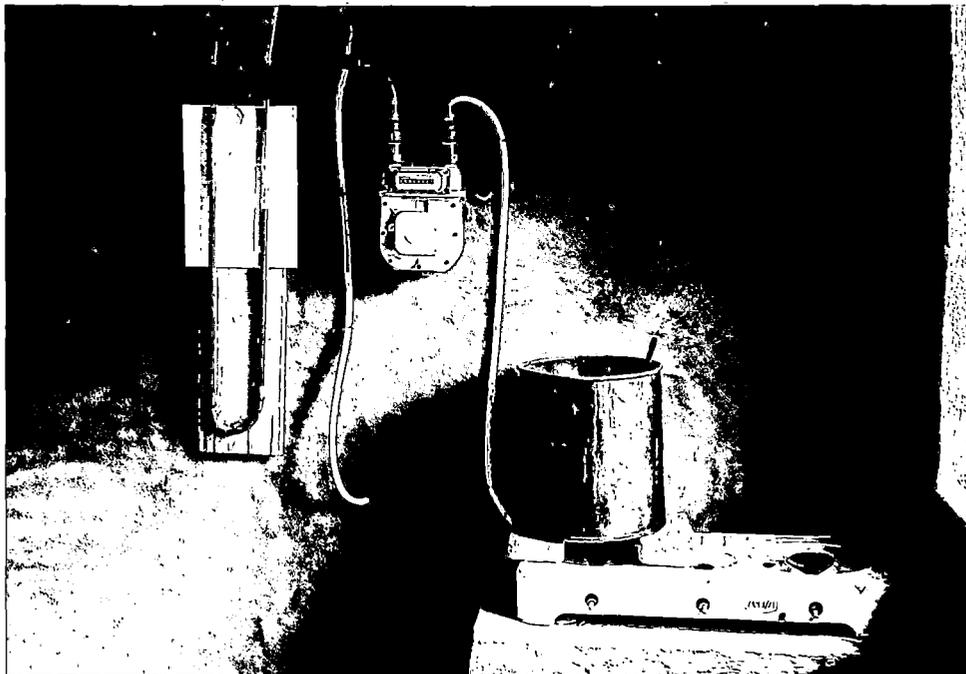
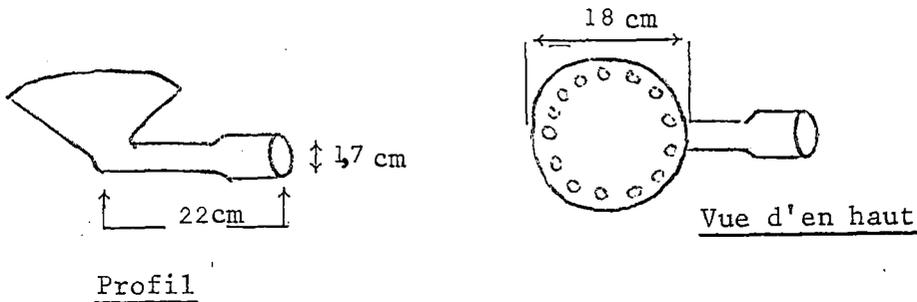


Photo n°7 : Le foyer (Cliché de l'Auteur)

3°) Le foyer :

C'est une cuisinière à gaz de récupération remise en état, en bricolant 2 brûleurs en tôle de 0,5 mm d'épaisseur à la forme d'un entonnoir dont la base est coudée de façon à recevoir les gaz provenant du robinet.

SCHEMA N°24 : LE BRULEUR

Profil

4°) Test d'étanchéité :

Une semaine après la finition des installations, le test a été effectué. Pour ce faire, le digesteur a été rempli d'eau pour le mouiller jusqu'à saturation et on a fermé le trou d'homme. Puis une quantité d'eau est versée dans la fosse d'entrée pour créer une certaine pression à l'intérieur du digesteur.

Malheureusement le premier test n'a pas réussi car la pression donnée par le manomètre a diminué, pour revenir à zéro. Après les recherches effectuées sur les causes de la fuite, on a constaté que :

- la fosse de sortie, dont le fond de sa partie supérieure où le diamètre est plus large présentait un détachement des enduits dû probablement au premier chargement d'eau effectué dans cette fosse, alors que ces enduits n'étaient pas encore bien secs. L'eau passait par ce manquant de sorte qu'il y ait diminution du volume d'eau à l'intérieur du digesteur, d'où la diminution de pression.

- de plus, les raccords entre les tuyaux d'évacuation du biogaz et la voûte ont présenté des fuites qui ont permis aux gaz de s'échapper.

Pour remédier à ces inconvénients, on a recouvert d'une 4ème couche de ciment pur la voûte et les compartiments et c'est ainsi que le second test a réussi.

323 - COUT DU DIGESTEUR

L'installation a été faite en Octobre 1989 et les prix des matériels et matériaux se rapportent à cette date. Le tableau suivant montre la nature, le prix et la quantité utilisée de ces matériels et matériaux.

TABLEAU N°16 : COUTS DES MATERIELS ET DES MATERIAUX (FMG)*

Désignation	Prix unit.(FMG) (trans.compris)	Prix total par- tiel (FMG)
1 - Outillages :		
2 rouleaux de corde	900.-	1.800.-
2 unités : bêche + manche	2.000.-	4.000.-
2 " : pelle + manche	2.600.-	5.200.-
1 " : bidon de 30 l	5.500.-	5.500.-
2 - Matériaux :		
14 sacs ciment "Amboanio" (50 kg)	15.000.-	210.000.-
2 sacs chaux "Soabe" (50 kg)	11.300.-	22.600.-
2,5 m ³ sable de rivière	3.540.-	8.850.-
1,06 m ³ gravillons	7.960.-	8.438.-
1 kg de pointe de 6 cm	2.800.-	2.800.-
1520 unités:brique en terre cuite	25.-	38.000.-
10 m : grillage poulailler	2.685.-	26.850.-
2 unités tuyau galva 12/17	19.315.-	36.630.-
1 unité : fer rond Ø 8	3.670.-	3.670.-
5 m : tuyau "normagaz"	5.960.-	29.800.-
Total général	404.138.-

* 1\$ US = 1.615 FMG (en Octobre 1989)

Le temps réel de travail pour la construction du digesteur a été de 170 heures. La main-d'oeuvre, 2 ouvriers-maçons non spécialisés a coûté 120.000 FMG.

33 - GESTION DU DIGESTEUR ET PRODUCTION

331 - LA MATIERE PREMIERE

Divers substrats tels que : déchets végétaux, jacinthe d'eau ont été expérimentés à l'E.S.S.A. pour la production de biogaz mais seule l'utilisation des déchets animaux a été retenu. Ces derniers sont abondants en milieu rural et leur utilisation pour le biogaz n'entre pas en concurrence avec leur utilisation principale par les paysans.

Aussi, le substrat utilisé dans notre installation a été uniquement de la bouse de vache diluée à l'eau avec 10% de matière sèche. Le taux de matière sèche de la bouse récoltée dans la ferme était de 20%. Pour le premier chargement on a apporté 2,5 m³ de bouse et le même volume d'eau. L'apport journalier est de 40 litres de bouse avec le même volume d'eau.

La fermentation a été amorcée avec 180 l de matière qui a subi une préfermentation.

332 - LE RENDEMENT

La fermentation a donné après 9 jours de gaz inflammable dont la quantité augmente régulièrement. Cette production en biogaz est portée sur le tableau suivant :

TABLEAU N°17 : PRODUCTION DE BIOGAZ

	Quantité (1) (moyenne/semaine)	Taux de CO ₂
1 ^è semaine	7 x 300ℓ = 2100 ℓ	26 %
2 ^è semaine	7 x 600ℓ = 4200 ℓ	30 %
3 ^è semaine	7 x 1200ℓ = 8400 ℓ	38 %

Ce rendement encore faible augmentera sûrement au fil des jours car la production minimale estimée par expérience est de 0,2 m³/m³ de digesteur/jour. Le taux de CO₂ se stabilise à 38 %.

332.1 - Utilisation du biogaz

Au début, le biogaz produit est utilisé pour la cuisson des repas de midi de 6 personnes seulement ; mais le propriétaire commence maintenant à apporter du substrat dans le digesteur, ce qui ne manquera pas d'augmenter la production.

332.2 - Débit

Le débit du digesteur est de 13 litres/10 secondes quand la pression dépasse de 6 cm d'eau au manomètre, débit qui diminue lorsque la pression est faible. Par contre, les 2 brûleurs débitent respectivement au maximum 10 litres/10 secondes et 9 litres/10 secondes et au minimum 2 litres/10 secondes et 1,5 litres/10 s. Ce débit peut être réglé avec le robinet.

333 - UTILISATION DES EFFLUENTS

Les effluents sont stockés dans une fosse aménagée principalement à cette fin à côté du digesteur. Ces sous-produits de la fermentation méthanique sont des fertilisants organiques riches en N.P.K. Une part de cet effluent sera aussi utilisée comme nourriture de poissons des bassins piscicoles du fermier.

34 - LES AVANTAGES TANGIBLES

341 - ENQUETES SOCIO-ECONOMIQUES "SANS DIGESTEUR"

Cette enquête a pour but de calculer les coûts moyens de cuisson des repas familiaux dans la région où le digesteur a été installé. Pour cela, nous avons dirigé notre enquête sur des familles de 6 à 8 personnes n'utilisant que du bois de chauffe et du charbon comme combustible.

TABLEAU N°18 : COUT MOYEN DE CUISSON AVEC LE BOIS DE CHAUFFE

N° de famille	1	2	3	4	5	6	\bar{x}
Effectif	7	6	8	8	7	6	
Mode d'acquisition de combustible	Collecte et achat	-id-	-id-	-id-	-id-	achat	
Quantité consommée par jour (kg)	10kg	10kg	8kg	10kg	6kg	10kg	9kg
Coût d'achat (FMG)	150.-	200.-	100.-	150.-	100.-	250.-	158.-
Temps d'acquisition (mn)	45	60	90	60	70	30	59
Coût d'acquisition	90.-	120.-	180.-	120.-	140.-	60.-	118.-
Temps de cuisson (mn)*	205	185	170	210	190	195	192,5
Coût du temps de cuisson (FMG)	410.-	370.-	340.-	420.-	380.-	390.-	385.-
Coût de cuisson journalier (FMG)	650.-	690.-	620.-	690.-	620.-	700.-	661.-

* temps de cuisson = temps réel de cuisson + les autres préparations (allumage...)

De ce tableau, nous pouvons tirer que le coût moyen de cuisson des repas journaliers pour 6 à 8 personnes est de 661 FMG avec un coût minimum de 620 FMG.

Si on considère que le paysan doit nettoyer les marmites, enlever les cendres du foyer, etc... il faudrait au moins 15 minutes de temps pour le faire. Ce qui donne un coût minimum de 650 FMG/jour.

TABLEAU N°19 : COUT MOYEN DE CUISSON AVEC LE CHARBON

N° de famille	1	2	3	4	5	6	\bar{x}
Effectif	8	6	8	8	6	8	
Mode d'acquisition	achat	achat	achat	achat	achat	achat	
Quantité consommée (kg)	4	5	5	5	4	5	4,50
Unité d'acquisition	tas	sac	sac	sac	tas	sac	
Coût d'achat (FMG)	250.-	300.-	300.-	300.-	250.-	300.-	283.-
Temps d'acquisition (mn)	3	10	10	2	2	30	9'30"
Coût d'acquisition (FMG)	6.-	20.-	20.-	4.-	4.-	60.-	19.-
Temps de cuisson (mn)	170	180	190	175	155	175	174
Coût de temps de cuisson (FMG)	340.-	360.-	380.-	350.-	310.-	350.-	348.-
Coût journalier (FMG)	596.-	680.-	700.-	654.-	564.-	710.-	650.-

D'après ce tableau, le coût moyen pour 6 - 8 personnes utilisant le charbon de bois comme combustible est 650 FMG avec un coût minimum de 564 FMG.

Dans les deux cas, le coût de temps est estimé à 2 FMG la minute, soit 840 FMG/7 heures le salaire journalier d'un paysan.

342 - ENQUETE SOCIO-ECONOMIQUE "AVEC DIGESTEUR"

Elle a été faite uniquement sur le site d'installation et ceci pour le coût de cuisson des repas pour 6 personnes.

TABLEAU N°20 : COUT DE CUISSON AU BIOGAZ

Opération	Biogaz	Coût (FMG)
Quant. du biogaz	1,2 m ³	143,60
Mode d'acquisit.	prépar. familiale sur place	-
Temps d'acquisit. - puisage d'eau	20 mn	40.-
- chargement et déchargement	identiques au chargement, décharge, nettoyage de l'étable, préparation du fumier donc à ne pas compter	
Temps de cuisson	56 mn	112.-
		295,60

Le coût journalier du biogaz ne varie pas en fonction de la quantité produite, du fait que ce coût est déduit du coût du digesteur qui a une durée d'installation estimée à 10 ans.

343 - CONCLUSIONS SUR LES AVANTAGES TANGIBLES

TABLEAU N°21 : BENEFICES PAR L'UTILISATION DU BIOGAZ

Nature des coûts	Nature du combustible			Bénéfice dû au biogaz par rapport au :	
	Bois de chauffe	Charbon	Biogaz	Bois de chauffe	Charbon
Coût d'achat de combust. (FMG)	158.-	283.-	143,60	+ 14,40	+139,40
Coût de temps d'acquisition (FMG)	118.-	19.-	40.-	+ 78.-	- 21.-
Coût de temps de cuisson (FMG)	385.-	348.-	112.-	+ 273.-	+236.-
				365,40	354,40

Il en ressort de ce tableau qu'il y a une diminution nette du coût de cuisson en utilisant le biogaz par rapport à d'autres combustibles même si on prend les coûts minimum de 620 FMG et 564 FMG respectivement pour le bois de chauffe et le charbon.

Nous pouvons donc conclure que :

- l'utilisation de biogaz permet d'épargner de l'argent liquide (pas de dépense de combustible), du fait que la somme de 143,60 FMG pour le coût d'achat du biogaz est une dépense qui ne sort pas journallement du ménage.

- la famille disposera d'une MBA* de (365,40 + 143,60) FMG/jour ou 15.270 FMG/mois ou 183.240 FMG/an si elle avait utilisé le bois de chauffe avant ou une MBA* (354,40 - 143,60) FMG/jour ou 14.940 FMG/mois ou 179.280 FMG/an si elle avait utilisé le charbon.

- le capital investit sera récupéré en moins de 4 ans alors que le digesteur a une durée de vie de 10 ans.

35 - LES AVANTAGES INTANGIBLES

L'utilisation du biogaz entraîne inéluctablement une amélioration de la qualité de vie de ses utilisateurs car le biogaz offre une plus grande commodité d'utilisation ainsi qu'une propreté meilleure de la cuisine.

En plus de la fièreté du propriétaire, le plus important réside sur le plan national d'une meilleure utilisation de la biomasse pour produire de l'énergie.

36 - ANALYSE ÉCO-ÉNERGÉTIQUE

Elle a pour objet de calculer en énergie le rendement de l'utilisation du biogaz par comparaison avec les autres combustibles couramment utilisés : bois de chauffe, charbon.

361 - DONNEES EXPERIMENTALES

Dans cette expérience nous avons fait évaporer 0,250 litres d'eau avec divers combustibles dans les mêmes conditions. Les résultats obtenus sont portés sur le tableau suivant :

* MBA : Marge Brute d'Autofinancement.

TABLEAU N°22 : RESULTATS D'EXPERIENCES

Echantillon	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Source d'énergie	Charbon	id	id	Bois de chauffe	id	id	Biogaz	id	id
Quantité de combustible pour évaporer 0,250 l	130 g	100 g	130 g	390 g	370 g	330 g	146 l	137 l	142 l
Moyenne	120 g			363,33 g			141,67 l		

362 - CALCUL DE BENEFICE ENERGETIQUE

Rappelons que le pouvoir calorifique inférieur de ces combustibles sont :

- bois de chauffe : 4300 Kcal/kg
- charbon de bois : 6600 Kcal/kg
- biogaz : 5130 Kcal/m³.

TABLEAU N°23 : COMPARAISON D'ENERGIE CONSOMMEE

Nature	Bois de chauffe	Charbon de bois	Biogaz
Quantité de combustible pour évaporer 0,250 l d'eau	363,33 g	120 g	141,67 l
Equivalence en énergie	1562,32 Kcal	792 Kcal	726,77 Kcal
Gain en énergie par le biogaz sur :	835,55 Kcal	65,23 Kcal	0

D'après ce tableau, il en ressort que :

- il y a beaucoup d'énergie perdu en utilisant le bois de chauffe comme combustible dû fait qu'il n'y a pas d'appareil adéquat qui rentabilise son utilisation ;

- même si le charbon gaspille moins que le bois de chauffe, la différence de 65,23 Kcal par rapport au biogaz n'est pas à négliger.

363 - CONCLUSION

Cette analyse succincte en valeur énergétique de combustibles permet de conclure que l'utilisation du biogaz permet

- d'économiser un surplus d'énergie de l'ordre de 8.278.920 Kcal/an/famille de 8 personnes qui utilise en moyenne 3,6 tonnes* de bois de chauffe par an ;
- de préserver 7,2 tonnes*** de forêts, ou de l'ordre de 4.892.250 Kcal/an/famille de 8 personnes utilisant en moyenne 1,85 tonnes** de charbon de bois/an ;
- de préserver 6 tonnes*** de bois de chauffe ou encore 12 tonnes*** de forêts.

37 - CONCLUSION

Cette troisième partie de notre travail a montré la faisabilité d'installation de ce type de digesteur en milieu rural.

Les besoins monétaires maximum de 525.000 FMG (environ 310 \$ US) peuvent être réduits sensiblement par le fait que :

- les briques qui sont en quantité limitée sont parfaitement réalisables sur place par les paysans eux-mêmes ;
- les rivières dans les bas-fonds ont un lit de sable en quantité suffisante et le transport peut être gratuit si le propriétaire possède une charrette ;
- enfin, la main-d'oeuvre pour la construction sera gratuite si c'est le propriétaire lui-même, aidé des membres de sa famille, qui fera l'installation ; ce travail est à la portée des paysans locaux.

Même avec ce coût maximum de 525.000 FMG, le digesteur sera amorti en 4 ans au maximum alors que sa durée d'utilisation est supérieure à 10 ans.

De même suivant l'analyse éco-énergétique effectuée, le gain en énergie obtenu sur l'utilisation du biogaz est suffisamment important pour empêcher l'exploitation inconsidérée de la forêt qui se raréfie.

* Une famille de 8 personnes utilise en moyenne 10 kg de bois de chauffe/jour ou 5 kg de charbon de bois/jour.

** Une quantité de biomasse de forêt donne 50% en bois de chauffe, et ce dernier donne 30% en charbon de bois.

4^eme PARTIE

CONCLUSION GENERALE

L'expansion de la technologie du biogaz en milieu rural malgache n'est plus irréalisable et ne restera plus le privilège d'une catégorie précise d'utilisateurs.

Son développement sera renforcé si on accorde aux paysans une facilité bancaire* pour l'acquisition d'un digesteur et/ou si on subventionne le prix du ciment, le seul matériau onéreux dans la construction du digesteur.

L'installation d'une petite unité, gérée d'une façon rationnelle vaut mieux qu'une grande installation qui non seulement, sera sous utilisée mais accapare un capital considérable même si, au prix du mètre cube, on a avantage à construire une grande ; sauf bien sûr, si le besoin en vaut la peine.

Néanmoins, si le problème du coût ne serait plus un obstacle pour la vulgarisation du biogaz, il ne faut pas négliger les autres facteurs qui pourront mettre en échec, cette vulgarisation notamment :

- la motivation,
- suffisance de substrat tels que bouse, lisier...
- disponibilité en eau.

Enfin, pour terminer, nous voulons essentiellement attirer l'attention des dirigeants responsables concernant les avantages de l'utilisation du biogaz et plus particulièrement ceux qu'il a pour la protection de l'environnement qui à l'heure actuelle est surexploitée.

* cf. ANNEXE III.

ANNEXES

/-) NNEXE - I : DOSAGE DES MATERIAUX

Volume total digesteur : $7,5 \text{ m}^3$

Volume dôme : $3,6 \text{ m}^3$

Volume pour stockage du gaz : $2,5 \text{ m}^3$

Volume pour les substrats : 5 m^3

Béton de fondation

. diamètre de base : 2,40 m

. surface de base avec les compartiments: $7,33 \text{ m}^2$

. surface de base intérieure : $4,5 \text{ m}^2$

. volume du béton : $1,10 \text{ m}^3$

. épaisseur du béton : 0,15 m

*Dosage gravillon : 1 m^3
compacité : 0,6*

*Dosage sable : $0,41 \text{ m}^3$
compacité : 0,6*

Liant : $0,168 \text{ m}^3$

Mur vertical

. hauteur : 1,10 m

. diamètre : 7,54 m

. surface : $8,29 \text{ m}^2$

. nombre de briques : 414

*Dosage sable : $0,15 \text{ m}^3$
-"- liant : $0,03 \text{ m}^3$*

Dôme :

. diamètre : 3,76 m

. surface : $11,62 \text{ m}^2$

. nombre de briques : 581

*Dosage sable : $0,1 \text{ m}^3$
-"- liant : $0,04 \text{ m}^3$*

Compartiment d'entrée

. hauteur : 1,76 m

. diamètre de base : 2 m

. surface : $3,52 \text{ m}^2$

. nombre de briques : 176

*Dosage sable : $0,06 \text{ m}^3$
-"- liant : $0,012 \text{ m}^3$*

Compartiment de sortie

. hauteur : 1,24 m

. diamètre de base : 1,57 m

. surface : $6,23 \text{ m}^2$

. nombre de briques : 312

*Dosage sable : $0,11 \text{ m}^3$
-"- liant : $0,02 \text{ m}^3$*

Couvercle

. diamètre grande base : 0,59 m

. diamètre petite base : 0,45 m

. hauteur : 0,20 m

. volume: $0,035 \text{ m}^3$

. fer rond : 1,40m : couvercle

0,80m : poignet

*Dosage gravillons: $0,030 \text{ m}^3$
-"- sable : $0,022 \text{ m}^3$
-"- liant : $0,012 \text{ m}^3$*

Moule (trou d'homme)

Volume : 0,0125 m³

Enduit : Surface totale : 34,16 m²

Dosage gravillons: 0,010 m³

-"- sable : 0,14 m³

-"- liant : 0,005 m³

Dosage sable fin: 0,60 m³

-"- liant : 0,420 m³

(-) NNEXE - II : COMMENT DEPANNER SON DIGESTEUR

EFFET	CAUSE	QUE FAIRE
Il n'y a pas de dégagement de gaz.	<ul style="list-style-type: none"> -La fermentation est insuffisante, manque des bactéries méthanogènes. -Le digesteur est trop froid - La digestion n'a pas encore commencé. - Une fuite laisse échapper le gaz au fur et à mesure 	<ul style="list-style-type: none"> - Changer ou augmenter le ferment. - Adapter un chauffage, augmenter l'isolation - Patience. - Vérifier toute l'installation à l'eau savonneuse et flair.
Il n'y a plus de dégagement de gaz	<ul style="list-style-type: none"> -Un facteur a bloqué la fermentation 	<ul style="list-style-type: none"> - Verifier la présence des facteurs toxiques. Tout recommencer
Le gaz n'arrive pas au gazomètre ou à la cuisinière	<ul style="list-style-type: none"> -Un tuyau est bouché (eau de condensation, robinet fermé..) -La pression est insuffisante 	<ul style="list-style-type: none"> - Installer un purgeur au point bas - Augmenter le diamètre des tuyaux, installer un gazomètre intermédiaire.
Le gaz refuse de brûler	<ul style="list-style-type: none"> -Trop de CO₂ dans le digesteur -Présence d'azote -Trop de CO₂ dans le digesteur ou de gaz incombustible, suite à une brusque variation d'un facteur (température, nature de déchet...) 	<ul style="list-style-type: none"> - Ajouter de la chaux, ou mieux patience - Une arrivée d'air dans le digesteur, danger ! - Une butyrisation est en cours, maintenir le pH neutre.
La flamme ne tient pas	<ul style="list-style-type: none"> - Pas assez de pression 	<ul style="list-style-type: none"> - Augmenter la pression, vérifier le bon réglage du brûleur, le diamètre du tuyau d'entrée.
La flamme décolle	<ul style="list-style-type: none"> -Trop de pression 	<ul style="list-style-type: none"> - Diminuer la pression, vérifier le bon réglage.

/-) NNEXE - III : DOSSIER DE DEMANDE DE PRET POUR
L'INSTALLATION D'UN DIGESTEUR

1 - OBJET DE LA DEMANDE

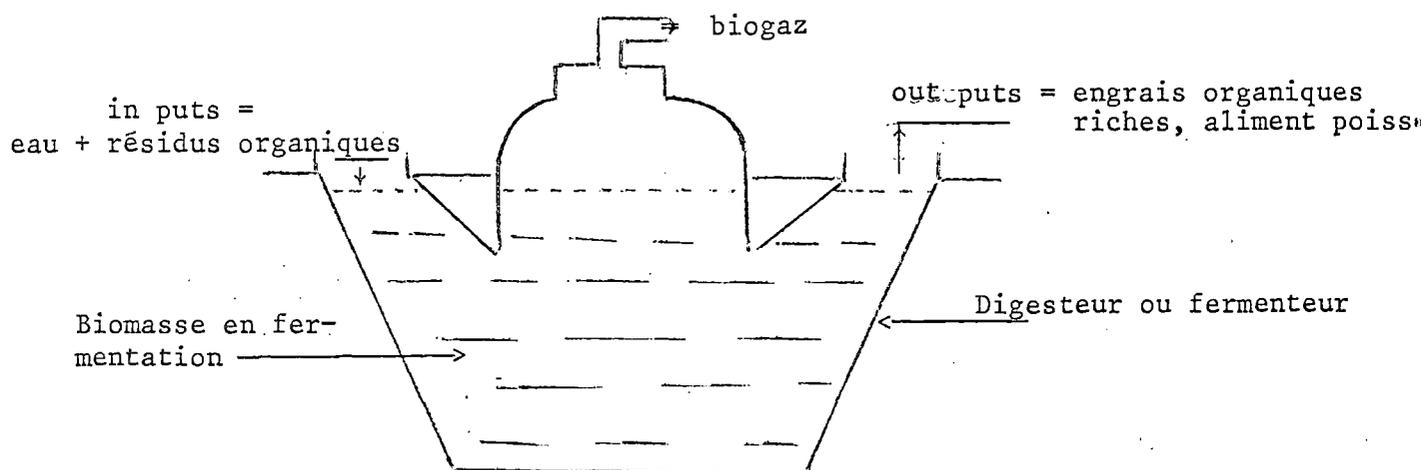
Il s'agit d'emprunter 365.000 FMG qui représente 70%* des dépenses nécessaires pour l'installation d'un digesteur à biogaz de 7,5 m³ pour la cuisson des repas d'une famille de 6 à 8 personnes.

2 - PRESENTATION DE LA TECHNOLOGIE

21 - Principe

La production du biogaz est une filière de valorisation énergétique par fermentation de la biomasse, notamment de tout ce qui est résidu organique parfois encombrant (déjections animales, résidus de récolte, résidus de sarclage, jacinthe d'eau, eaux usées...). Contrairement à la filière de valorisation par combustion, elle n'est pas polluante (elle est même dépolluante) et ne risque pas de provoquer une déforestation ou une dégradation des sols.

Schématiquement, la valorisation se fait comme suit :



22 - Intérêts de la technologie

Cette filière présente les avantages suivants :

1°) Utilisation de la biomasse humide qui n'a pas besoin d'être séchée (le séchage peut coûter cher).

La filière "combustion" nécessite l'utilisation de biomasse (bois de chauffe, charbon, paille...) sèche.

*Pourcentage accordé habituellement par la banque, les 30 % des frais d'installation sont apportés par l'emprunteur.

2°) Production à la fois de biogaz (énergie) et de fertilisant organique enrichi en N,P,K, (le fermenteur étanche ne permet aucune perte de ces éléments).

3°) Technologie peu sophistiquée, contrairement aux photopiles... Une fois le digesteur construit, il suffit d'y mettre des résidus et d'en retirer des engrais organiques.

4°) Répartition vers la campagne d'un bien-être réservé aux grandes villes (cuisson au gaz...).

5°) Structure stable d'approvisionnement car utilisation des ressources (matières premières) locales renouvelables.

6°) Indépendance et décentralisation de la production d'énergie au niveau familiale ne nécessitant aucun réseau de distribution (charrette, camion, camion-citerne, poteaux électriques...).

7°) Combustible propre, sans fumée, à utilisations multiples, cuissons, éclairage, réfrigération, motopompe, broyeurs, production d'électricité...

8°) Dépollution importante de résidus encombrants : dans un fermenteur familial, au bout du temps de séjour de 40 jours, des substances à fermenter dans le digesteur, entre 90 et 99% des bactéries pathogènes, des vers sont tués, les oeufs des parasites sont détruits complètement

9°) Réduction des risques de déforestation et de désertification. Le résidu de la fermentation revient au sol sous forme de fumure organique et parfois cette utilisation peut pour un paysan, avoir plus d'importance et être plus attrayante que celle du biogaz (TUNISIE).

10°) Amélioration de la balance de paiement pour les pays importateurs des ressources énergétiques.

En général, les motivations pour le biogaz sont :

a.) au niveau familial :

- difficultés d'approvisionnement en source d'énergie, rareté coût élevé du bois de chauffage ;
- nécessité de fumure organique de bonne qualité ;
- meilleure qualité de la vie.

b.) au niveau national :

- plus grande indépendance énergétique du pays
- économie de devises
- limitation de la déforestation et de la désertification
- meilleur contrôle des substances polluantes.

b.3.) Autres activités

Nature	Revenus (FMG)			Observations
	- 3	- 2	- 1	
-				
-				
-				

33 - Aspect organisationnela.) Organisation et gestion

Comment l'entreprise est-elle organisée et gérée ?

Eléments consid. Nature (liste)	Nombre	Etat	Destruction réparation	Observations
<u>Bâtiment</u>				
-				
-				
<u>Matériel et outillage :</u>				
-				
-				
<u>Humaines :</u>				
adultes				
hommes				
femmes				
enfants : <15 ans				
>15 ans				

4 - ASPECT TECHNIQUE

cf. § 2 : Présentation de la technologie du biogaz

5 - ASPECT FINANCIER

- Compte d'exploitation général (année 0)
- Compte prévisionnel d'exploitation (à établir pour une durée au moins égale à celle du crédit)

Opération	Année	0	1	2	3ème année
<u>Ventes</u>					
(-)					
Achats					
<u>Marge brute</u>					
(-) TFSE					
(-) FDG					
<u>Valeur ajoutée</u>					
(-) Frais de personnel					
(-) Impôts et taxes (sauf impôts sur revenu)					
<u>Résultat brut d'exploitation</u>					
(-) amortissement					
<u>Résultat économique net</u>					
(-) frais financiers					
<u>Résultat net avant impôts</u>					
(-) impôts sur revenu					
<u>Résultat d'exploitation</u>					
<u>MBA = R.E + amortissement</u>					

Effet digesteur :

Importance du digesteur pour l'exploitant :

- avant
- après
- épargne

TFSE : Travaux, Fournitures, Service extérieur

FDG : Frais Divers de Gestion

MBA : Marge Brute d'Autofinancement.

COMPTE PREVISIONNEL DE TRESORERIE A MOYEN TERME

(Schéma de financement à moyen terme)

Opération	Année	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4
<u>A/- Ressources</u>					
- MBA*					
- Apport du digesteur (épargne)					
- Emprunts					
- Apport personnel					
TOTAL RESSOURCES					
<u>B/- Emplois</u>					
- Investissement nouveau (= digesteur)					
- Remboursement d'emprunts (+ taux d'intérêt)					
TOTAL EMPLOIS					
ECART A - B					
ECART CUMULE					

6 - AUTRES ASPECTS

Exemple : effets intangibles.

* La MBA dégagée l'année 1 n'est disponible qu'en année 2 et ainsi de suite.

- BIBLIOGRAPHIE -

- A.U.P.E.L.F., 1985.- Production et utilisation du Biogaz en Afrique. 2^e Session de formation post-universitaire technologique, Bujumbura, Burundi; 10-25 Juil. 1985 - BIOM n° Spec. 4 à 15, Juil. 1985 - DAKAR.
- CAMACHO (M.), 1984.- Méthodologie et technique d'enquête. Antananarivo - E.E.S.S.A. Département Agro-Economico-Sociales (Cours de Méthodologie des Sciences sociales).
- CHARTIER (P.), MERIAUX (S.), 1980.- L'énergie de la biomasse. in La recherche, n°113, Juil.-Août 1980, p.766,776.
- EDELMANN (W.), 1987.- Rapport d'une mission de consultation sur la recherche de développement et la vulgarisation de la technologie biogaz à Madagascar. ARBI, 8933 Maschwanden Suisse - F.A.O., 11 p.
- EDELMANN (W.), 1988.- Séminaire sur le biogaz du 4 au 7 Juil. 1988 à Antananarivo, F.A.O., 4 p.
- FOREST (F.) et FARINET (J.L.), 1985.- Principaux résultats du programme biomasse Energie en Afrique. Contrat cadre IRAT/CIRAD/AFME.
- GITTINGER (P.J.), 1985.- Analyse économique des projets agricoles. Une série de l'IDE sur le développement économique 2^e edit. - Editions Economica, Paris, 540 p.
- GRET - GERES, 1983.- Est-il possible de faire une installation ? La fermentation méthanique. Paris, Rép. Fr. Ministère des Relations Extérieures. Coopération et Développement, 72 p. (Les dossiers du biogaz, dossier A)
- GRET - GERES, 1983.- La construction du digesteur. Paris, Rép. Fr., Ministère des Relations Extérieures. Coopération et Développement, 109 p. (Les dossiers du Biogaz, dossier B).
- GRET - GERES, 1983.- Utilisation et maintenance d'une unité de fermentation méthanique. Paris, Rép. Fr., Ministère des Relations Extérieures. Coopération et Développement, 85 p. (Les dossiers du Biogaz, dossier C).
- JEDLICKA (A.), 1985.- Organisation moderne du développement rural. Les Nouvelles Editions Africaines, Abidjan (Côte-Ivoire), 228p.
- LAGRANGE (B.), 1979.- Biométhane Tome I : Une alternative crédible, 204 p.
Biométhane Tome II: Principes, techniques, Utilisations, 246p.
Collection "Technologies douces", Aix-Provence, EDISUD (Energies alternatives).
- Manuel de biogaz chinois, 1979.- Intermediary technology (Angleterre) GRET (France) ENDA, Sénégal, Doc. 4, trad. fr., Juil. 1981, 125 p.

- MOUNT Rainer (M.), 1980.- Production de biogaz à petite échelle pour faire la cuisine. UITA, Guide technologique n°6, Juil. 1980.
- RABEMANANTSOA (S.), 1987.- Techniques de vulgarisation agricole, Antananarivo, E.E.S.S.A., Dép. Agriculture (Cours de Vulgarisation Agricole).
- RABEZANDRINA (R.), 1986.- Recyclage de la matière organique en agriculture à Madagascar, F.A.O. - ACCRA, 50p.
- RAJONHSON (O.), 1985.- La jacinthe d'eau et la production du biogaz. Antananarivo, E.E.S.S.A., 78 p. Mém. de fin d'études Dép. Agriculture.
- RANAIVOSOLOARIMALALA (A.), RATEFY ANDRIATAHIANA (T.), 1984.- Biogaz : mesures comparatives entre deux installations expérimentales en discontinu, E.E.S.Polytechniques. Mém. de fin d'études, spéc. Génie Chimique.
- RANAIVOSOLOARIMALALA (A.), RATEFY ANDRIATAHIANA (T.), 1987.- Rapport de mission sur l'identification de site à Madagascar, Antananarivo, FAO, 95p.
- RANAIVOSOLOARIMALALA (A.), RATEFY ANDRIATAHIANA (T.), 1988.- Rapport sur le projet technique de production de biogaz, Antananarivo. FAO, 30 p.
- RASOLOFOARIMANANA (R.), 1986.- Le Biogaz à Madagascar, Antananarivo EESSA, Dép. Agriculture (Mém. de fin d'études), 196 p.
- RAZANAMPARANY (S.), 1982.- Le biogaz, une réalité à l'Université d'Antananarivo. EESSA, Dép. Agriculture (Mém. de fin d'études), 77p.