



**UNIVERSITE MOHAMMED V- AGDAL**

**FACULTE DES SCIENCES**

**RABAT**



---

**MEMOIRE DE MASTER**

**Présenté par**

**BENHASSANE LHOUCINE**

**Intitulé du Master: Master spécialisé  
Génie et Gestion de l'Eau et de l'Environnement  
Spécialité : Eau et environnement**

**Traitement anaérobie des déchets organiques d'une ferme-  
expérience du projet pilote d'assainissement écologique Dayet  
Ifrah**

**Soutenu le 18/07/2011**

**Devant la commission d'examen :**

<b>Président :</b>	<b>Mr. Najib BENDAOU</b>	<b>Professeur à la faculté des sciences – Rabat</b>
<b>Encadrant :</b>	<b>Mr. Abderrahim EL HOURCH</b>	<b>Professeur à la faculté des sciences – Rabat – laboratoire d'électrochimie et de chimie</b>
<b>Encadrant:</b>	<b>Mr. Mohammed Elghali Khiyati</b>	<b>GIZ</b>
<b>Examineur :</b>	<b>Mr. EL mostapha LOTFI</b>	<b>Professeur à Université Mohamed V Rabat -Souissi / ENSET</b>

## ***Remerciement***

*Au terme de ce travail, qu'il me soit permis en premier lieu de remercier mon encadrant **Monsieur Mohammed ELGHALI KHIYATI** d'avoir accepté la charge de m'encadrer, d'être toujours accueillant à mon égard et de m'avoir fait bénéficier de ses grandes connaissances scientifiques et intellectuelles. Ses orientations, son soutien, sa confiance et ses observations m'ont été d'une aide précieuse.*

*Mes plus sincères remerciements et ma profonde gratitude s'adressent à **Monsieur Abderrahim EL HOURCH**, Professeur à la faculté des sciences de Rabat pour la confiance qu'il m'a accordé, son soutien, ses critiques constructives et ses conseils.*

*Au Pr. **NAJIB BENDAOU**, professeur à la faculté des sciences de Rabat pour m'avoir assuré un stage pour mon projet de fin d'étude.*

*Au Pr **EL mostapha LOTFI**, pour avoir accepté de juger et d'évaluer mon travail à des fins d'améliorations et de corrections objectives;*

*Enfin, une dédicace à mes parents pour leur aide et soutien inestimable ainsi que mes amis qui m'ont soutenu et supporté durant toute cette période*

## Résumé

*Une des technologies permettant efficacement le traitement de la fraction organique de ces déchets est la biométhanisation.*

*La biométhanisation peut s'appliquer à différentes matières organiques à forte teneur en eau (fumier, lisier, herbe, feuilles...). Utilisée de manière optimale, une installation de biométhanisation permet non seulement de prévenir la pollution, mais aussi de produire de l'énergie.*

*La biométhanisation ou digestion anaérobie, peut transformer un problème de déchets en une source de richesses. Cette technologie devient essentielle dans le processus de réduction des déchets et la production de biogaz, source d'énergie renouvelable*

*Les avantages de la biométhanisation sont multiples et peuvent être classés comme suit :*

*- dans le traitement des déchets : processus naturel nécessitant moins d'espace que le compostage aérobie ou l'enfouissement et réduisant considérablement le volume et le poids des déchets à enfouir;*

*- sur le plan énergétique : production nette d'énergie, génération d'un combustible renouvelable de haute qualité valorisable dans plusieurs applications finales;*

*- sur le plan environnemental : réduction significative des émissions de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>, Élimination des odeurs, production d'un compost propre (stérile) et d'un fertilisant liquide riche en matières nutritives utilisables en agriculture.*

*Mots clés : digestion anaérobie ; biométhanisation ; valorisation ; méthane ; digestat ; biogaz; digesteur*

---

## Abstrat

*One of the technologies to effectively treat the organic fraction of these wastes is anaerobic digestion.*

*The biogas can be applied to various organic materials with high water content (manure, slurry, grass, leaves ...). Used optimally, a biogas plant can not only prevent pollution but also generate energy.*

*The biogas or anaerobic digestion, can transform a waste problem into a source of wealth. This technology is becoming essential in the process of reducing waste and produce biogas, a renewable energy source.*

*The benefits of biogas are numerous and can be classified as follows:*

*- In the treatment of waste: a natural process that requires less space than the aerobic composting or landfill and dramatically reducing the volume and weight of waste to landfill;*

*- In terms of energy: net energy production, generation of renewable fuel a high-quality reusable in multiple end applications;*

*- Environmentally: significant reduction in emissions of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>, Odor control, production of compost clean (sterile) and a liquid fertilizer rich in nutrients used in agriculture.*

# Liste des abréviations

AGIRE : Appui à la Gestion Intégrée des Ressources en Eau

AGV : Acide gras volatiles

DBO : Demande biologique en oxygène

DCO : Demande chimique en oxygène

FSR : Faculté des sciences RABAT

GGEE : Génie et Gestion de l'Eau et de l'Environnement

OMS : Organisation mondiale de la santé

ONEP : Office National de l'Eau Potable

ONG : Organisation Non Gouvernementale

SEEE : Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau et de l'Environnement

Ecosan : Ecological sanitation (Assainissement écologique)

TDSU : Toilettes de Déshydratation à Séparation d'Urines

# Liste des figures

**Figure (I.1)** : schéma général de la biométhanisation

**Figure (I.2)** : schéma des étapes de la biométhanisation

**Figure (I.3)** : produit issu du digesteur méthanique

**Figure (I.4)** : schéma de principe de l'évolution de la matière organique par méthanisation.

**Figure (I.5)** : schéma de principe de l'évolution de la fraction azoté en digestion anaérobie.

**Figure(II.1)** : localisation de l'installation du digesteur agricole

**Figure (II.2)** : schémas du digesteur agricole de la famille EL houari

**Figure(II.3)** : Schéma d'un appareillage d'analyse par émission: source/ dispersion/ détection.

**Figure (II.4)** : schéma de la filtration (sous vide).

**Figure (III.1)** : graphe du suivi de la température pendant trois mois : avril-juin.

**Figure (III.2):** graphe du suivi du pH pendant trois mois avril-juin.

**Figure(III.3)** : graphe des mesures de concentration Ca CO<sub>3</sub> et les acide gras.

**Figure (III.4):** graphe du suivi de la consommation d'oxygène pendant 5 jours (fumier +l'eau) et digestat.

# Liste des photos

**Photo N° 1** : à gauche l'image du village de Daoud ait Moussa et à droite image satellite du village

**Photo N°2:** Thermomètre/pH-mètre portable *antichoc EcoScan*

**Photo N°3** : Suppression du dioxyde de carbone

**Photo N°4** : préparation des dilutions

**Photo N°5** : agitations des différents dilutions

**Photo N°6** : Ajustement de la valeur du pH

**Photo N°7:** introduire l'échantillon dans l'enceinte à 20°C

# Liste des tableaux

**Tableau N°1** : composition du biogaz

**Tableau N°2**: Production de biogaz selon les intrants

**Tableau N°3** : illustration des règles pour le choix des dilutions

**Tableau N°4** : indices NPP par 100ml d'échantillons et limites de confiance à 95%

**Tableau N°5** : résultats des mesures d'alcalinité et acide gras

**Tableau N°6** : suivi de la demande biochimique en oxygène des échantillons DBO5

**Tableau N°7**: résultats des analyses N, P, K

**Tableau N°8** : résultats des analyses P, K (Uatrs)

**Tableau N°9**: résultats d'analyse bactériologique

## SOMMAIRE

<i>Avant propos</i> .....	4
<i>Introduction</i> .....	5
<i>CHAPITRE I :</i> .....	8
<i>ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</i> .....	8
1. Assainissement écologique (ECOSAN).....	8
1.1. Concept Ecosan .....	9
1.2. Les différents types d'assainissement écologique .....	9
2. principe de la méthanisation.....	10
2.1. Définitions .....	10
2.2. Les étapes métaboliques (Speece et Parkin, 1983).....	11
3. paramètres influençant la digestion anaérobie.....	13
3.1. La nature du substrat .....	13
3.2. La température.....	13
3.3. Le pH.....	13
4. digesteur méthanique .....	14
4.1. Typologie des digesteurs (Vade mecum.2004 ) .....	14
4.1.1. Classification sur base des charges acceptées .....	14
4.1.2. Classification sur base du principe de fonctionnement .....	15
5. Principaux types de digesteur utilisés .....	16
5.1. Biodigesteur type "Indien" transformé appelé cylindrique. ....	17
5.2. Biodigesteur à dôme fixe.....	17
5.3. Biodigesteur BORDA.....	17
6. Les produits issus du digesteur.....	18
6.1. Le rendement en biogaz.....	18
6.2. Le rendement en digestat .....	19
7. Avantage de la biométhanisation.....	21
7.1. Au niveau macro-économique : .....	21
7.2. Au niveau micro-économique .....	22
<i>CHAPITRE II</i> .....	23
<i>MATERIELS ET METHODES</i> .....	23
1. projet pilote ecosan au douar Dayet Ifrah .....	23
1.1. Caractéristiques physiques de la zone d'étude.....	23
1.2. Généralités sur la zone d'étude : village Dayet Ifrah .....	25

1.3.	Choix du douar Dayet Ifrah.....	26
2.	Dispositif expérimentale .....	27
2.1.	Localisation du digesteur.....	27
2.2.	Caractéristique de l’installation.....	27
3.	Analyse physico-chimique .....	28
3.1.	Mesure de la température .....	28
3.2.	Mesure du pH.....	28
3.3.	Mesure de l’alcalinité et de l’acidité.....	29
3.3.1.	L’alcalinité dans un digesteur anaérobie .....	29
3.3.2.	L’acidité dans un digesteur anaérobie .....	30
3.3.3.	Rapport de ces deux paramètres.....	31
4.	Les indicateurs de pollutions :.....	31
4.1.	Demande Biochimique en Oxygène (DBO) :.....	31
4.2.	Détermination de la demande chimique en oxygène (DCO).....	35
4.3.	Mesure des éléments N, P, K.....	37
4.3.1.	Mesure de l’azote N.....	37
4.3.2.	Mesure de P, K .....	38
5.	LES ANALYSES BACTERIOLOGIQUE.....	40
5.1.	Mesures des indicateurs de pollution fécale .....	40
5.1.1.	Méthodes par filtration sur membrane et par étalement .....	41
5.2.2.	Méthode par ensemencement en milieu liquide ou du nombre le plus probable ...	44
	<i>CHAPITRE III</i> .....	50
	<i>RESULTATS ET DISCUSSIONS</i> .....	50
<b>1.</b>	<b>Suivi de la température</b> .....	50
<b>2.</b>	<b>Suivi du PH</b> .....	51
<b>3.</b>	<b>Mesure de l’alcalinité/acidité</b> .....	53
<b>4.</b>	<b>Suivi de la demande biochimique en oxygène (DBO5)</b> .....	54
<b>5.</b>	<b>Mesure de la Demande Chimique en Oxygène DCO.</b> .....	56
<b>6.</b>	<b>Mesure des éléments Azote, Phosphore, Potassium (N, P, K)</b> .....	57
<b>7.</b>	<b>Les analyses bactériologiques:</b> .....	58
	<i>JUSTIFICATION ECONOMIQUE - FINANCEMENT.</i> .....	60
A.	Estimation économique : points fort.....	60
1 -	Autres avantages des biodigesteurs au regard de l'agriculture.....	66
2 -	Dépenses d'installation et de fonctionnement.....	61



B. Estimation du cout de construction du digesteur agricole de Dayet Ifrah .....	61
C. Estimation de la rentabilité du digesteur .....	64
1. Les retombées financières du biogaz .....	64
2. Les retombées financières des biofertilisants.....	65
<i>CONCLUSION</i> .....	69
<i>Références bibliographiques</i> .....	70
<i>Annexe</i> .....	72

## Avant propos

Le programme maroco-allemand «Appui à la Gestion Intégrée des Ressources en Eau – AGIRE» vise à améliorer le cadre organisationnel et institutionnel du secteur de l'eau au Maroc et à mettre en œuvre des actions afin d'assurer une meilleure protection des ressources en eau et son utilisation rationnelle, économique et durable, en considérant les principes de l'équité sociale.

L'objectif global du Programme AGIRE est l'amélioration des compétences des institutions du secteur de l'eau en vue d'une gestion intégrée et durable des ressources en eau au Maroc.

Pour atteindre cet objectif, les capacités notamment dans les thèmes suivants seront renforcées:

- Concertation, mise en œuvre, contrôle et suivi de la planification des ressources en eau
- Préservation des eaux souterraines
- Réutilisation des eaux usées
- Participation des acteurs au suivi, à la gestion et à la préservation des ressources en eau

AGIRE a comme composantes lors de la première phase (07/2008 – 06/2011):

1. **Cadre Institutionnel:** Le cadre institutionnel, réglementaire et organisationnel du secteur de l'eau est amélioré
2. **Capacités techniques:** Les capacités techniques des ABH et du SEEE sont renforcées
3. **Communication:** La communication, la gestion de l'information et la concertation entre les acteurs dans le secteur de l'eau est améliorée.

La présente étude de recherche consiste à évaluer le fonctionnement des installations d'assainissement écologique réaliser dans le cadre du projet pilote d'assainissement écologique a Dayet Ifrah et la valorisation des produits, en collaboration avec l'ONEP, l'université Mohammed V-Agdal, faculté des sciences rabat et l'institut agronomiques et vétérinaires Hassan II.

## *Introduction*

---

Une mauvaise gestion et une utilisation des ressources en eau que nous offre la nature, ainsi que l'inflation des prix due à l'augmentation de la demande font que notre planète et plus particulièrement le continent africain subissent de plein fouet les conséquences.

Des centaines de millions de personnes utilisent comme source principale d'énergie le bois de feu, causant ainsi une déforestation intense, une disparition du couvert végétal et une forte dégradation des sols, laquelle, compromet à son tour les productions agricoles et l'autosuffisance alimentaire.

Les conséquences de ce dysfonctionnement et de cette désorganisation terrestre doivent inciter tous les pays en voie de développement à se mobiliser pour faire face à ces problèmes. C'est grâce à leur volonté et leurs efforts pour le développement durable et la mise au point d'énergies nouvelles ou auto-renouvelables qu'ils vont garantir une utilisation plus équilibrée de la biosphère et par conséquent une préservation adéquate de leur environnement.

La mobilisation de tous les acteurs soucieux du sort de notre planète et la mise en application de leur savoir faire a aboutit à la mise en place de solutions alternatives afin de sauver ce qui reste de notre planète.

Les énergies renouvelables qui utilisent des sources naturelles telles que l'énergie hydraulique de petite puissance, l'énergie solaire et l'énergie issue de la biomasse jouent un rôle primordial dans la compensation partielle des pertes qu'a subit notre planète et vient aussi remplacer des énergies coûteuses et qui nuisent à notre environnement donnant ainsi à tous les peuples le droit d'utiliser une énergie qui leur est propre.

Dans cette optique, il convient de prendre en considération que la biomasse est une source d'énergie dont la plupart des pays en voie de développement disposent en grande quantité; ce potentiel est encore largement inexploité ou mal utilisé, alors que des technologies efficaces et attractives sont disponibles pour autant qu'on reconnaît la place qu'elles méritent dans les stratégies de développement.

Dès lors, la biométhanisation est certainement une technologie approuvée qui s'applique tant à des activités de type agricole qu'agro-industriel, pour aider à résoudre des problèmes au niveau communautaire et familial.

Son application dans les pays en voie de développement est une des meilleures par rapport aux autres technologies d'énergie renouvelable.

Le rapport comprend une partie bibliographique et une partie sur le projet pilote ecosan et les différentes méthodes d'analyses et dans le dernier chapitre (résultats et discussions) sur les différents paramètres clé qui influence le fonctionnement du digesteur.

Ce projet de fin d'étude s'articule autour des 7 volets suivants :

- 🔹 Evaluation de l'état des installations techniques
- 🔹 Evaluation des différent flux de matières à l'entrer et a la sortit du système (fumier, eaux usées, boues de digestion, gaz...).
- 🔹 Evaluation des différents paramètres physico-chimique (DCO, DBO, N, P, K, pH...) et hygiéniques (c.f, œufs de nématodes...) au niveau du digesteur.
- 🔹 Analyse de l'influence des paramètres climatiques sur le fonctionnement du digesteur.
- 🔹 Evaluation du fonctionnement du digesteur à biogaz et de la production de biogaz
- 🔹 Valorisation des produits
- 🔹 Réévaluation des couts de réalisation et des bénéfices de la valorisation des produits.
- 🔹 Assistance technique au fonctionnement.
- 🔹 Elaboration de recommandations pour l'amélioration de l'installation, de son dimensionnement et de son opération.
- 🔹 Elaboration d'un rapport sur la revu bibliographique [document à fournir D.1].
- 🔹 Elaboration d'une méthodologie comportant les fiches techniques des différents protocoles expérimentaux proposés [document à fournir D.2].
- 🔹 Elaboration de fiche de suivi de l'état d'avancement des travaux (à fournir chaque 2 semaine) [document à fournir D.3].
- 🔹 Elaboration d'un rapport sur l'évaluation du traitement anaérobie des eaux usées et du fumier d'une ferme - expérience du projet pilote d'assainissement écologique à Dayet Ifrah. [document à fournir D.4]
- 🔹 Elaboration de support d'information et de sensibilisation sur les digesteurs a biogaz :
  - un panneau d'information sur le digesteur agricole a Dayet Ifrah. [document à fournir D.5]

- une fiche d'information sur le digesteur agricole a Dayet Ifrah suivant le model « data sheets for ecosan projects ». [document à fournir D.6]
- Des brochures sur le digesteur agricole à Dayet Ifrah. [document à fournir D.7]

## *CHAPITRE I :*

### *ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE*

---

#### 1. Assainissement écologique (ECOSAN)

La solution la plus couramment utilisée pour l'évacuation des excréta humains est leur collecte dans des latrines à des fosses profondes communément appelées « puits perdus », avant de les évacuer et éventuellement les traiter. Cette solution présente des limites et contribue à la contamination des eaux souterraines et de surface. Face à cette situation, l'assainissement écologique, également connu sous le nom d'Ecosan, est une approche, ou solution qui doit permettre d'éviter les inconvénients des systèmes d'assainissement classiques.

Le concept repose sur une approche intégrée de la gestion des déchets solides et liquides qui est fondée sur la réutilisation et la conservation des ressources naturelles.

Cette approche a pour objectif entre autres, de :

- Préserver la santé humaine, par minimisation de l'introduction des germes pathogènes des excréta humains dans le cycle de l'eau.
- Préserver les ressources en eau (économie d'eau) par minimisation de la consommation en eau.
- Augmenter la fertilité des sols, par l'ajout des éléments fertilisants les N, P, K.
- Réduire les nuisances causées à l'environnement, par substitution des fertilisants chimiques et par une minimisation de la pollution de l'eau.

Le concept Ecosan veut briser la solution classique du « tout à l'égout ». Cette approche se veut innovatrice en réétudiant la question de l'assainissement dans tout son ensemble, et de ce fait, fermer la boucle du processus cyclique qui existe entre les aliments (les entrants) et les déchets (les sortants) et ainsi préserver l'environnement.

L'assainissement écologique est basé sur la valorisation des eaux résiduaires, afin de générer des revenus. Pour atteindre cet objectif plusieurs principes sont à observer. Il s'agira entre autres de :

- Ne plus regarder les déchets comme une nuisance mais comme une ressource à exploiter/valoriser (production de matières premières, d'énergie et d'engrais);

- Considérer la filière des déchets tant solides que liquides comme une activité économique et créatrice d'emplois.

- Concevoir un système de gestion intégrée et de proximité des déchets.

Ainsi, l'assainissement écologique peut se définir comme une approche de valorisation des déchets reconnaissant le déchet comme une ressource et non comme un rebut sans aucune valeur.

En effet, dans plusieurs régions du monde, des procédés de valorisation des déchets ont été mis en œuvre, l'utilisation de l'urine et des excréta humains ne date pas d'aujourd'hui de même que le compostage des ordures ménagères ; pour cela Ecosan veut redonner droit à ces vieilles pratiques en les rendant sûres et ce grâce à la destruction des pathogènes pouvant être contenus dans les déchets et faciliter la manutention pour les différents utilisateurs.(Werner.C, 2008 ),

### **1.1. Concept Ecosan**

Le concept Ecosan est basé sur le fait que les problèmes d'assainissement pourraient être résolus plus durablement et plus efficacement si les nutriments contenus dans les excréta et les eaux usées étaient recyclés et utilisés plutôt que d'être rejetés dans l'environnement (nappes phréatiques, rivières et autres exutoires). Ce qui implique une réintégration au cycle naturel des flux de matériaux. En ce sens, les excréta ne sont plus considérés comme des déchets mais comme des ressources. Il s'agit de les traiter afin de pouvoir les utiliser dans la fertilisation des sols et par conséquent à produire de la nourriture à long terme tout en réduisant la consommation d'énergie et la pollution des ressources en eau. Ceci va permettre de réduire l'utilisation des engrais chimiques et d'améliorer le rendement agricole. On parle aussi de « fermer la boucle » pour exprimer ce processus cyclique.( Werner.C, 2004),

### **1.2. Les différents types d'assainissement écologique**

Il y a plusieurs types d'assainissement écologique. Les chercheurs, ONG et entreprises présents dans le secteur ont développés des modèles très divers. Les plus célèbres sont les toilettes à compost. Dans certains cas, urine et matières fécales sont récupérées ensemble et compostées. Dans d'autres cas, urine et fèces sont séparées au préalable, et l'urine est utilisée à part comme fertilisant, diluée dans de l'eau. La neutralisation des matières fécales peut être réalisée de deux manières différentes, selon le lieu ou le climat : par décomposition ou par

déshydratation. Dans les deux cas, le processus est accéléré et catalysé par l'ajout de substances comme des copeaux de bois, de la sciure et des cendres.

Les types de toilettes à compost commercialisés dans les pays du Nord ont un compartiment de compostage soit directement en dessous des toilettes ou bien dans une autre partie de la maison.

## 2. principe de la méthanisation

### 2.1. Définitions

La méthanisation est un procédé biologique permettant de valoriser des matières organiques en produisant une énergie renouvelable et un digestat utilisé comme fertilisant.

En l'absence d'oxygène (digestion anaérobie), la matière organique est dégradée partiellement par l'action combinée de plusieurs types de micro-organismes. Une suite de réactions biologiques (figure I.1) conduit à la formation de biogaz (composé majoritairement de méthane) et d'un digestat. Le biogaz pourra être valorisé en électricité et en chaleur, le digestat sera épandu comme engrais de ferme.

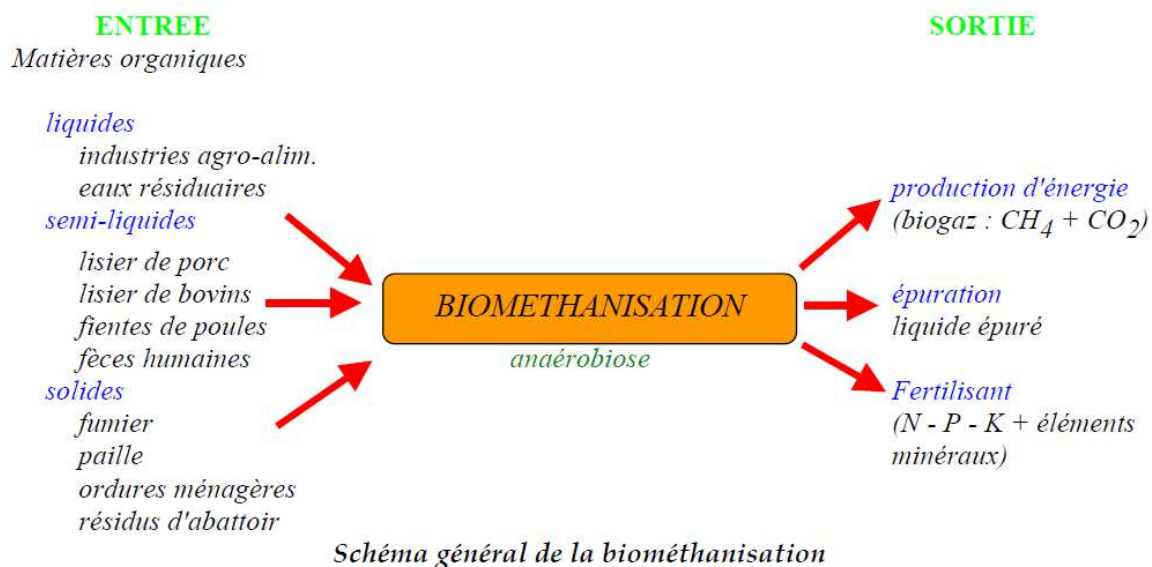


Figure (I.1) schémas général de la biométhanisation

Source : Philippe POUECH APESA, 2009

Les bactéries réalisant ces réactions se trouvent à l'état naturel dans les lisiers, il n'est donc pas nécessaire d'en ajouter, elles se développent naturellement dans un milieu sans oxygène.

Pour maximiser le rendement de ces réactions, la matière est placée à l'intérieur d'une grosse cuve (appelé digesteur) qui est fermée, chauffée, brassée sans entrée d'air et à l'abri de la



lumière. La majorité des installations de méthanisation à la ferme fonctionne à une température de l'ordre de 38 °C (température dite mésophile).

Une digestion thermophile (environ 60 °C) est également possible et permet une digestion plus rapide des substrats. Cependant la conduite de l'installation est plus délicate et les coûts sont plus élevés. Le pH dans le digesteur est maintenu entre 6,5 et 7,5. Un brassage régulier doit avoir lieu afin d'homogénéiser les substrats et de favoriser la production de biogaz. Les substrats restent en moyenne 30 à 40 jours dans le digesteur.

## 2.2. Les étapes métaboliques (Speece et Parkin, 1983)

La digestion anaérobie est un processus complexe qui se déroule généralement en 4 étapes; les deux premières sont souvent regroupées car effectuées par les mêmes populations de microorganismes (Couturier et Galtier, 2004).

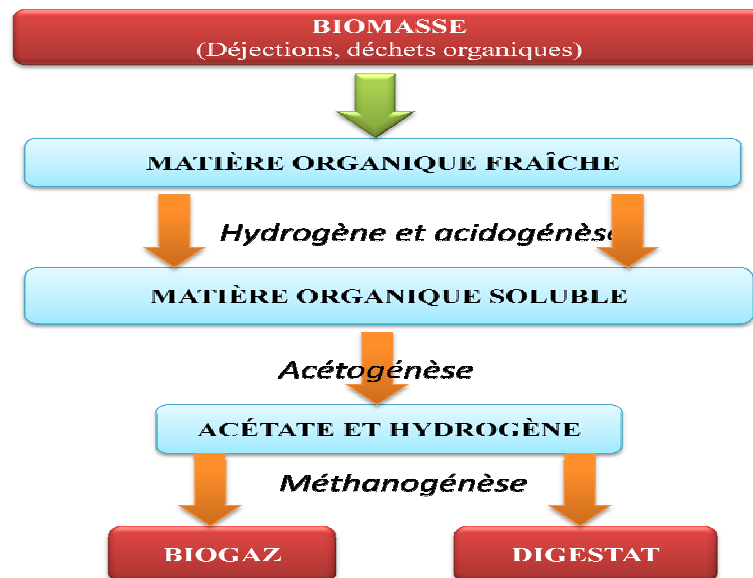


Figure (I.2) : schéma des étapes de la biométhanisation

### Hydrolyse et Acidogénèse

Cette première étape est effectuée par un ensemble varié de microorganismes, la plupart anaérobies strictes. Généralement, l'hydrolyse est la résultante de l'action d'enzymes extracellulaires (cellulases, hydrolases, amylases, etc) qui libèrent des produits de poids moléculaire plus faible (monomères) qui vont à leur tour pénétrer dans la cellule où ils seront dégradés selon les voies classiques du catabolisme. Ces monomères sont transformés en acides organiques et alcools avec libération d'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ); de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et d'hydrogène ( $\text{H}_2$ ): Acidogénèse (Filidei *et al.*, 2003).

La phase d'hydrolyse qui est souvent considérée comme l'étape limitante de la digestion anaérobie. En effet, la nature biochimique du substrat dépend de la vitesse réactionnelle.

### **Acétogénèse**

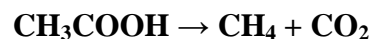
C'est pendant cette phase que sont produits, à partir des étapes précédentes, les principaux substrats de la méthanogénèse: acide acétique ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ),  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2$ . L'acide acétique est un intermédiaire clé de la transformation de la matière organique dans l'environnement. De nombreuses bactéries sont capables de faire de l'acétate par fermentation et sont souvent qualifiés «d'acétogènes».

### **Méthanogénèse**

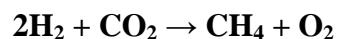
C'est l'étape finale et spécifique de la fermentation méthanique. Elle conduit à la réduction du carbone en méthane et est réalisée par des microorganismes très spécialisés, anaérobies strictes, qui se divisent en méthanobactériales, méthanococcales et méthanomicrobiales.

Il existe deux grandes voies de formation du méthane:

- La voie acétoclastique où l'acide est transformé en méthane:



- La voie hydrogénéophile où c'est le mélange  $\text{CO}_2/\text{H}_2$  qui est utilisé:



D'autres réactions existent à partir de différents composés comme le méthanol, l'acide formique, la méthylamine ou encore le diméthylsulfure.

➤ **La voie acétoclastique** est responsable de la production de **70 %** du méthane produit.

Des bactéries sulfato-réductrices sont également présentes : elles réduisent sulfates et autres composés soufrés en hydrogène sulfuré ( $\text{H}_2\text{S}$ ) et mercaptans, qui donnent au biogaz une odeur caractéristique.

### 3. paramètres influençant la digestion anaérobie

#### 3.1. La nature du substrat

La digestion anaérobie est un procédé qui s'applique à des situations extrêmement diverses: multiplicité des substrats concernés, variétés des procédés industriels, taille et stade de développement.

#### 3.2. La température

La fermentation anaérobie peut se dérouler entre 5 et 65°C. On définit classiquement trois plages de températures autour d'une valeur optimale relative.

- La zone psychrophile de 4 à 25°C.

- La zone mésophile de 35 à 45°C.

- La zone thermophile de 55 à 65 °C.

La première englobe les fermentations dans les sédiments marins mais également les fosses septiques. La plus largement étudiée est la zone mésophile.

L'augmentation de la température entraîne une augmentation des vitesses de dégradation, en particulier de la phase d'hydrolyse, sans aucune influence particulière sur la biodégradabilité ou le rendement en méthane car les voies métaboliques restent les mêmes jusqu'à 65°C.

#### 3.3. Le pH

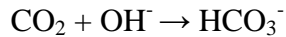
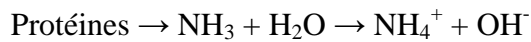
La gamme des pH permettant un déroulement normal de la fermentation méthanique est liée aux conditions optimales de vies des microorganismes responsables des différentes réactions métaboliques.

On observe des différences entre les populations bactériennes. Ainsi les acétogènes sont les plus sensibles aux variations de pH (optimum de croissance de 7,2), alors que les méthanogènes peuvent accepter des variations de pH entre 6 et 8. Les bactéries acidogènes s'adaptent facilement à des pH aux alentours de 4.

Généralement, on considère que les variations doivent être maintenues dans une fourchette située entre 6,4 et 7,8 pour que les fermentations soient stables.

La régulation du pH est assurée principalement par les bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) (Morelli et Rindome, 1990) et dans une faible mesure par les ions phosphates ( $\text{HPO}_3^-$ ) (Florencio *et al.*, 1996).

A un pH voisin de la neutralité, la formation des ions  $\text{HCO}_3^-$  est principalement due à l'interaction entre les ions  $\text{NH}_4^+$  provenant de la dégradation des protéines et le  $\text{CO}_2$  dissous, suivant les réactions :



Ces ions permettent de neutraliser les acides organiques, libérés.

#### 4. digesteur méthanique

C'est le cœur du processus de la méthanisation. C'est l'appareil ou le réacteur où se déroule la fermentation méthanique. Le digesteur comprend un ensemble de dispositifs destinés à assurer :

La production du biogaz → récupération du biogaz → mise en service du biogaz

Le cycle de fermentation pouvant être discontinu ou continu, on distingue donc des digesteurs fonctionnant en continu ou en discontinu.

##### 4.1. Typologie des digesteurs (Vade mecum.2004 )

On peut classer les digesteurs soit on se basant sur la charge acceptée ou bien sur le principe de fonctionnement.

##### 4.1.1. Classification sur base des charges acceptées

On distingue deux sortes de fermentation

###### **La fermentation à faible charge ou à l'état liquide :**

Dans cette technique, le substrat au sein du digesteur doit être dilué de manière à ramener la concentration en matière sèche 5 à 20%.

Donc il faut un petit débit d'alimentation et un grand volume de digesteur pour éviter le risque de lessivage des méthanogènes dont la croissance est très lente. Les charges volumiques maximales applicables sont presque 2 à 5 kg de DCO/m<sup>3</sup> /j.

**NB :** L'inconvénient de cette technique est sa forte demande en eau, par contre on remarque une production importante de digestat.

###### **La fermentation à forte charge ou à l'état solide :**

Concernant cette technique, l'apport d'eau est limité de manière à ce que la concentration en matière sèche soit maintenue au-dessus de 20%. Les charges volumiques appliquées peuvent dépasser 40 kg de DCO/m<sup>3</sup>/j. Les temps de séjour hydraulique varient entre 2 à 3 semaines.

Au cours de ce processus anaérobie, 15 à 20% de la matière organique initiale est transformée en biogaz, 40 à 50% de cette matière sont retrouvés dans le digestat, les 30 à 45% restant se retrouvent dans la liqueur d'extraction dont une partie est recirculée en amont du digesteur comme partie du mélange d'alimentation, donc les microorganismes n'utilisent qu'une petite quantité de matière organique pour se développer. Ceci pourrait cependant être variable selon la nature du substrat utilisé.

**NB :** Les principaux avantages de ce procédé est la rapide stabilisation de l'effluent et le volume réduit du digesteur, par contre en raison de la forte concentration, les effets de certains paramètres tels que la présence importante de sels ou l'accumulation des Acide Gras Volatiles (AGV) sont plus sévères.

Ces digesteurs sont souvent utilisés pour le traitement des déchets municipaux.

#### **4.1.2. Classification sur base du principe de fonctionnement**

##### ***Digesteur à phase unique :***

- **Les systèmes de digestion en continu**

L'alimentation de ce système se fait par le sommet ou latéralement. Une partie du résidu en bas du réacteur est recirculé de manière à favoriser une homogénéisation de la matière au sein du réacteur.

La plupart des petites installations de biométhanisation fonctionnent suivant ce système.

- **Les systèmes de digestion en batch**

Le fonctionnement est assuré par alimentation en discontinue, le digesteur est inoculé, chargé, fermé et gardé le temps de la digestion. Le percolat de digestion est recirculé au sommet dans le but de maintenir un contenu en humidité homogène. Une fois le temps de digestion dépassé, le digesteur est ouvert, vidé et rempli à nouveau avec du substrat.

Ce type de digesteur a l'avantage d'être simple mais il nécessite un post traitement poussé des effluents.

**NB :** Ces systèmes sont actuellement abandonnés. Seules quelques installations méthanogènes fonctionnent avec ce principe, notamment en Chine, au Bangladesh et en Afrique.

##### ***Digesteurs à phases séparées***

Ce type de fermentation à phases séparées n'est à présent appliqué que pour des installations de biométhanisation à forte charge. Elle est conçue de façon à réaliser en continu les phases d'acidogènes (hydrolyse et acidification) et de méthanogènes dans deux cuves différentes montées en série. Ainsi, on parle de fermentation à deux phases. Chaque cuve a pour but d'optimiser une des deux phases. La phase méthanogène est couramment réalisée par un filtre anaérobie ou un réacteur lit de boue.

**N.B :** Les avantages de ce système à phases séparées par rapport au système à phase unique sont surtout liés à la possibilité d'optimiser les cinétiques des réactions biochimiques et au volume réduit de digesteur pour une même quantité de substrat à traiter. Elle permet aussi d'optimiser la production de méthane dans le biogaz produit.

L'inconvénient de ce système pourrait résider au niveau de l'élimination, par les méthanogènes hydrogénophiles, de l'hydrogène produit au cours de la phase d'acidification. Le principe reste malgré tout intéressant puisqu'il permet une maîtrise de la méthanogénèse.

### *Digesteurs mixtes ou intégrés*

Il est bon de signaler qu'un système mettant en œuvre d'abord une fermentation anaérobie à forte charge puis suivi d'un compostage aérobie a été développé au début des années 80 aux Etats Unis d'Amérique.

Le principe de ce système consiste premièrement à faire subir au substrat organique une digestion anaérobie. Le sous produit de digestion est ensuite stabilisé par l'étape de compostage. Cette deuxième étape permet également la dégradation de la fraction peu fermentescible par voie anaérobie.

On retient des systèmes de traitements mixtes, deux avantages principaux :

- La réduction des moyens mis en œuvre pour le traitement du liquide issu de digesteur anaérobie, celui-ci étant en grande partie utilisé pour l'humidification du compost.
- La stabilisation quasi complète du substrat organique en raison de la complémentarité des deux systèmes.

## 5. Principaux types de digesteur utilisés

(CIRAD, Decembre 2002)

### **5.1. Biodigesteur type "Indien" transformé appelé cylindrique.**

*(Voir schemas N°1) en Annexe*

La chambre de digestion est construite en briques, agglomérés de ciment, béton armé ou pierres scellées par mortier.

Le gaz est emmagasiné dans une cloche flottant à la surface de la matière organique. La construction est simple et ne nécessite pas de main d'œuvre spécialisée. Le contrôle de la digestion est facile, la pression de gaz stable, l'alimentation en matière organique et la sortie des boues organiques ne requiert pas de manutention.

L'inconvénient réside dans le coût du réservoir à gaz.

### **5.2. Biodigesteur à dôme fixe.**

*(Voir schémas N°2, N°3, N°4) en Annexe*

Le gaz est emmagasiné dans la partie supérieure, hémisphérique, de la chambre de digestion. La face interne de ce dôme est revêtue d'un enduit mortier et d'un enduit à base de silicate de sodium afin de le rendre hermétique au gaz. Les fuites du gaz restant, un des principaux problèmes des dômes fixes, la simplicité reste le principal avantage de cette technique qui fait essentiellement appel à des matériaux de construction généralement disponibles localement même dans les pays les plus démunis.

L'inconvénient réside dans la nécessité d'alimenter manuellement le biodigesteur en matière organique fraîche de même pour le transfert des boues fermentées.

### **5.3. Biodigesteur BORDA**

*(Voir schémas N°5) en Annexe*

Sous cette appellation on désigne un appareil dont le but est de combiner les avantages des deux types précédents. La chambre de digestion est sphérique avec une partie cylindrique au sommet du dôme renfermant un réservoir de stockage de gaz flottant.

D'autres types de digesteurs sont utilisés :

Biodigesteur à dôme fixe (amélioré par CAMARTEC).

*(Voir schéma N°6) en Annexe*

La particularité de ce biodigesteur réside dans : la forme hémisphérique, le trou du dôme central à la partie supérieure de la chambre, la séparation de la partie réservoir à gaz de la partie effluents par un dispositif spécial " weak strong rings ".

L'anneau souple absorbe les fissures provenant de la partie basse, l'anneau rigide empêche le développement et la formation de fissures vers le réservoir gaz.

- le type canal " breadloaf " *(Voir schéma N°7) en Annexe*

- le type lagon avec couvercle plastique
- le type sac plastique (*Voir schéma N°8) en Annexe*

Tous ces digesteurs sont alimentés en semi-continu (une fois par jour).

## 6. Les produits issus du digesteur

Une fois la méthanisation complétée, dans son application la plus simple, deux coproduits sont obtenus : le biogaz et un effluent traité appelé digestat.

### 6.1. Le rendement en biogaz

Le biogaz est un mélange gazeux résultant de l'activité bactérienne en absence d'oxygène. La digestion anaérobie consiste à transformer la matière organique en une série de produits simples et à la fin un mélange gazeux (méthane, gaz carbonique), ce dernier devient inflammable si la teneur en méthane dépasse 50% (voir tableau N°1).

**Tableau N°1 : composition du biogaz**

<b>Bouses de bovins</b>	<b>Méthane</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>H<sub>2</sub>O</b>	<b>H<sub>2</sub>S*</b>
<b>Teneur en %</b>	60	37	2	0,5

Le H<sub>2</sub>S est responsable d'une mauvaise odeur, mais elle disparaît dans les flammes.

**NB :** PCI (Pouvoir Calorifique Inferieur) du biogaz (60% CH<sub>4</sub>) est de 21524 KJ/m<sup>3</sup>.

Contrairement aux procédés de digestion aérobie, c'est-à-dire en présence d'oxygène, tels que le compostage et la boue activée, la biométhanisation génère peu de chaleur puisque 90% de l'énergie contenue dans le lisier brut est transformée en méthane et que 10% sert à la synthèse de nouvelles cellules. À titre comparatif, dans les procédés de digestion aérobie, 60% de l'énergie du lisier sert à la synthèse de nouvelles cellules et 40% à la production de chaleur, aucun méthane n'étant produit.

La quantité de biogaz produite à l'issue du procédé de biométhanisation est fonction des caractéristiques de l'effluent traité, en particulier de son contenu en matière organique biodégradable. Cependant, la biométhanisation est un processus complexe qui est sensible au ratio de carbone sur l'azote (C/N), au pH, à la température et à la siccité de la matière



première ou du mélange de matières premières. Le procédé présente donc davantage un enjeu du point de vue de la biologie que de l'ingénierie.

**Tableau N2: Production de biogaz selon les intrants**

Intrants	Matière sèche (%)	Production
Lisier de porcs	6	16-23
Lisier de bovins	8	13-32
Fumier de volailles	24	61-112
Déchets domestiques	20	126
Foin (ensilage)	30	145
Mais (ensilage)	30	197
Gras	25	238

## 6.2. Le rendement en digestat

Après avoir été digéré pendant quelques dizaines de jours en condition mésophile (37°C) ou thermophile (55°C), le résidu de méthanisation contient une fraction non dégradée de la matière organique initiale et l'ensemble des matières minérales ; signalons également que le procédé n'entraîne pas de perte en eau (minime au travers des condensats du biogaz). Le schéma suivant présente les différentes fractions obtenues (SOLAGRO.2004).

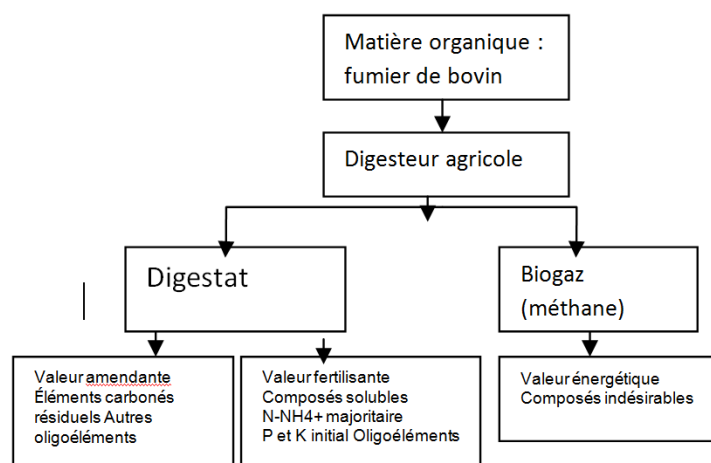


Figure (I.3) : produit issu du digesteur méthanique

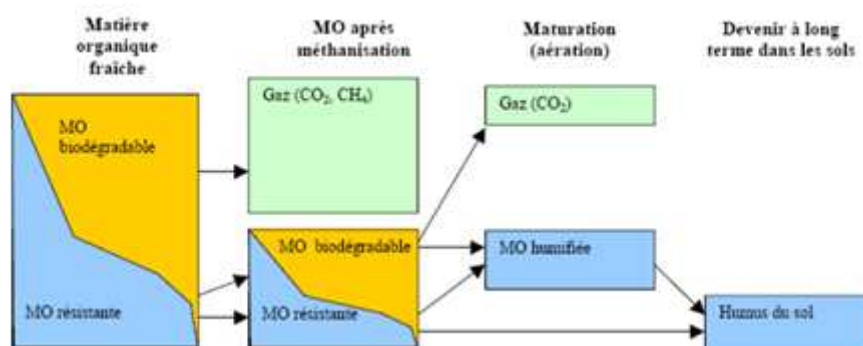
L'effluent traité contient essentiellement la même quantité de fertilisants (azote, phosphore, potassium, etc.) que le lisier brut et présente un volume presque équivalent. La forme minérale de l'azote et du phosphore a toutefois été favorisée par la digestion, ce qui rend ces éléments plus facilement assimilables par les plantes lors de leur épandage. Par contre, le taux

de matière organique du lisier est grandement diminué. La réduction attendue de la charge organique par la biométhanisation est de 80% et plus, basée sur la demande chimique en oxygène (DCO). Le traitement réduit également de façon significative le nombre d'agents pathogènes ainsi que les odeurs du lisier.

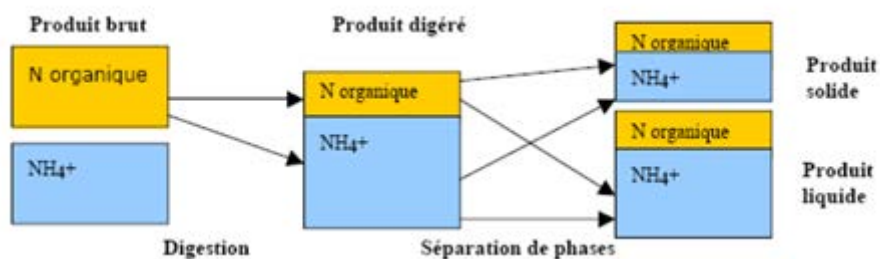
Lorsque la ferme ne peut valoriser sur ses terres la totalité des fertilisants produits, il est possible de vidanger les boues décantées naturellement dans le digesteur et d'y extraire à peu de frais jusqu'à 50% du phosphore et environ 10% de l'azote pour un volume représentant environ de 3 à 10% du volume de lisier brut. Si elles sont déshydratées, le volume de boues ainsi extraites représente environ 2 à 3 % du volume de lisier brut.(Mignon.C,2009)

Les produits obtenus à partir de la méthanisation de matière organique sont à rapprocher de la catégorie des amendements organiques en revendiquant principalement un effet d'entretien ou de valorisation de la fertilité des sols. La méthanisation de la matière organique peut être comparée à la phase thermophile du compostage. Il s'agit de phases d'intense activité bactérienne où le carbone le plus facilement accessible est dégradé en  $\text{CO}_2$  avec dégagement de chaleur (phase thermophile du compostage) ou en  $\text{CO}_2$  et en méthane (digestion anaérobie). A la fin de ces processus biologiques, on a des produits (digestat et compost frais) qui doivent subir une phase de maturation (réorganisation du carbone, humification) afin d'obtenir un produit stabilisé (faible évolution de la fraction carbonée). (ADEME ; Chambre d'agriculture ; Mars 2006)

Les schémas suivants représentent les bilans de matière organique et azote lors du processus de méthanisation.



Figure°(I.4) : schéma de principe de l'évolution de la matière organique par méthanisation



Figure°(I.5) : schéma de principe de l'évolution de la fraction azotée en digestion anaérobie

## 7. Avantage de la biométhanisation

### 7.1. Au niveau macro-économique :

- Une consommation moindre de bois de feu et donc la lutte contre la déforestation et ses conséquences (érosion, production agricole faible, pluviométrie et hydrologie irrégulières, etc.).
- La diminution de la dépendance par rapport aux produits pétroliers et ainsi une économie de devises pour le pays.
- Une augmentation des productions agricoles par l'utilisation des effluents provenant du digesteur et donc une diminution de l'utilisation des engrais chimiques.
- L'assainissement des déchets et donc une diminution des sources de maladie.
- Les systèmes de méthanisation utilisés dans le secteur agroalimentaire offrent un double avantage celui de réduire la charge pathogène et les odeurs. De plus, la méthanisation permet une réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES).

#### ✓ Odeurs

La méthanisation permet de diminuer les odeurs lors de l'épandage. Pain *et al.*, (1990) ont démontré que les émissions d'odeur du digestat sont réduites de 70 à 80% (lors des premières six heures suivant l'application au champ) par rapport à un lisier brut.

#### ✓ Pathogènes

Levasseur et Dutréme (2007) ont mentionné que Couturier et Galiter (2002) ont obtenu une réduction des virus jusqu'à 99% à une température de 35°C et un temps de rétention théorique de 14 jours. La digestion anaérobie en conditions mésophiles détruirait peu les pathogènes.

Par contre, en conditions thermophiles, puisque la température est plus élevée, ces conditions éliminent plus efficacement les organismes pathogènes qu'en mésophilie et qu'en psychrophilie (Burton et Turner, 2003).

✓ *Gaz à effet de serre*

Une analyse du cycle de vie permet de vérifier l'impact au niveau des GES entre la situation actuelle et la situation incluant un système de méthanisation à la ferme. En effet, la méthanisation permettrait de réduire globalement l'émission des GES.

- La création de nouveaux emplois principalement en zone rurale pour la construction des digesteurs.
- L'amélioration de l'habitat rural (lutte contre l'exode) et de l'environnement.
- Le développement intégré : production décentralisée d'énergie et de fertilisants.

## 7.2. **Au niveau micro-économique**

- L'épargne de bois de chauffe et de pétrole lampant.
- Un gain de temps et une diminution de la pénibilité pour le ramassage du bois et donc possibilités de nouvelles activités.
- L'augmentation des productions agricoles par une meilleure fertilisation.
- L'augmentation du bien-être : meilleure éclairage, diminution des maladies et des désagréments (odeurs, insectes) dus aux déchets, facilité et propreté de la cuisson au biogaz (élimination des fumées), sécurité en approvisionnement en énergie ainsi qu'une meilleure position sociale du propriétaire.

## *CHAPITRE II*

### *MATERIELS ET METHODES*

---

Afin d'acquérir les données expérimentales nécessaires à l'optimisation de la filière précédemment décrite, il a été nécessaire de développer une méthodologie de suivi de la digestion anaérobie.

Par ailleurs, la conduite de ce suivi du digesteur agricole nécessite la réalisation de bilans entrée/sortie sur un certains nombres de paramètres physico-chimiques clés du procédé (macroéléments, DBO, DCO, température et pH) afin de retranscrire son évolution. Pour chaque analyse, un protocole spécifique a été utilisé.

Enfin, des paramètres supplémentaires, tels que les analyses bactériologiques et parasitologiques qui sont réalisées entre l'entrée et la sortie, afin d'estimer le fonctionnement du digesteur vis-à-vis de l'élimination des pathogènes.

Ce chapitre présente donc l'ensemble des matériels et méthodes utilisés au cours de ce travail.

#### 1. projet pilote ecosan au douar Dayet Ifrah

Coordonnées : 33°34' N 04°56' W.

Province : Ifrane.

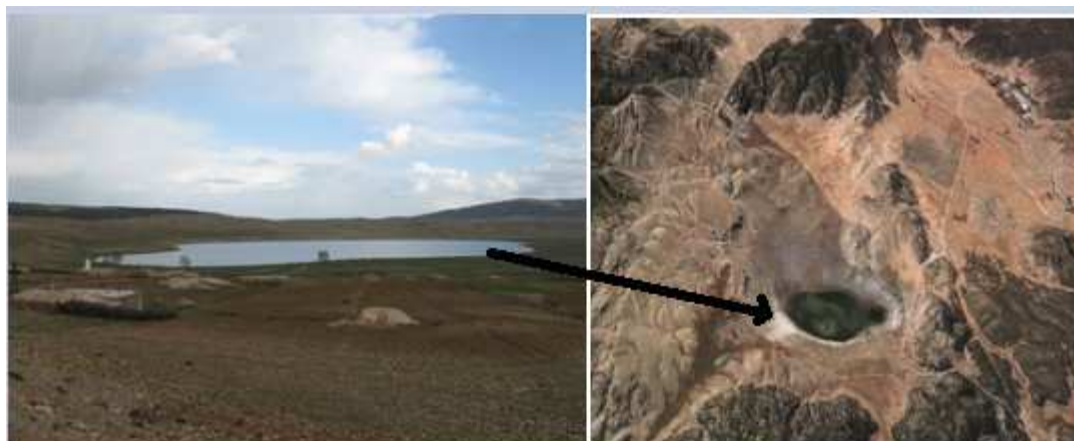
Région Biogéographique : n°12- Moyen Atlas.

Superficie : 250 ha : Tout le lac et une ceinture terrestre de 30-50 m.

Bioclimat : sub-humide à hiver froid.

#### 1.1. Caractéristiques physiques de la zone d'étude

##### **Lac Dayet Ifrah**



**PHOTO N° 1 : à gauche l'image du village de Daoud ait Moussa, à droite l'image satellite du village**

C'est l'un des grands lacs du Moyen Atlas (250 ha pour une profondeur actuelle d'environ 10m), d'origine karstique, alimenté principalement par la nappe et la fonte des neiges. Il est monomictique, alcalin, eutrophe sans végétation sur les bords. Ses eaux sont souvent agitées en surface, mais aussi bien ensoleillées.

Son niveau subit des variations saisonnières importantes; par ailleurs, dans le passé, le niveau était à plus de 10 mètres au-dessus du niveau actuel, ce qui signifie que la large plaine qui prolonge le lac au sud, cultivée actuellement, était inondée au moins en dehors de l'été et une prairie devait la couvrir.

Le rivage a reculé d'environ 15 m (sur sa bordure nord) par rapport à la limite connue lors de l'hiver 1993-94. Une plage faiblement inclinée a été exondée; elle est constituée de sable fin, sur lequel se voient souvent des éboulis de calcaire.

### **La flore**

La flore aquatique est peu abondante près des rives composées par (*Ranunculus*, *Potamogeton pectinatus*, *Ceratophyllum demersum*, *Myriophyllum spicatum*, *Chara* spp., *Zannichellia palustris*, *Potamogeton pectinatus*, *Tolypella hispanica*.), alors qu'aucune plante de bords d'eau ne se voit.

### **La faune**

La faune planctonique est assez variée (au moins 13 espèces de Crustacés) et abondante. Il est surtout intéressant de mentionner parmi les Invertébrés, trois formes se rencontrant rarement

au Maroc, encore moins à une telle altitude: La Rhabdocelle *Mesostoma*, le Trichoptère *Tinodes waeneri*, le Crustacé *Eucyclops speratus ifniensis*.

Le peuplement ichthyologique, exogène, est composé de Rotengle, Carpe commune, Brochet Perche et Sandre, ce dernier étant rare.

Malgré sa grande taille, ce lac n'abrite pas plus de 1500 oiseaux en hivernage, dont essentiellement des Anseriformes (avec des maxima de 600 pour le Milouin, 400 pour le Souchet, moins de 200 pour le Siffleur, le Colvert, le Chipeau, la Sarcelle d'hiver et le Casarca, ainsi que quelque 20-30 morillons). Le reste des hivernants est composé essentiellement de plongeurs : jusqu'à 270 foulques macroules, 50 foulques à crête et 120 grèbes huppés. Les formes fréquentant les bordures (ardéidés, limicoles...) restent rares.

Les seuls estivants visibles assez régulièrement sont la Foulque macroule et le Colvert (40-60 individus chacune), avec quelque 2-4 grèbes huppés.

## **1.2. Généralités sur la zone d'étude : village Dayet Ifrah**

Dayet Ifrah est implanté autour du lac du même nom. La population berbère est estimée à 1 500 habitants. La composition de l'habitation de Dayet Ifrah permet de distinguer deux quartiers donnant sur le lac. Les besoins en eau de la population est de l'ordre de 1 l/s. Le système d'alimentation en eau potable alimentant les bornes fontaines est constitué d'un forage de 102 m réalisé en 1998 et équipé de pompe immergé et alimenté par de l'électricité. Le forage est relié à un petit réservoir et desserve 7 bornes fontaines. Ce système couvre les besoins de l'agglomération Dayet Ifrah qui constitue la plus grande partie de la population du douar. Le système d'AEP est géré par une association d'usagers d'eau.

La distance qui sépare les bornes fontaines des habitations est très faible, de l'ordre de quelques dizaines de mètres. Le nombre total de borne fontaines est de 22.

L'habitat est de type dispersé et les constructions sont traditionnelles en pierre dure. Les accès aux différents douars se font par des pistes. L'agriculture concerne le maraîchage, la moisson de blé et les vergers (pommiers) ainsi que la culture de la pomme de terre. L'élevage est important dans la région et concerne les ovins et les bovins.

L'agriculture et l'élevage constituent la seule source de revenu du village. La qualité de la terre permet l'exploitation agricole mais un obstacle en empêche la totale utilisation à cause des pierres qui couvrent les terres. En effet, seulement 30 % des terres sont actuellement exploitées. L'artisanat du tapis, l'exploitation forestière et le tourisme (limité par le faible

réseau routier) constituent des ressources complémentaires. Dayet Ifrah fait partie du circuit touristique des Dayats dans la région. Cependant, le manque d'infrastructure empêche son développement. Il n'y a même pas de petit café permettant de se désaltérer. Concernant le climat, l'été est chaud malgré l'altitude, et les orages assurent une humidité et diminuent la sécheresse. L'hiver par contre est froid et pluvieux, marqué par le gel et la neige. (EL KASMI, 2009)

### **1.3. Choix du douar Dayet Ifrah.**

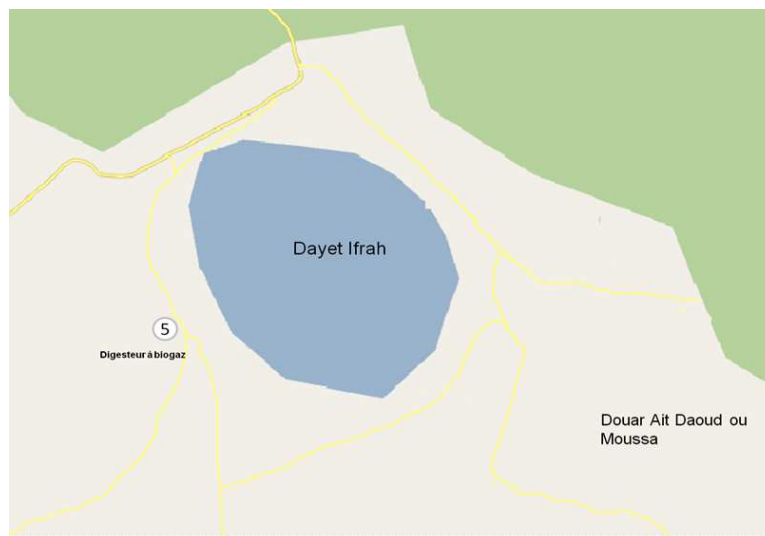
Le choix du douar Dayet Ifrah pour ce projet pilote a été motivé par six (6) raisons principales qui sont (Y.Aberghaz. 2009) :

- L'intégration du volet assainissement dans un cadre du projet global de développement durable à Dayet Ifrah initié par la Chaire UNESCO et l'Université Al Akhawayne.
- Le besoin en assainissement exprimé dans le village : la majorité de la population disposant d'un assainissement n'a pas d'installations sanitaires satisfaisantes, le reste de la population défèque dans la nature.
- La population s'est montrée très motivée depuis les premières prises de contact le 8 Avril 2009 et le 9 Mai 2009.
- La volonté de la population pour l'accès à un branchement individuel d'AEP, par conséquent un assainissement autonome et adéquat s'impose.
- La possibilité de réutiliser les produits générés par les installations Ecosan en agriculture car environ 95% de la population pratique l'agriculture comme activité principale.
- La possibilité de récupérer le biogaz issu des installations Ecosan à des fins d'utilisations domestiques. Si le douar Dayet Ifrah passe pour être le site pilote qui intéresse la société civile et les organisations scientifiques nationale et internationale, c'est parce qu'elle concentre des problèmes de manque sinon d'insuffisance d'infrastructures d'assainissement auxquels un douar marocain peut être confrontée. Elle se veut un type de cité rural dépourvu d'assainissement adéquat.



## 2. Dispositif expérimentale

### 2.1. Localisation du digesteur



Figure(II.1) : localisation de l'installation du digesteur agricole

La ferme de Mr EL Houari est située au centre du village et sur un terrain en forte pente. Elle est raccordée au réseau d'électricité. Une borne fontaine est située près de la ferme (50 m).

La famille est composée de 17 personnes. Le fermier cultive 12 ha de céréales, pommes de terre et pommiers qu'il fertilise aux engrais chimiques et au fumier dont trois ha sont irrigués.

En bonne saison, le fermier possède jusqu'à 8 bovins (5 adultes et 3 veaux). Une jument, 2 ânes et une mule sont utilisés pour le transport et la traction.

### 2.2. Caractéristique de l'installation

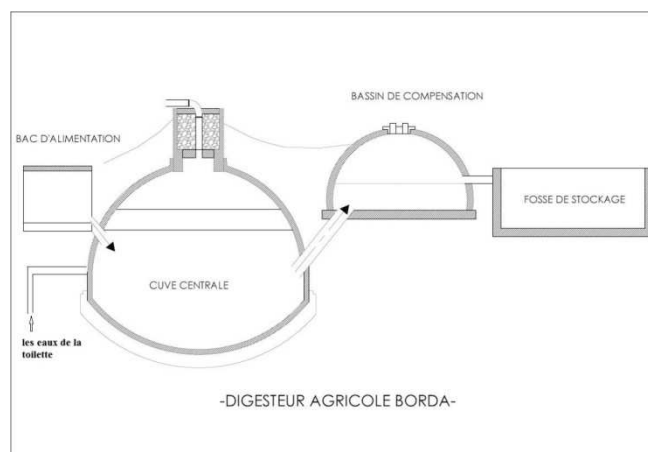


Figure (II.2) : schémas du digesteur agricole de la famille EL Houari

L'installation en question est un digesteur agricole de type digesteur à dôme hémisphérique avec un volume de 30 m<sup>3</sup>.

Il est constitué de quatre compartiments :

- Bac d'alimentation : le digesteur est alimenté par une quantité quotidienne du fumier et les eaux de la toilette
- Cuve centrale : c'est le lieu de la fermentation anaérobie elle est d'un volume de 30 m<sup>3</sup>, elle est constituée en brique de béton et elle est étanche vis-à-vis le gaz et l'eau,
- Cuve de compensation
- Fosse de stockage

C'est un procédé de fermentation anaérobie (en absence d'oxygène) à alimentation continue.

Le digesteur agricole de la famille El houari assure un double rôle :

Premièrement c'est le traitement des déchets organiques (fumier) et assainissement des eaux de la toilette afin de produire un digestat qui est comparable aux engrais chimiques.

Deuxièmement c'est la production de gaz à partir du traitement des déchets organiques (presque 5h de production dans les conditions optimales)

### 3. Analyse physico-chimique

#### 3.1.Mesure de la température

Le suivi en continu de la température d'un digesteur est essentiel afin de contrôler le bon déroulement de la fermentation et ce pendant une durée de trois mois.

##### Matériel

Thermomètre/pH-mètre portable *antichoc EcoScan* sonde thermocouple qui permet de connaître la température interne du digesteur.

##### Principe

La sonde doit être placée à l'intérieur du digesteur loin des parois de la cuve afin de mesurer une température moyenne de fermentation.

#### 3.2.Mesure du pH

Il s'agit ici de vérifier que le pH dans le réacteur est bien compris entre 6,5 et 7,5. Cette mesure donne une vision globale de l'acidité dans le réacteur. En effet, les boues d'alimentation sont en général assez acides (pH compris entre 4 et 6,5) et contiennent toutes sortes d'acides organiques et inorganiques.

##### Matériel

Thermomètre/pH-mètre portable *antichoc EcoScan* sonde thermocouple qui permet de connaître le pH interne au digesteur.



PHOTO N°2: Thermomètre/pH-mètre portable *antichoc EcoScan*

### Principe

La mesure de pH se fait sur des échantillons représentatifs du contenu du digesteur, ou on utilise une sonde pH qui permet de connaître le pH à l'intérieur du digesteur.

La sonde doit être placée à l'intérieur loin des parois de la cuve afin de donner une valeur moyenne du pH.

## **3.3.Mesure de l'alcalinité et de l'acidité**

### ***3.3.1. L'alcalinité dans un digesteur anaérobie***

L'alcalinité (concentration en bicarbonate  $\text{HCO}_3^-$ ) mesure le pouvoir tampon du digesteur ce dernier permet de connaître la capacité du milieu de fermentation à maintenir un pH stable autour de la neutralité afin d'éviter les risques d'acidification.

Une diminution de l'alcalinité peut être le reflet d'une augmentation en acides gras volatiles au sein du digesteur, produits du métabolisme des bactéries hydrolytiques strictement anaérobies qui sont les premières à agir dans le processus de dégradation anaérobie.

Une augmentation en acides gras volatiles dans le digesteur peut provenir de diverses causes :

- Surcharge de matière organique dans le digesteur
- Entrée de produits toxiques pour les bactéries
- Variation de la température.

On peut ajouter à cela qu'une variation de l'alcalinité se visualise au niveau du biogaz.

En effet, lorsque l'ion carbonate précipite avec les cations  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ , la concentration du  $\text{CO}_2$  dans le biogaz va avoir tendance à diminuer. La réaction suivante va être déplacée vers la droite :



**Mode opératoire :**

On filtre 25 ml de l'eau du digesteur. On en prend le pH et on additionne de l'acide sulfurique ou chlorhydrique jusqu'à  $\text{pH}=4$ , valeur qui correspond à la neutralisation des ions carbonates et bicarbonates.

On a alors :  $\text{meq Ac. ajouté} = \text{meq CaCO}_3$

Le résultat de cette formule nous donne la valeur de l'alcalinité en mg de  $\text{CaCO}_3/\text{l}$ , c'est à dire en ppm de  $\text{CaCO}_3$ .

### 3.3.2. L'acidité dans un digesteur anaérobie

**Principe :**

La mesure des AGV doit être effectuée sur un échantillon représentatif du mélange.

On désire mesurer la quantité d'acides gras volatiles contenue dans le digesteur. Ce paramètre nous renseigne plus particulièrement sur le bon fonctionnement des bactéries hydrauliques.

Il s'agit d'un simple dosage acido-basique une fois l'excès d'acide sulfurique et d'acide carbonique éliminé.

Dans notre cas on va analyser les AGV majoritaires de la fermentation (acide acétique, acide propionique et l'acide butyrique).

NB : Les analyses doivent s'effectuer après 24h du prélèvement

**Mode opératoire :**

A la suite de la mesure de l'alcalinité, on descend le pH jusqu'à 3,5. Ceci pour être sûr d'avoir bien neutralisé toute l'alcalinité. A ce moment, les acides responsables de la nature acide de l'échantillon sont :

- l'excès d'acide sulfurique
- l'acide carbonique

- les acides gras volatiles.

L'acide carbonique est éliminé en passant sous forme de CO<sub>2</sub> gazeux lors d'un chauffage à ébullition (1 à 2 minutes). L'acide sulfurique est ensuite éliminé par neutralisation avec de la soude jusqu'à pH=4. Les seules acides restants sont alors les acides gras volatiles qui correspondent au volume de soude utilisé pour ramener le pH de l'échantillon de pH=4 à pH=7.

On a alors :

$$\text{Acide gras volatile} = \frac{(V(\text{NaOH}) * N(\text{NaOH}) * 60) * 1000}{V \text{ échantillon}}$$

Le résultat est obtenu en mg d'acides volatiles.

### **3.3.3. Rapport de ces deux paramètres**

En général, pour s'assurer du bon fonctionnement d'un digesteur anaérobie, le rapport :

Acides volatiles/alcalinité doit se trouver autour de 0,5. C'est-à-dire, qu'il doit y avoir deux fois plus de sel de bicarbonate que d'acides organiques.

La récupération d'un digesteur acidifié peut s'accélérer par la neutralisation des acides par des substances basiques comme la soude caustique.

Cette neutralisation élève le pH à la valeur optimale pour la croissance des bactéries productrices de méthane et proportionne la capacité tampon (capacité d'amortissement) aidant à maintenir la relation acides volatiles/alcalinité et le pH requis.

Quand on neutralise un digesteur avec des composants chimiques, on doit calculer avec beaucoup de précautions les doses adéquates. En effet, si on n'en ajoute pas assez, le résultat sera inefficace. Si on en ajoute trop, cela pourra s'avérer toxique pour les bactéries.

## **4. Les indicateurs de pollutions :**

### **4.1.Demande Biochimique en Oxygène (DBO) :**

#### **Principe de fonctionnement**

La méthode respirométrique pour la Demande Biochimique en Oxygène (DBO) est un test fait à 20 °C (68 °F) dans un environnement contrôlé. La durée du test peut être de 5, 7 ou 10 jours, dépendant de l'analyse ou du protocole. Le test DBO mesure la quantité d'oxygène consommée par les bactéries qui oxydent les matières organiques dans un échantillon. Ce test est utilisé pour mesurer les quantités de déchets présents dans les rejets des installations d'épuration.

Les résultats du test DBO aident à déterminer les modes de consommation d'oxygène généraux. Ceci permet aux opérateurs d'estimer l'efficacité opérationnelle de l'usine et de déterminer des procédures de traitement correctes.

Les avantages de notre méthode de mesure de la DBO en tant qu'alternative à la méthode par dilution sont:

- Un temps réduit pour préparer un échantillon.
- Une diminution de la durée totale d'un test.
- La méthode respirométrique donne des résultats comparables à la méthode par dilution (DBO) en 2 ou 3 jours.
- L'étalonnage et la mesure de l'oxygène dissous ne sont pas nécessaires.
- Le test est facile à surveiller.
- L'échantillon est constamment remué et gardé dans des conditions naturelles.

Ceci a pour conséquences que les résultats de la méthode respirométrique est similaire aux conditions présentes dans un environnement naturel. La méthode par dilution ne fournit pas d'oxygène supplémentaire à l'échantillon. Ceci cause un pourcentage plus élevé de déplétion d'oxygène et un retardement possible des réactions biochimiques.

- La DBO peut être surveillée à tout moment parce que l'instrument indique constamment le résultat de la DBO. Les changements de pression dans le système sont indiqués très clairement en milligrammes par litre (mg/l) sur une règle graduée.
- La méthode respirométrique enlève le dioxyde de carbone du système afin que la différence de pression surveillée soit proportionnelle à la quantité d'oxygène utilisée (NaOH).
- Le dégazage peut causer des erreurs négatives lorsque la chaleur est appliquée sur un échantillon pour atteindre la température expérimentale. L'appareil s'adapte en fonction de cette circonstance. Le système ne commence pas le test tant que la température n'est pas en équilibre.

### **Transfer de l'oxygène dans l'échantillon**

Les bactéries de l'échantillon consomment de l'oxygène tout en consommant les matières organiques dans les bouteilles de l'échantillon. L'air présent dans la bouteille au-dessus de l'échantillon contient 21 % d'oxygène et réapprovisionne l'oxygène dissous consommé par les bactéries. Pendant la période du test, des bras agitateurs mélangent continuellement l'échantillon dans chaque bouteille. Ceci permet le transfert de l'oxygène de l'air à l'échantillon et aide à simuler les conditions naturelles.

### **Fonction du détecteur de pression**

Les bouteilles sont fermées hermétiquement pour empêcher que les changements de pression atmosphérique externes ne pénètrent dans la bouteille du test. Des détecteurs de pression surveillent la pression de l'air dans les bouteilles échantillons. Lorsque l'oxygène est consommé, la pression dans l'espace d'air situé au-dessus du liquide dans la bouteille diminue. La baisse de pression est en corrélation directe avec la DBO.

### **Suppression du dioxyde de carbone**

Du dioxyde de carbone est produit quand des micro-organismes oxydent des matières organiques dans l'échantillon. Le dioxyde de carbone doit être éliminé du système pour qu'il n'interfère pas avec la mesure. Une quantité de la soude placée dans un couvercle hermétique dans chaque bouteille échantillon avant le test éliminent le dioxyde de carbone.



**PHOTO N°3 : Suppression du dioxyde de carbone**

### **Mode opératoire.**

On prépare des échantillons convenables du mélange avec différentes dilutions :

#### Produit d'alimentation

Le mélange d'alimentation est trop chargé en matière organique et il est d'une couleur sombre (marron), c'est pour ce la on a fait trois dilutions du digestat 1/5 ,1/10 et 1/20 puis on les laisse agité environ 30 minute afin que la solution s'homogénéise :

Bouteille N°1=100ml+400ml ED → 500 ml agitation 30 min

Bouteille N°2=50ml+450ml ED → 500 ml agitation 30 min

Bouteille N°3=25ml+475ml ED → 500 ml agitation 30 min

#### Digestat

Le mélange du digestat est d'une couleur sombre (marron) c'est pour ce la on a fait trois dilutions du digestat 1/5 ,1/10 et 1/20 puis on les laisse agité environ 30 minute afin que la solution s'homogénéise :



PHOTO N°4 : préparation des dilutions



PHOTON°5 : agitions des différents dilutions

Bouteille N°4=100ml+400ml ED→500 ml agitation 30 min

Bouteille N°5=50ml+450ml ED→500 ml agitation 30 min

Bouteille N°6=25ml+475ml ED→ 500 ml agitation 30 min

### Ajustement de la valeur du pH



PHOTON°6 : Ajustement de la valeur du pH

Les valeurs du pH les plus favorables aux procédés biologiques se trouvent entre 6,5 et 7,5. Donc on utilise dans ce cas une solution diluée d'acide sulfurique à 96% afin de ramener le pH du mélange entre 6,5 et 7,5

### Température



L'échantillon doit être introduit dans l'enceinte à 20 °C.



**Photo N°7: introduire l'échantillon dans l'enceinte à 20°C**

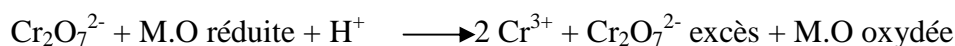
#### **4.2.Détermination de la demande chimique en oxygène (DCO)**

La DCO (Demande Chimique en oxygène) est une bonne estimation de la demande biochimique en oxygène ou DBO (qui indique la quantité d'oxygène utilisée par les microorganismes pour décomposer en conditions standards la matière organique dissoute dans l'eau). De plus, sa mise en oeuvre nécessite beaucoup moins de temps. En effet, la mesure de la DBO dure cinq jours tandis que celle de la DCO quatre heures environ.

La mesure de la DCO d'entrée et de sortie permet de calculer la quantité de matière organique consommée par le digesteur. De plus, j'ai expliqué plus haut que la concentration en matière organique devait toujours se trouver entre 20 000 et 25 000 ppm . En mesurant la DCO d'entrée et en connaissant donc la charge organique de l'alimentation, on peut finement réguler l'apport de matière organique à l'intérieur du digesteur afin que cette dernière se trouve toujours dans le domaine de concentrations donné plus haut.

##### **Principe :**

Dans la DCO, l'échantillon est soumis à un chauffage à ébullition (150 °C) en présence d'acide sulfurique et d'une quantité connue de dichromate de potassium. L'excès de dichromate est dosé avec du sel de Mohr ((SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>Fe(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>). La quantité de matière oxydable est proportionnelle à la quantité de dichromate consommée. La réaction d'oxydation est la suivante :



Et, on a la réaction de dosage en retour :



### Solutions:

- **Solution de dichromate de potassium 0,1 N** : ajouter à 500 ml d'eau distillée 4,913 g de dichromate anhydre, 167 ml d'acide sulfurique concentré et 3,3 g de sulfate de mercure. Dissoudre, laisser refroidir à température ambiante et compléter à 1000 ml.
- **Solution d'acide sulfurique** : ajouter du sulfate de plomb sur l'acide sulfurique concentré, dans les proportions de 5,3 g de sulfate de plomb pour 500 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.
- **Solution de ferroïne** : diluer 1,485 g de 1, 10-Fénantroline monohydraté et 695 mg de sulfate ferreux heptahydraté dans de l'eau distillée et diluer jusqu'à 100 ml.
- **Solution de sel de Mohr 0,01 N** : dissoudre 39,2 g de sulfate ferreux ammoniacal hexahydraté dans de l'eau distillée. Ajouter 20 ml d'acide sulfurique concentré. Laisser refroidir et diluer jusqu'à 1000 ml. Prendre 100 ml de cette solution et la diluer jusqu'à 1000ml.

### Mode opératoire :

Toutes les mesures doivent être effectuées en double. On prévoit quatre échantillons d'eau distillée, deux pour mesurer la normalité de la solution de sel de Mohr, deux pour les blancs.

1. Diluer l'échantillon au 1/1000e
2. Introduire dans un tube 2,5 ml d'échantillon.
3. Ajouter 1,5 ml de la solution de K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (oxydation de la matière organique).
4. Ajouter 3,5 ml d'acide sulfurique concentré.
5. On chauffe tous les tubes dans un bain-marie de 150 °C pendant 2 heures à l'exception d'un blanc (ce dernier sert à calculer la normalité N du sel de Mohr qui varie avec la lumière).
6. Bien laisser refroidir.
7. Ajouter 2 gouttes de ferroïne (indicateur coloré).
8. Titrer les échantillons au sel de Mohr

On obtient alors les résultats comme suit :

$$\text{Valeur de la normalité : } N = \frac{\text{Vol d'acide} \times \text{Normalité de l'acide}}{\text{Vol de sel de Mohr ajouté}}$$

$$\text{Valeur de la DCO : } DCO.(mg/l) = \frac{(A - B) \times N \times 8000 \times D}{\text{Volume de l'échantillon}}$$

Avec :

A = Volume du sel de Mohr lors du titrage du blanc.

B = Volume du sel de Mohr lors du titrage de l'échantillon.

N = titre du sel de Mohr.

D = facteur de dilution.

## 4.3. Mesure des éléments N, P, K

### 4.3.1. Mesure de l'azote N

#### Rappels théoriques

L'azote peut se présenter dans les eaux aussi bien sous forme minérale qu'organique. En général, s'agissant des eaux naturelles, ce sont les formes minérales qui sont de loin les plus importantes.

#### Définitions

Un certain nombre de termes doivent être précisés :

➤ *Azote total*

L'azote total comprend l'ensemble des formes azotées, aussi bien minérales qu'organiques.

➤ *Azote KJELDAHL*

L'azote KJELDAHL correspond à celui qui se trouve sous la forme de composés azotés organiques et d'ammonium. Il ne comprend donc pas des composés oxydés de l'azote tels les nitrates et nitrites, ni certaines autres formes, oximes, hydrazine, hétérocycles.

L'expression « azote KJELDAHL » trouve son origine dans le nom de celui qui a mis au point la méthode universelle utilisée pour doser les fractions azotées concernées.

➤ *Azote minéral*

L'azote minéral est constitué par l'ammoniaque, les nitrites, les nitrates.

➤ *Azote organique*

L'azote organique est essentiellement formé par des protéines, des polypeptides, de l'urée, des acides aminés.

➤ *Azote ammoniacal*

L'azote ammoniacal représente l'azote sous la forme  $\text{NH}_4^+$

#### Relation entre les diverses fractions azotées

Compte tenu des définitions ci dessus, il existe les relations suivantes entre les différentes fractions azotées :

$$N \text{ total} = N \text{ organique} + N \text{ minéral} \quad (1)$$

$$N \text{ KJELDAHL} = N \text{ organique} + N (\text{NH}_4^+) \quad (2)$$

$$N \text{ minéral} = N (\text{NH}_4^+) + N (\text{NO}_2^-) + N (\text{NO}_3^-) \quad (3)$$

La relation (2) permet ainsi de déterminer l'azote organique à partir de la mesure de l'azote KJELDAHL et de l'azote ammoniacal.

$$\text{On a en effet : } N \text{ organique} = N \text{ KJELDAHL} - N (\text{NH}_4^+) \quad (4)$$

#### Manipulation

Elle consiste à effectuer le dosage de l'azote KJELDAHL, puis celui de l'azote ammoniacal et d'en déduire l'azote organique à l'aide de la relation :

$$N_{\text{organique}} = N_{\text{KJELDAHL}} - N_{\text{NH}_4^+}$$

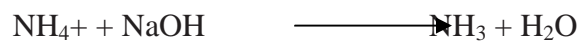
### Dosage de l'azote kjeldahl

#### Principe

L'azote organique est minéralisé sous forme de sulfate d'ammonium par l'action conjuguée de l'acide sulfurique et de catalyseurs de minéralisation. Le schéma de la réaction est le suivant :



Les ions  $\text{NH}_4^+$  qui résultent de cette minéralisation, ainsi que ceux qui préexistaient dans l'eau, sont transformés ensuite en ammoniac par une lessive de soude.



L'ammoniac est alors entraîné par un courant de vapeur vers une solution de piégeage où il pourra être dosé par simple acidimétrie.



#### Produits, matériel et instrumentation

- Produits*
- Catalyseur de minéralisation ;
- Acide sulfurique concentré (produit dangereux) ;
- Solution d'acide borique agent anti moussant ;
- Solution d'acide sulfurique 0,1 N ;
- Lessive de soude à 300 g/l (produit dangereux) ;
- Indicateur coloré.
- Matériel*
- Tubes de minéralisation ;
- Burette de 25 ml ;
- Pipettes de 10 et 25 ;
- Jaugé de 100 ml ;

#### 4.3.2. Mesure de P, K

La mesure de phosphate P et potassium K est assurée par une technique ICP qui est une méthode d'analyse par spectrométrie d'émission atomique dont la source est un plasma généré par couplage inductif.

- **Description d'un spectrophotomètre d'émission à source plasma**

## **Principe de fonctionnement du spectrophotomètre d'émission à source plasma**

L'ICP\* est une méthode d'analyse par spectrométrie d'émission atomique dont la source est un plasma généré par couplage inductif.

\*ICP= raccourci pour "ICP-AES"= "Inductively-Coupled-Plasma/ Atomic-Emission-Spectrometry", ou encore OES, pour Optical Emission, car les raies analysées sont souvent des raies ioniques et pas seulement atomiques.

### **Notion du plasma**

"Dans les années 1920, Langmuir et Tonks ont introduit le mot de plasma pour désigner un gaz ionisé électriquement neutre, produit dans des tubes à décharge [...]. On peut considérer que le plasma constitue un quatrième état de la matière, faisant suite aux trois états solide, liquide et gaz [...]. Les plasmas conservent certaines propriétés des gaz (compressibilité, pression proportionnelle à la température absolue, ...), par contre, les propriétés électromagnétiques en diffèrent du fait de la présence d'électrons en mouvement". (D'après Mermet & Trassy, Rapport du CAST).

En analyse, les plasmas constituent des sources de températures plus élevées (8000 à 10000K) que celles produites par les flammes et autres décharges (arc ou étincelle). Les plasmas ont donc été utilisés depuis les années 1970 en spectrométrie d'émission atomique, en remplacement des flammes classiques.

Le rôle du plasma, dans l'analyse par émission optique, est de casser les liaisons moléculaires pour produire des ions et atomes libres, et d'exciter ces particules.

Des développements plus récents (à partir de 1985) ont conduit à utiliser aussi cette source d'ions que constitue le plasma en tant que source d'un spectromètre de masse: il s'agit alors de "spectrométrie de masse à source plasma" (ICP-MS, pour ICP Mass Spectrometry).

- **L'appareillage**

L'appareillage comprend:

= une source de nébulisation / atomisation / excitation de l'échantillon; elle comprend générateur H.F., torche et nébuliseur

= un dispositif dispersif (monochromateur et/ ou polychromateur) pour analyser le rayonnement émis par l'échantillon;

= un ensemble électronique / informatique pour la gestion des spectromètres et l'exploitation des données.

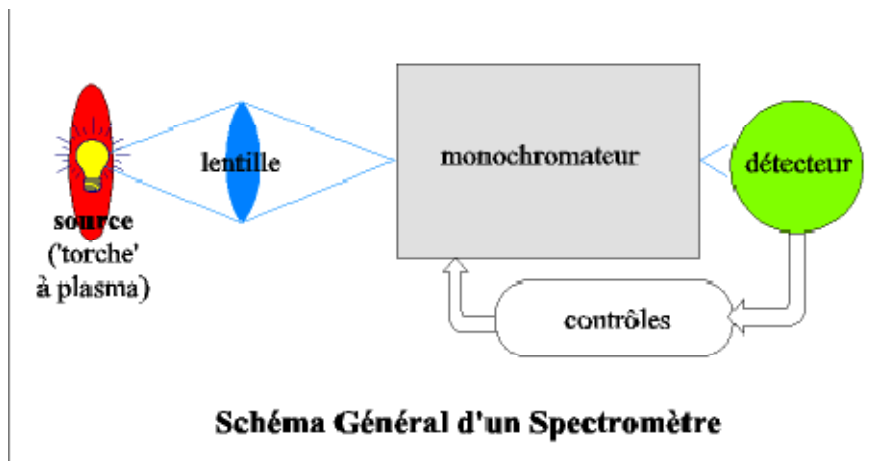


Figure (II.3) : Schéma d'un appareillage d'analyse par émission: source/ dispersion/ détection:

Source : ICP-AES Bases

## 5. LES ANALYSES BACTERIOLOGIQUE

### 5.1. Mesures des indicateurs de pollution fécale

Les indicateurs de pollution fécale pris en compte dans cette partie sont uniquement les coliformes (dits coliformes totaux (CT)), les coliformes thermotolérants (CTT) et les streptocoques fécaux (SF).

Les méthodes utilisées pour la détermination des indicateurs de pollution fécale sont multiples.

Les critères de choix d'une technique dépendent de l'origine, de la nature de l'eau à examiner (eau de forage ou de puits, eau trouble, eaux usées, etc.), des facteurs relatifs à la qualité des résultats et des facteurs relatifs au coût des analyses. Les méthodes classiques utilisées sont :

- La filtration sur membrane ;
- L'étalement ;
- L'incorporation en gélose ;
- La dilution en milieu liquide ou le Nombre le plus probable (NPP).

### 5.1.1. Méthodes par filtration sur membrane et par étalement

#### 5.1.1.1. Méthode par filtration

La technique par filtration n'est pas appropriée pour des eaux usées brutes à cause de la charge bactérienne très élevée et de la teneur excessive en matières en suspension (MES) pouvant provoquer le colmatage de la membrane. Elle convient plutôt aux eaux très peu chargées en matières particulaires telles que les eaux potables.

#### *Principe*

Le principe repose sur 4 étapes qui sont la filtration, la culture, l'incubation et le dénombrement des colonies.

- La filtration d'un volume donné d'échantillon sur une membrane de cellulose stérile de  $0,45\mu$  de porosité. La prise d'essai maximale est fonction de la filtrabilité de l'eau et de la porosité des membranes utilisées. En général, une prise de 100 ml est suffisante avec une membrane dont les pores ont un diamètre moyen de  $0,45\mu$ .

*Nota : Il s'agit d'utiliser une quantité d'échantillon ou une dilution de façon à obtenir moins de 100 unités formant colonies (ufc) sur une membrane de 47 ou 50 mm de diamètre.*

- le dépôt de la membrane sur un milieu gélosé sélectif ;
- l'incubation aux températures et temps convenables ;
- le dénombrement des ufc dans le volume de référence choisi.

#### *Filtration*

- *Schéma*

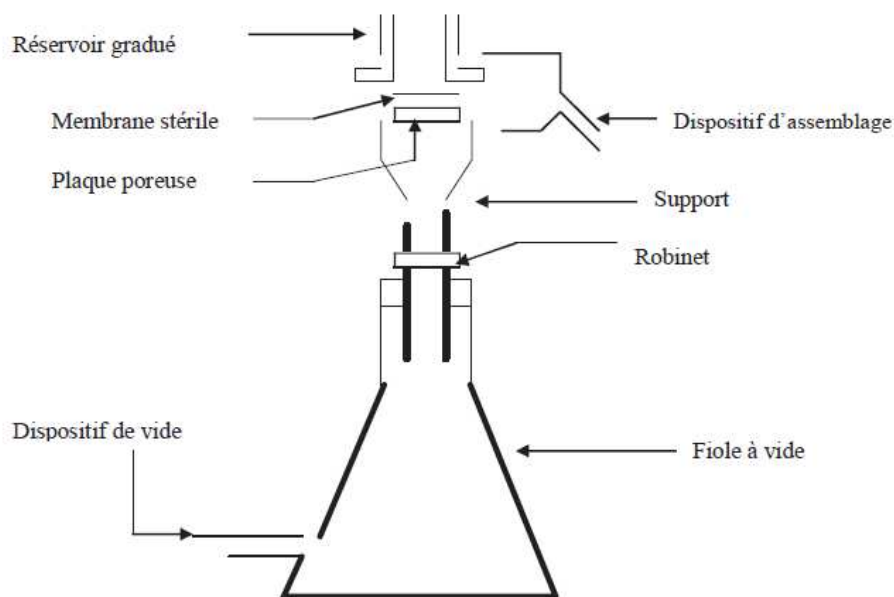


Figure (II.4) : schéma de la filtration (sous vide)

- *Préparation du dispositif et technique de filtration*

- Relier le dispositif de filtration à une source de vide (pompe ou trompe à eau) ;
- Brancher la pompe à une prise de courant ;
- Ouvrir le robinet du dispositif de filtration ;
- Enlever le réservoir et stériliser à la flamme la surface du support poreux, ainsi que le réservoir ;
- Laisser refroidir en y versant de l'eau distillée et laisser la pompe aspirer ;
- Fermer le robinet et remettre le réservoir sur le support ;
- Placer, à l'aide d'une pince préalablement passée à la flamme puis refroidie, une membrane stérile (la tenir seulement par le bord extérieur) sur la base du support poreux ;
- Rincer à l'eau distillée stérile le réservoir et la membrane filtrante tout en maintenant l'arrivée fermée ;
- Homogénéiser bien l'échantillon et verser ou transférer à l'aide d'une pipette un volume V connu d'échantillon ;
- Ouvrir le robinet et faire un vide pour filtrer lentement l'eau à travers la membrane ;
- Refermer aussitôt le robinet après que tout l'échantillon ait été filtré ;
- Retirer le réservoir et ensuite la membrane et la déposer sur le milieu de culture.

*Note : Faire attention en déposant la membrane pour ne pas emprisonner de bulle d'air entre celle-ci et le milieu.*

*Si cela se produisait, soulever légèrement la membrane en la tenant par le bord et la redéposer très doucement pour éliminer la bulle d'air.*

*Pour différentes dilutions d'un même échantillon commencer toujours la plus forte dilution. Le réservoir peut être réutilisé sans désinfection entre 2 dilutions. Pour filtrer un autre échantillon, désinfecter ou rincer abondamment à l'eau distillée le réservoir et le support poreux.*

#### **5.1.1.2.Méthode par étalement**

C'est une technique qui est utilisée pour l'analyse des eaux usées brutes et des eaux à forte charge bactérienne. Dans ce cas, des dilutions sont nécessaires car elle utilise de très faibles volumes à cause de la charge bactérienne souvent très élevée. La méthode par étalement n'a aucun sens pour les eaux de forage.

##### ***Principe***

- Etalement en surface d'une prise d'essai de 0,1 à 0,5 ml sur un milieu gélosé ;



- Dilution de sorte que le nombre présumé de colonies formées soit compris entre 25 et 300 ;
- Incubation à température et temps convenables ;
- Dénombrement des colonies typiques ;
- Expression des résultats selon la formule en 1,5.

### ***Etalement***

- La technique requiert certaines précautions :
- Sécher au préalable, à l'étuve à 37°C, les milieux gélosés afin de faire évaporer l'eau de cristallisation ;
- Vérifier que la surface est complètement sèche sinon on obtient une « pâte de colonies » sur la boîte de pétri ;
- Déposer un volume donné d'échantillon bien homogénéisé à la surface de la gélose à l'aide d'une pipette graduée ;
- Etaler aussitôt et de façon uniforme à l'aide d'un étaleur en verre rodé sur toute la surface (utiliser 2 boîtes par dilution).

### **Incubation**

L'incubation peut se faire en un ou deux temps selon les indications pour chaque microorganisme ou groupe de microorganismes : soit 2 à 4 h pour permettre la revivification des organismes en état de choc et ensuite incubation normale.

Au cours de l'incubation, il faut veiller à retourner les boîtesensemencées et étiquetées, et à les placer dans un incubateur selon les temps et températures indiqués pour chaque groupe de microorganismes recherchés.

### **Dénombrement ou comptage des colonies**

Après incubation, les boîtes de pétri ou les membranes doivent être examinées immédiatement.

On compte les colonies (ufc) en fonction des organismes recherchés sur les milieux sélectifs ou non, à l'aide d'un compteur de colonies ou à défaut d'un marqueur indélébile sur le revers de la boîte de pétri.

Note : S'il n'est pas possible de compter les colonies après incubation, les boîtes de pétri ou les membranes doivent être conservées à 4 ou 5°C durant de courtes périodes. Mais ceci entraîne souvent une modification de l'apparence (notamment la couleur) des colonies.

### **Expression des résultats**

Chaque colonie est supposée provenir d'un seul microorganisme ou d'un amas de microorganismes. Le résultat est donc exprimé par le nombre d'unités génératrices de colonies dans la quantité de référence spécifiée d'échantillons (généralement 100 ml ou 1 ml), selon la formule ci-dessous :

Avec : N = nombre d'unités génératrices (formant) de colonies dans le volume de référence

$\Sigma N$  = somme de toutes les colonies comptées dans les boîtes ou sur les membranes provenant des dilutions  $d_1, d_2, \dots, d_i$  ;

$n_1, n_2, \dots, n_i$  = nombre de boîtes comptées pour les dilutions  $d_1, d_2, \dots, d_i$  ;

$v_1, v_2, \dots, v_i$  = volumes de prise d'essai pour les dilutions  $d_1, d_2, \dots, d_i$  ;

$d_1, d_2, \dots, d_i$  = dilutions utilisées pour les prises d'essai  $v_1, v_2, \dots, v_i$  ( $d = 1$  pour un échantillon non dilué,  $d = 0.1$  pour une dilution au 1/10, etc....).

$V_s$  = la quantité de référence choisie pour exprimer la concentration de l'échantillon en microorganismes.

### **3.2.2. Méthode par ensemencement en milieu liquide ou du nombre le plus probable**

(NPP) Elle est utilisée le plus souvent dans le cas des eaux troubles.

#### ***Principe***

Le principe de la méthode NPP consiste à ensemencer de nombreuses prises d'essai d'un même échantillon et/ou de dilutions de celui-ci dans des tubes de milieu de culture liquide.

Les prises d'essai de l'échantillon ou des dilutions, sont donc incorporés dans une première série de tubes de milieu non véritablement sélectif : c'est le *test de présomption* (croissance ou non). Ce premier test est qualitatif et permet de conclure seulement à la présence ou à l'absence de microorganismes dans la prise d'essai.

On ensemence une deuxième série de tubes de milieu plus sélectif en repiquant les tubes ayant donné un résultat positif dans la première série : c'est le *test de confirmation*.

A partir de ces résultats, on estime la quantité de microorganismes après détermination du NPP.

### ***Estimation du NPP***

On suppose que pendant l'incubation, chaque tube ayant reçu un ou plusieurs organismes avec l'inoculum présentera une croissance qui provoquera ou non des modifications caractéristiques dans le milieu. Le NPP ne peut être estimé qu'à partir du nombre de tubes positifs. La précision est la « force » de cette méthode et dépend du nombre de tubesensemencés : elle croît comme une fonction de la racine carrée du nombre de tubes utilisés.

### ***Prise d'essai***

Il faut veiller à ce que l'ajout de la prise d'essai ne modifie pas la composition du milieu au point de perturber de façon notable la croissance des microorganismes recherchés. Pour cela :

- des volumes inférieurs à 1 ml sont normalement ajoutés à des milieux dits simple concentration ;
- les prises d'essais comprises entre 1 et 50 ml sont ajoutées à des volumes égaux de milieu double concentration (par exemple, 10 ml d'échantillon sont ajoutés à 10 ml de milieu double concentration) ;
- des milieux plus concentrés peuvent être utilisés pour des quantités supérieures à 50 ml

### ***Ensemencement***

On utilise habituellement 3 ou 5 tubes dans chaque série pour chaque dilution. Au minimum 3 séries successives de tubes doivent être utilisées bien que la précision augmente avec le nombre de tubes.

#### ***Ensemencement des milieux présomptifs***

##### ***➤ Milieu simple concentration***

- Prendre 3 tubes (16 mm \* 160 mm) du même milieu présomptif simple concentration et transférer 1 ml d'échantillon dans chacun d'eux ;
- Transférer 1 ml d'échantillon de chaque dilution dans chacun des 3 tubes (16 mm \* 160 mm) pour chacune des dilutions effectuées (10-1, 10-2, 10-3, etc.) ;
- Changer de pipette pour chaque dilution et bien mélangé par retournement plusieurs fois ;
- Faire incuber les tubesensemencés à l'étuve thermostatée et réglée à la température de 37°C durant 24 h ou 48 h ;
- Observer d'abord le changement de couleur ou non dans les tubes ;
- Observer ensuite le trouble dans le milieu, dû à la croissance des bactéries présentes ;
- Observer enfin la production de gaz traduite par le soulèvement de la cloche de Durham introduit dans le milieu (au moins 1/10 de la cloche devra être vide).

➤ *Milieu double concentration*

- Prendre 3 tubes du milieu (20 mm \* 200 mm) du milieu présomptif choisi ;
- Transférer dans chacun des tubes 10 ml d'échantillon bien homogénéisé avec une pipette de 10 ml.

*Incubation et lecture*

- Faire incuber les tubesensemencés aux températures et temps convenables selon le microorganisme recherché.
- Procéder à la lecture, après le temps d'incubation, en considérant comme « positif » tous les tubes ayant présenté d'abord un trouble du à une croissance microbienne et ensuite ayant présenté les caractéristiques des germes recherchés (dégagement de gaz, dépôt, etc.).

*Ensemencement des milieux confirmatifs*

- A partir de chaque tube de milieu présomptif ayant donné un résultat positif, ensemenecer avec une anse bouclée ou une pipette pasteur les milieux confirmatifs.

➤ *Incubation et mesure*

Faire incuber selon les germes recherchés et considérer comme positifs les tubes présentant un trouble visible et les caractéristiques des microorganismes recherchés.

***Expression des résultats***

On recherche le nombre le plus probable (NPP) ; pour cela, il faut déterminer le nombre de tubes positifs correspondants à 3 dilutions consécutives. Ces dilutions sont choisies selon les règles suivantes :

*Il existe une ou plusieurs dilutions révélant 3 tubes positifs*

- Choisir la dilution la plus forte (celle contenant la plus faible concentration de l'échantillon) révélant 3 tubes positifs, ainsi que les deux plus fortes dilutions qui suivent immédiatement.
- Choisir les 3 plus fortes dilutions de la série (celles qui ont la plus faible concentration en échantillon) au cas où il aurait été préparé un nombre insuffisant de dilutions au-delà de la dilution la plus forte révélant 3 tubes positifs.

*ii. Il n'existe aucune dilution révélant 3 tubes positifs*

- Retenir la dilution correspondant à la plus forte concentration de l'échantillon et les deux dilutions qui suivent immédiatement.

*iii. Cas particuliers*

- Si un résultat positif est noté pour une dilution plus grande que la dernière ainsi choisie, il faut l'ajouter à celle-ci ;
- Si enfin, le nombre de tubes positifs est très réduit, choisir le nombre caractéristique de façon à ce que la dilution positive occupe le rang des dizaines.
- Le tableau n° 3, page suivante récapitule les différents cas cités.

Tableau N°3 : illustrations des règles pour le choix des dilutions

Dilutions	10 <sup>0</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	Résultats	Cas cités
nombre de tubes positifs	3	3	2	1	0	0	321	Premier point du cas i
	-	3	3	3	3	0	330	
	-	3	0	1	0	0	301	Deuxième point du cas i
	2	0	0	0	0		200	
	2	2	2	2	0		222	Cas ii
	-	3	3	2	1	2	323	Premier point du cas iii
	-	-	0	1	0	0	010	Deuxième point du cas iii

Source : [www.ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/pdf/MA700Ectm10.pdf](http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/pdf/MA700Ectm10.pdf)

Il existe des tables NPP qui indiquent les combinaisons de résultats de tubes négatifs et positifs qu'il est probable de rencontrer. Le tableau ci-dessous donne des indices NPP par 100 ml d'échantillons et limites de confiance à 95% (avec 3 séries de 5 tubes contenant 10, 1, et 0.1 ml d'échantillon).

Tableau N°4 : indices NPP par 100ml d'échantillons et limites de confiance à 95%

Combinaisons de tubes positifs	NPP par 100ml	Limites de confiance à 95%		Combinaisons de tubes positifs	NPP par 100ml	Limites de confiance à 95%	
		Inf.	Sup.			Inf.	Sup.
0-0-0	< 2	-	-				
0-0-1	2	1.0	10	4-3-0	27	12	67
0-1-0	2	1.0	10	4-3-1	33	15	77
0-2-0	4	1.0	13	4-4-0	34	16	80
1-0-0	2	1.0	11	5-0-0	23	9.0	86
1-0-1	4	1.0	15	5-0-1	30	10	110
1-1-0	4	1.0	15	5-0-2	40	20	140
1-1-1	6	2.0	18	5-1-0	30	10	120
1-2-0	6	2.0	18	5-1-1	50	20	150
2-0-0	4	1.0	17	5-1-2	60	30	180
2-0-1	7	2.0	20	5-2-0	50	20	170
2-1-0	7	2.0	21	5-2-1	70	30	210
2-1-1	9	3.0	24	5-2-2	90	40	250
2-2-0	9	3.0	25	5-3-0	80	30	250
2-3-0	12	5.0	29	5-3-1	110	40	300
3-0-0	8	3.0	24	5-3-2	140	60	360
3-0-1	11	4.0	29	5-3-3	170	80	410
3-1-0	11	4.0	29	5-4-0	130	50	390
3-1-1	14	6.0	35	5-4-1	170	70	480
3-2-0	14	6.0	35	5-4-2	220	100	580
3-2-1	17	7.0	40	5-4-3	280	120	690
4-0-0	13	5.0	38	5-4-4	350	160	820
4-0-1	17	7.0	45	5-5-0	240	100	940
4-1-0	17	7.0	46	5-5-1	300	100	1300
4-1-1	21	9.0	55	5-5-2	500	200	2000
4-1-2	26	12	63	5-5-3	900	300	2900
4-2-0	22	9.0	56	5-5-4	1600	600	5300
4-2-1	26	12	65	5-5-5	?	-	-
					1600		

Source : [www.ceaq.gouv.qc.ca/methodes/pdf/MA700Ectm10.pdf](http://www.ceaq.gouv.qc.ca/methodes/pdf/MA700Ectm10.pdf)

*Note : Pour des raisons d'une mauvaise mise en œuvre de la technique, les tables peuvent ne pas donner les combinaisons probables. Dans ce cas, les valeurs NPP pour les combinaisons de réactions négatives et de réactions positives non indiquées dans les tables peuvent être calculées par l'application de la formule suivante :*

$$\text{NPP} = \frac{\text{Nbre de tubes} * \text{volume de référence de l'échantillon (ml)}}{\text{volume d'échantillons}} \frac{\text{dans tous les tubes avec} * \text{dans tous les tubes avec}}{\text{des réactions négatives} \quad \text{des réactions positives}}$$

## CHAPITRE III

### RESULTATS ET DISCUSSIONS

---

#### 1. Suivi de la température

Le suivi en continu de la température à durée trois mois, du début avril jusqu'à la fin du mois de juillet. ce suivi s'est effectué en deux point différents, à l'entrée du digesteur (bac d'alimentation) et à sa sortie (bassin de compensation).

Les résultats obtenus sont représentés dans le graphe ci-dessous:

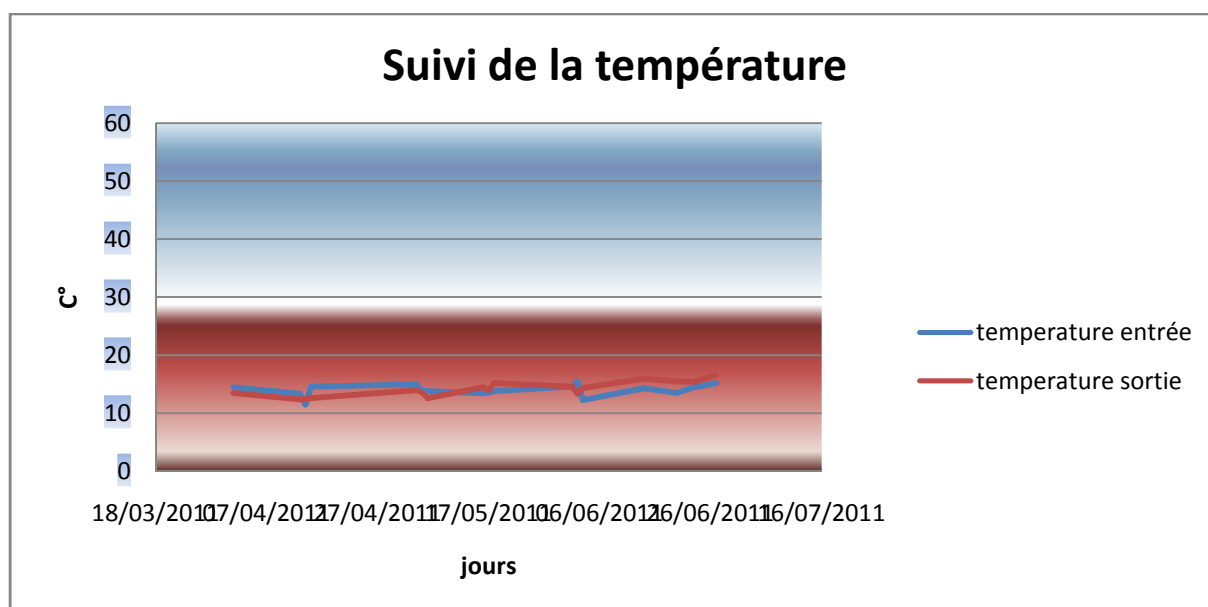


Figure (III.1) : graphe du suivi de la température pendant trois mois : avril-juin

#### Interprétations :

La température reste un paramètre clé pour le bon fonctionnement du système anaérobie, elle influence la cinétique des réactions enzymatiques. Les réactions de dégradation de la matière organique étant athermiques, elles nécessitent un apport de chaleur extérieure afin de maintenir la température à l'optimum désiré pour assurer le bon fonctionnement du digesteur anaérobie. (Angelidaki *et al.*, 1997 )



Nous remarquons d'après le graphe que la température du mélange d'alimentation reste fixée dans un intervalle entre + 12°C et + 15°C. Par contre la température dans la cuve de compensation varie autour d'une valeur optimale relative +12,2 et +16,2.

On peut déduire de ces résultats que le système de la digestion fonctionne dans la zone psychrophile c'est-à-dire dans une température de +4°C à +25°C.

Sans oublier les autres zones de température :

Mésophile : 20°C < T < 45°C avec optimum pour 35°C,

Thermophile : 45°C < T < 65°C avec optimum pour 55°C.

L'augmentation de la température entraîne une augmentation des vitesses de dégradation, en particulier de la phase d'hydrolyse, sans influence particulière sur la biodégradabilité ou le rendement en méthane car les voies métaboliques restent les mêmes jusqu'à 65°C.

## 2. Suivi du PH

Le suivi du pH quant à lui a duré 3 mois, une période s'étalant du mois d'avril- jusqu'au juin. Ce suivi a été réalisé en deux points différents à savoir le bac d'alimentation et la fosse de stockage.

Le graphe mentionné ci-dessous montre la variation du pH pendant les trois mois de suivi du digesteur agricole.

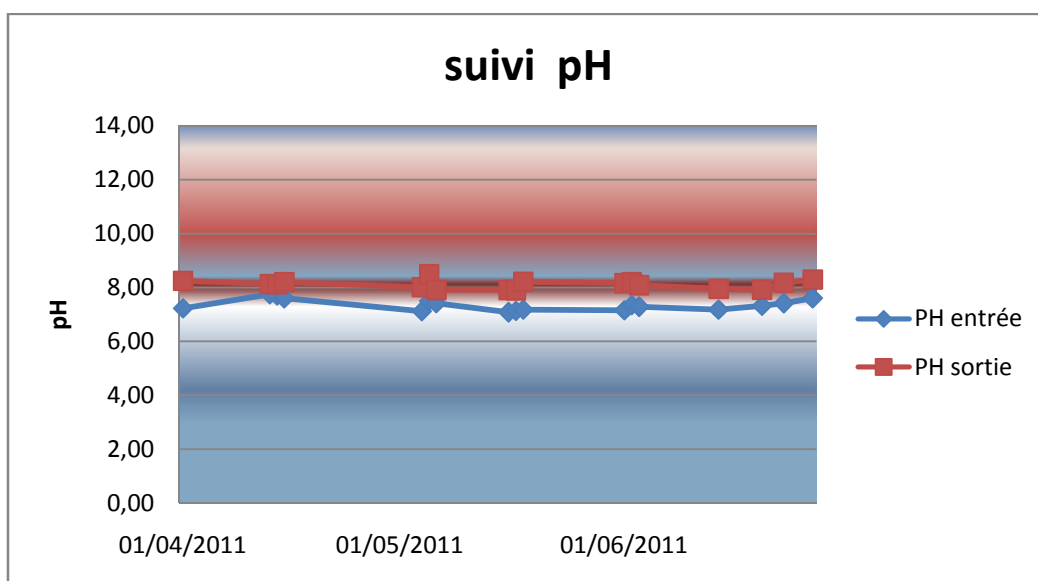


Figure (III.2): graphe du suivi du pH pendant trois mois avril-juin

## **Interprétation :**

Le graphique montre que la valeur du pH entre le bac d'alimentation et la fosse de stockage est entre 6,5 et 8 ce qui indique que le digesteur offre aux bactéries responsables de la digestion anaérobie les conditions favorables c'est-à-dire un pH optimale entre 6,5 et 8,5.

Le graphe (N° III.2) montre que la valeur du pH du digestat est plus élevée par rapport au pH du fumier brut, donc il est moins acide que celui du fumier. De ce fait, ces résultats prouvent la capacité du digestat à conservé les feuilles des plantes qui sont moins « brûlées » par l'acidité

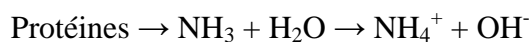
Donc la gamme des pH permettant un déroulement normal de la fermentation méthanique est liée aux conditions optimales de vies des microorganismes responsables des différentes réactions métaboliques.

On observe des différences entre les populations bactériennes. Ainsi les acétogènes sont les plus sensibles aux variations de pH (optimum de croissance de 7,2), alors que les méthanogènes peuvent accepter des variations de pH entre 6 et 8. Les bactéries acidogènes s'adaptent facilement à des pH aux alentours de 4.

Généralement, on considère que les variations doivent être maintenues dans une fourchette située entre 6,4 et 7,8 pour que les fermentations soient stables.

La régulation du pH est assurée principalement par les bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) (**Morelli et Rindome, 1990**) et dans une faible mesure par les ions phosphates ( $\text{HPO}_3^-$ ) (**Florencio *et al.*, 1996**).

A un pH voisin de la neutralité, la formation des ions  $\text{HCO}_3^-$  est principalement due à l'interaction entre les ions  $\text{NH}_4^+$  provenant de la dégradation des protéines et le  $\text{CO}_2$  dissous, suivant les réactions :



Ces ions permettent de neutraliser les acides organiques, libérés.

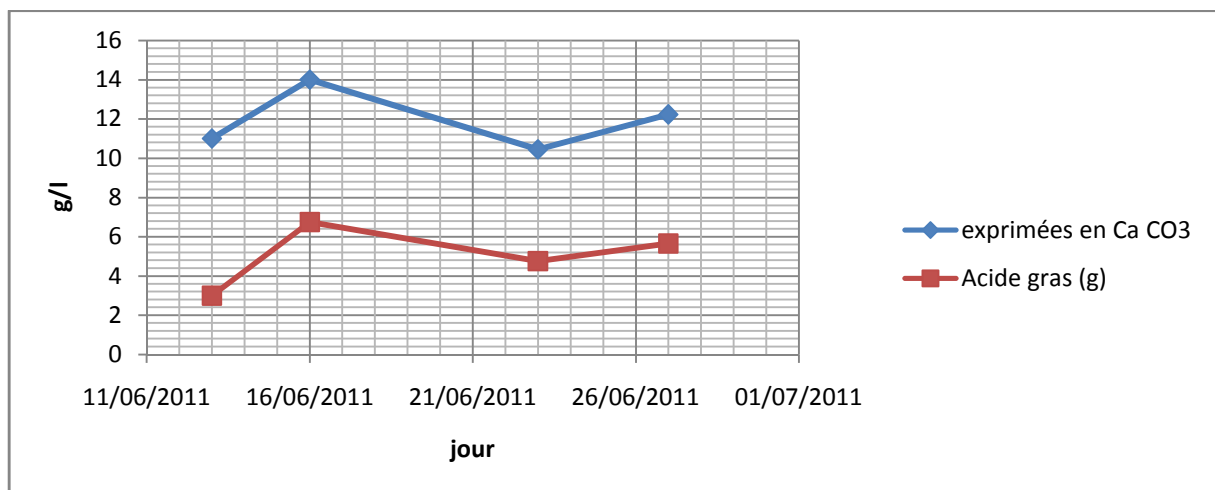
Ces résultats obtenus en pratique viennent consolider des résultats d'études réalisées par **Kupper et Fuchs (2007)**, sur l'effet du traitement anaérobie sur le pH du digestat et leur utilisation dans l'agriculture.

### 3. Mesure de l'alcalinité/acidité

Afin de s'assurer le bon fonctionnement du système du digesteur agricole. Le tableau suivant regroupe quatre mesures d'alcalinité et acidité.

Tableau N°5 : résultats des mesures d'alcalinité et acide gras

Date	Alcalinité exprimées en (g) CaCO <sub>3</sub>	Acide gras (g/l)	acidité /alcalinité
13/06/2011	11	3	0,272727273
16/06/2011	14	6,75	0,482142857
23/06/2011	10,45	4,76	0,455502392
27/06/2011	12,23	5,66	0,462796402



Figure(III.3) : graphe des mesures de concentration Ca CO<sub>3</sub> et les acide gras

Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau ci-dessus, ils révèlent la variation de concentration des acides gras volatiles et l'alcalinité du mélange d'entrée du digesteur.

On peut remarquer aussi que le digesteur à un bon pouvoir tampon, c'est-à-dire la capacité à maintenir le pH à une valeur donnée. Ceci peut se traduire par ; plus l'alcalinité sera forte, plus le pH sera stable, et pour notre cas on arrive à une alcalinité de 14g .

L'analyse du graphe montre qu'il n'y a pas d'accumulation de la teneur en Acide Gras Volatils majoritaire (acide propionique, acide acétique, acide butyrique) qui sont responsables s'ils se présentent en abondance de l'arrêt de l'étape de la méthanogènes donc un arrêt de la production du méthane, et par la suite une induction de l'arrêt du mécanisme de la fermentation anaérobie. (**Van Lier *et al.*, 1997**).

En condition de surcharge d'un digesteur ou en présence d'inhibiteurs, l'activité méthanogène ne consomme plus l'acétate et l'hydrogène aussi vite qu'ils sont produits. Il en résulte une accumulation d'AGV entraînant une diminution du pH qui aurait un effet inhibiteur du mécanisme qui conduit à la dégradation de la matière organique.

On remarque aussi que le rapport AC/AL est aux alentours de 0,5. Ceci indique que le digesteur fonctionne correctement et répond aux normes indiquées précédemment. (**Mawson *et al.*, 1991**).

#### **4. Suivi de la demande biochimique en oxygène (DBO5)**

En ce qui concerne le suivi du DBO5, plusieurs mesures ont été effectuées afin de vérifier la teneur en matière organique au niveau des différents points du digesteur agricole (mélange d'alimentation, bassin de compensation ainsi la fosse de stockage).

Le choix des trois points est défini comme suite :

- 🔹 La différence de la DBO5 entre le bac d'alimentation et le bassin de compensation indique le taux de dégradation de la matière organique par le digérateur c'est à dire le traitement anaérobie
- 🔹 La différence de la DBO5 entre le bassin de compensation et la fosse de stockage indique le taux de dégradation de la matière organique c'est la phase de maturation ou on peut avoir un produit presque stable
- 🔹 La différence de la DBO5 entre le bac d'alimentation et la fosse de stockage indique le taux de dégradation de la matière organique par la totalité du procédé

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

Tableau N°6 : Suivi de la demande biochimique en oxygène des échantillons DBO5

Date	Localisation					
	Bac d'alimentation		Bassin de compensation		Fosse de stockage	
	DBO5 (mg/l)	pH	DBO5 (mg/l)	pH	DBO5 (mg/l)	pH
18/05/2011	8500	7,2	1550	7,8		
27/05/2011	9200	6,9	1300	7,6	1200	8,2
13/06/2011			1600	8,1	1150	8,01
16/06/2011	9550	7,2	1400	8		
23/06/2011	7600	7,75	1700	8,6	1180	7,9
27/06/2011	8500	7,7	1350	8,35	1100	7,65
moyenne	8670		1483,33		1157,5	

D'après le tableau nous avons pu dégager une idée sur la dégradation de la matière organique qui est facilement biodégradable.

Après les mesures de la DBO5 nous avons noté que :

- 82,9% de la matière organique se dégrade entre le bac d'alimentation et le bassin de compensation,
- 86,7% de la matière organique se dégrade entre l'entrée et la fosse de stockage

Exemple de suivi de la DBO5 (le 18/05/2011)

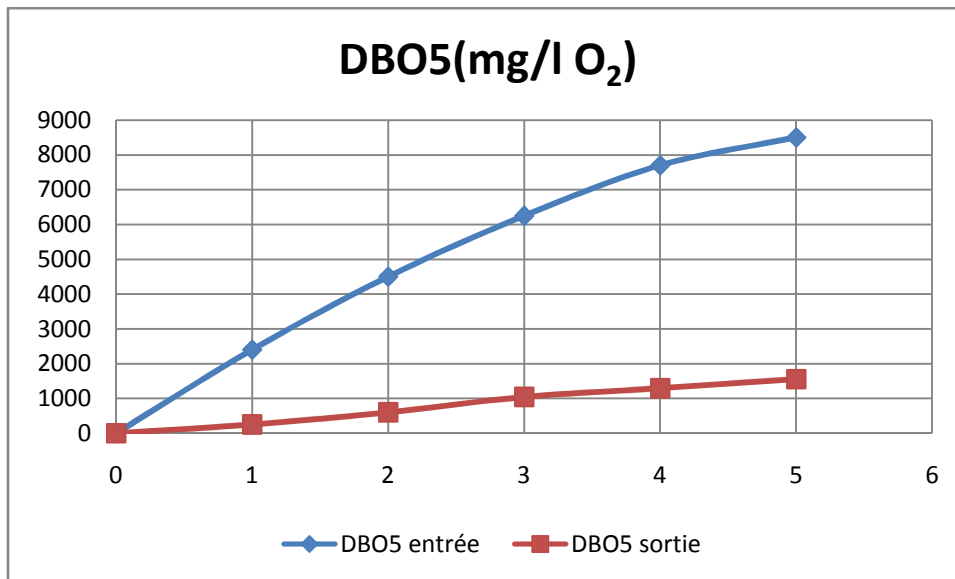


Figure (III.4): graphe du suivi de la consommation d'oxygène pendant 5 jours (fumier +l'eau) et digestat

D'après le graphique on remarque que le digesteur anaérobie est alimenté par un mélange de fumier caractérisé par une DBO5 de presque 8500 mg/l(O<sub>2</sub>) et un digestat à la sortie qui se caractérise par une DBO5 de 1550 mg/l(O<sub>2</sub>).Donc une dégradation de presque 82% de la matière organique facilement biodégradable.

D'après ces résultats de la mesure de la DBO5 on peut dire que le digesteur agricole installer au douar à un taux de dégradation de la matière organique important, une réduction de 80% à peu près (Aveni, 1984).

## 5. Mesure de la Demande Chimique en Oxygène DCO.

L'objectif de la mesure est d'avoir une idée sur la biodégradation d'un échantillon est non pas la réalisation d'un suivi de la DCO.

La mesure de la DCO du mélange d'alimentation (eau + fumier) a été réalisée dans un laboratoire privé sur un seul échantillon. Le résultat obtenu révèle une valeur de la DCO qui est de 11 480 mg/l.

Le rapport DCO/DBO5 représente le critère de biodégradabilité de la matière organique. Plus ce rapport est petit, plus le rejet sera facilement biodégradable par les bactéries.

Rapport DCO/DBO5=  $11480/8500=1,35 < 1,5$ . (AOAC, 1990)

Étant donné que le rapport révèle une valeur inférieure à 1.5, Donc le mélange d'alimentation est facilement biodégradable par les bactéries anaérobies du digesteur.

## 6. Mesure des éléments Azote, Phosphore, Potassium (N, P, K)

Après avoir effectué les prélèvements qui consistait en trois échantillons du digestat à partir de la fosse de stockage. Les échantillons prélevés ont été envoyés pour analyse des éléments N, P, K au niveau des laboratoires agréés :

- Deux échantillons ont été envoyés au laboratoire privé le 6 et 13 juin 2011
- Un échantillon a été envoyé au laboratoire Uatrs-CNRST le 20 juin 2011.

Les résultats ont été récupérés et analysés, le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus

Tableau N°7: Résultats des analyses N, P, K

Eléments	Unité	Echantillons N°1	Echantillons N°2
Azote total (N)	g/l	5,2	4,7
Azote ammoniacal (N-NH)	g/l	2,1	2,7
Phosphore total	g/l	1,9	1,7
Potassium total	g/l	3,9	5

Tableau N°8 : Résultats des analyses P, K (Uatrs)

ELEMENTS	Unité	Echantillons N°3
<b>phosphore</b>	<b>%</b>	<b>0,062</b>
<b>Potassium</b>	<b>%</b>	<b>0,132</b>

Avec 1%=10000ppm

### Interprétation des résultats

D'après les résultats mentionnés aux tableaux on constate :

- Que la concentration d'azote total, phosphore total et potassium total sont respectivement de l'ordre 5g/l, 1.8g/l, 4.45g/l . Ce qui implique que le digestat à une valeur fertilisante importante comparable à celle d'un engrais chimique répondant aux principaux besoin en éléments fertilisant pour la plus part des cultures.
- On remarque d'après le tableau 7 que la moitié de l'azote total (5g/l) est transformé en azoté minérale (2,1g/l) .ce dernier est plus assimilable par la plante.

Afin de mettre en évidence l'effet du digestat et le comparer à celui de l'engrais chimique, nous avons effectué un test in vivo sur trois parcelles destinées à une culture de navet blanc :

Parcelle 1 : témoin 0% digestat, %engrais chimique

Parcelle 2 : 0%engrais chimique, 100% digestat

Parcelle 3 :100% engrais chimique, 0% digestat

Après quelques semaines, on constate que les produits de la parcelle N°2 présentent une rentabilité et un aspect semblable si ce n'est meilleur que celui de la parcelle (N°3) traitée par l'engrais chimique.

En conclusion, il semblerait que la digestion anaérobie soit doublement bénéfique au niveau agronomique :

- ✓ Elle augmente la valeur fertilisante d'un effluent organique, par la minéralisation des éléments fertilisants [Adani, 2009], si l'on en maîtrise le stockage et l'épandage du digestat.
- ✓ Elle augmente la valeur amendante de l'effluent (digestat) qui est riche en matière organique stable et en phosphore (Georgacakis et Dalis, 1993).

## **7. Les analyses bactériologiques:**

Après avoir effectué le prélèvement de trois échantillons à différents points de l'installation : l'entrée du digesteur (bac d'alimentation) et à sa sortie (bassin de compensation). Les échantillons ont été envoyés pour une analyse bactériologique au laboratoire de l'institut national d'hygiène Rabat INH.

L'exigence de la qualité dicte le choix du suivi microbiologique à adopté celui-ci repose sur l'analyse des indicateurs de contamination fécale et quelques bactéries pathogènes.

Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau ci-dessous :



**Tableau N° 9: résultats d'analyse bactériologique**

<b>Date</b>	<b>Localisation</b>	<b>CT</b>	<b>CF</b>	<b>SF</b>	<b>CSR</b>	<b>PS</b>	<b>VC</b>	<b>S</b>
<b>14/06/2011</b>	<b>Entrée</b>	<b>3,2 10<sup>5</sup></b>	<b>4,2 10<sup>4</sup></b>	<b>3,9 10<sup>3</sup></b>	<b>4,210<sup>4</sup></b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
	<b>Sortie</b>	<b>4,2 10<sup>2</sup></b>	<b>2,1 10<sup>2</sup></b>	<b>3,1 10<sup>2</sup></b>	<b>0</b>	<b>abs</b>	<b>abs</b>	<b>Abs</b>
<b>Rabattement</b>		<b>99,87%</b>	<b>99,5%</b>	<b>92,05%</b>	<b>100%</b>			
<b>20/06/2011</b>	<b>Entrée</b>	<b>4,2 10<sup>4</sup></b>	<b>2,2 10<sup>4</sup></b>	<b>1,3 10<sup>3</sup></b>	<b>2,1 10<sup>4</sup></b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
	<b>Sortie</b>	<b>2,1 10<sup>2</sup></b>	<b>3,5 10<sup>1</sup></b>	<b>2 10<sup>1</sup></b>	<b>0</b>	<b>Abs</b>	<b>abs</b>	<b>Abs</b>
<b>Rabattement</b>		<b>99,5%</b>	<b>99,84%</b>	<b>98,46%</b>	<b>100%</b>			
<b>27/06/2011</b>	<b>Entrée</b>	<b>5,1 10<sup>3</sup></b>	<b>2,1 10<sup>3</sup></b>	<b>4,1 10<sup>2</sup></b>	<b>2,1 10<sup>3</sup></b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
	<b>Sortie</b>	<b>1,4 10<sup>2</sup></b>	<b>2,1 10<sup>1</sup></b>	<b>1,5 10<sup>1</sup></b>	<b>0</b>	<b>abs</b>	<b>abs</b>	<b>Abs</b>
<b>Rabattement</b>		<b>97,25%</b>	<b>99%</b>	<b>96,34%</b>	<b>100%</b>			

X : on n'a pas calculé la charge pathogène des indicateurs fécaux à l'entrée

CT = Coliformes totaux

CF = Coliformes fécaux

SF = Streptocoque fécaux

CSR = Colostridium sulfito réducteur

P.S = Pseudomonas sérugimosa

S = Salmonella

V.C = Vibrion Colirea

### **Interprétation :**

On remarque d'après le tableau suivant que le digesteur permet une réduction de la charge bactérienne entre son entrée et sa sortie d'environ :

- 99% des coliformes totaux et fécaux (indicateur de contamination fécale).
- 96% des streptocoques fécaux (indicateur de contamination fécale)
- Et 100% de réduction pour les bactéries pathogène *anaérobies sulfito-réducteurs*, *Pseudomonas aeruginosa*, *vibrion cholérique*, *salmonella*.

Donc le digesteur agricole assure une élimination satisfaisante de la charge bactérienne (technique d'hygiénisation) qui répond aux normes marocaines (INH), et ceux de l'OMS.

## **JUSTIFICATION ECONOMIQUE - FINANCEMENT.**

### **A. Estimation économique : points fort**

Dans le cadre du projet pilote d'assainissement écologique, un digesteur agricole est construit au douar Ait Daoud Oumoussa (voisinage de Lac Dayet Ifrah).

Dans ce chapitre nous allons estimer les couts de construction de cette installation à travers l'étude des prix de différents matériaux de construction utilisés et le cout de main d'œuvres.

Le cout de la construction du digesteur agricole comprend les sommes des couts des différentes parties :

- Bac d'alimentation :
- Cuve centrale : c'est le lieu de la fermentation anaérobie elle est d'un volume de 30 m<sup>3</sup>,
- Cuve de compensation
- Fosse de stockage

## 1 - Dépenses d'installation et de fonctionnement.

Elles comprennent :

- dépenses d'investissement (main d'œuvre, matériaux, transport, coût du capital)
- dépenses en main d'œuvre pour le fonctionnement et l'entretien.
- dépenses en fournitures d'entretien.
- dépenses pour l'épandage des lisiers (main-d'œuvre et matériel)

### *Lisiers.*

Les déjections animales n'avaient pas, du point de vue des fermiers, de valeur financière avant l'installation des biodigesteurs. De sorte qu'aucune valeur financière n'a été attribuée à la matière organique.

### *Coûts d'investissement*

Les matériaux de construction nécessaires à la réalisation des éléments d'alimentation du digesteur (égouts, caniveaux, canalisations, bassin d'entrée), d'utilisation du gaz ( tuyauteries et accessoires) et des boues liquides ( bassin de compensation, caniveaux, collecteurs) ainsi que la main d'œuvre de génie civil, représentent la part la plus importante des coûts d'investissement.

## B. Estimation du cout de construction du digesteur agricole de Dayet Ifrah

Les estimations des coûts devraient être obtenues directement des organismes ou entreprises qui développent et construisent des digesteurs anaérobies, des équipements de traitement et de valorisation des biogaz et des digestats dans la région ciblée(Ifrane). Dans le cas présent, les données présentées dans ce chapitre proviennent en partie des informations recueillies auprès d'une entreprise située à Fès et aussi les drogueries d'Ifrane. Le tableau suivant présente un résumé des informations qu'ils ont amassées.

La quantité des différents matériaux utilisés dans l'élaboration de digesteur ont été tiré du guide de construction des installations de biogaz du centre de développement des énergies renouvelables (CDER).

Les coûts d'investissement sont variables d'une région à l'autre. De sorte que le tableau ci-dessous ne donne qu'une idée approximative des coûts, un certain nombre de facteurs étant occultés.

Les dépenses de main d'œuvre de génie civil pour la construction du biodigesteur, soudure du réservoir de gaz, plomberie ne sont pas incluses dans le tableau.

tableau N°1 cout de construction du digesteur agricole de la famille El houari												
	quantité				prix atelier				réel			
	unité	estimé	acheté	différence	UI	estimé	acheté	différence	ui	estimé	acheté	différence
<b><u>Matériaux pour le digesteur</u></b>												
Ciment CPJ45	t	4,3	4,7	0,4	1400,0	6020,0	6580,0	560,0	1270,0	5461,0	5969,0	508,0
sable oued	m <sup>3</sup>	6,5	6,5	0,0	292,0	1898,0	1898,0	0,0	200,0	1300,0	1300,0	0,0
sable de meknes	m <sup>3</sup>	0,0	3,0	3,0	300,0	0,0	900,0	900,0	200,0	0,0	600,0	600,0
Gravier concassé	m <sup>3</sup>	7,5	7,6	0,1	150,0	1125,0	1140,0	15,0	150,0	1125,0	1140,0	15,0
Acier (barre 12 m, 8mm)	u	2,0	2,0	0,0	45,0	90,0	90,0	0,0	45,0	90,0	90,0	0,0
Moellons	m <sup>3</sup>	4,3	4,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	120,0	516,0	516,0	0,0
argile	m <sup>3</sup>	3,0	3,0	0,0	80,0	240,0	240,0	0,0	65,0	195,0	195,0	0,0
Buse 200 mm	u	2,0	3,0	1,0	80,0	160,0	240,0	80,0	20,0	40,0	60,0	20,0
Buse 300 mm	u	1,0	1,0	0,0	90,0	90,0	90,0	0,0	45,0	45,0	45,0	0,0
Sikalite	kg	15,0	30,0	15,0	45,0	675,0	1350,0	675,0	8,0	120,0	240,0	120,0
Bitume Flintkote	kg	30,0	30,0	0,0	45,0	1350,0	1350,0	0,0	10,0	300,0	300,0	0,0
moule pour digesteur	u	1,0	1,0	0,0	100,0	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0	100,0	0,0
paille	u	0,0	3,0	3,0	20,0	0,0	60,0	60,0	20,0	0,0	60,0	60,0
Fut métallique 200l	u	2,0	2,0	0,0	500,0	1000,0	1000,0	0,0	80,0	160,0	160,0	0,0
<b><u>Conduites Eaux usées (toilettes-digesteur)</u></b>												
TuyauPVC 110 mm	ml	30,0	30,0	0,0	30,0	900,0	900,0	0,0	15,0	450,0	450,0	0,0
Coude PVC 110 mm	u	4,0	4,0	0,0	40,0	160,0	160,0	0,0	12,0	48,0	48,0	0,0
Manchon PVC 110 mm	u	4,0	4,0	0,0	60,0	240,0	240,0	0,0	15,0	60,0	60,0	0,0
Té PVC 110 mm	u	2,0	2,0	0,0	35,0	70,0	70,0	0,0	15,0	30,0	30,0	0,0
Colle PVC	kg	0,5	0,5	0,0	110,0	55,0	55,0	0,0	90,0	45,0	45,0	0,0
<b><u>Conduites Biogaz</u></b>												
Tube galvanisé 1/2"	ml	36,0	59,5	23,5	30,0	1080,0	1785,0	705,0	20,0	720,0	1190,0	470,0
Coudes galvanisés 1/2"	u	10,0	10,0	0,0	15,0	150,0	150,0	0,0	5,0	50,0	50,0	0,0
Tés 1/2"	u	8,0	8,0	0,0	10,0	80,0	80,0	0,0	6,0	48,0	48,0	0,0
Vanne gaz 1/2"	u	4,0	8,0	4,0	50,0	200,0	400,0	200,0	30,0	120,0	240,0	120,0
Bouchons 1/2"	u	2,0	2,0	0,0	10,0	20,0	20,0	0,0	2,0	4,0	4,0	0,0
Téflon (rouleau)	u	4,0	6,0	2,0	35,0	140,0	210,0	70,0	13,0	52,0	78,0	26,0
Tuyau transparent 8-12 mm	ml	15,0	25,0	10,0	50,0	750,0	1250,0	500,0	10,0	150,0	250,0	100,0
Attache-fils	u	20,0	20,0	0,0	20,0	400,0	400,0	0,0	20,0	400,0	400,0	0,0
Clous 60 mm	kg	1,0	1,0	0,0	30,0	30,0	30,0	0,0	12,0	12,0	12,0	0,0
Manchons (fem.-fem.) 1/2"	u	8,0	8,0	0,0	11,0	88,0	88,0	0,0	5,0	40,0	40,0	0,0
Colliers Atlas 1/2"	u	10,0	10,0	0,0	12,0	120,0	120,0	0,0	7,5	75,0	75,0	0,0
Raccord union 1/2"	u	5,0	5,0	0,0	22,0	110,0	110,0	0,0	22,0	110,0	110,0	0,0
Colliers serrage	u	5,0	5,0	0,0	12,0	60,0	60,0	0,0	1,0	5,0	5,0	0,0
Mamelon (mâle-mâle) 1/2"	u	3,0	8,0	5,0	15,0	45,0	120,0	75,0	5,0	15,0	40,0	25,0
Tétons 8 mm	u	2,0	7,0	5,0	30,0	60,0	210,0	150,0	12,0	24,0	84,0	60,0
Cuisinière 3 becs	u	1,0	1,0	0,0	450,0	450,0	450,0	0,0	450,0	450,0	450,0	0,0
Four à pain	u	1,0	1,0	0,0	1400,0	1400,0	1400,0	0,0	1400,0	1400,0	1400,0	0,0
<b><u>Fosse stockage digestats (4 m<sup>3</sup>)</u></b>												
Ciment CPJ45	t	1,0	1,0	0,0	1400,0	1400,0	1400,0	0,0	1270,0	1270,0	1270,0	0,0
Sable de l'oued	m <sup>3</sup>	1,0	1,0	0,0	292,0	292,0	292,0	0,0	292,0	292,0	292,0	0,0
Gravier concassé	m <sup>3</sup>	2,0	2,0	0,0	150,0	300,0	300,0	0,0	300,0	600,0	600,0	0,0
Acier (barre 12 m, 8mm)	u	10	10,0	0,0	45,0	450,0	450,0	0,0	35,0	350,0	350,0	0,0
Moellons	m <sup>3</sup>	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	26,0	26,0	26,0	0,0
Bois de coffrage	m <sup>3</sup>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Buse 200 mm	u	1,0	1,0	0,0	80,0	80,0	80,0	0,0	20,0	20,0	20,0	0,0
Madrier	u	2,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sikalite	kg	15,0	15,0	0,0	45,0	675,0	675,0	0,0	8,0	120,0	120,0	0,0
					21798	25788	3990		16298	18422	2124	

tableau N°2 : cout de la main d'œuvre					
	periode		total	prix	Total
<b>maconnerie</b>	14 - 30 juin	19 - 24 juillet			
boustik	14	5			4370
ouvrier	10	12	22	80	1760
macon	5	3	8	150	1200
<b>excavation</b>					
materiel (compresseur)				1000	1000
main d'œuvre			forfait	4200	4200
plomberie	1	1	forfait	400	800
				<b>total en DH</b>	<b>13330</b>

Donc d'après le tableau le cout de digesteur de 30 m<sup>3</sup> est de 34 194,00 DH sans compter le cout de la main d'œuvre et aussi le cout des experts.

L'estimassions du cout de l'installation a été faite après avoir rassemblé les différentes frais, le cout de l'installation s'élève à 23 748,00 pour un digesteur de 20 m<sup>3</sup> et à 34 194,00 pour un digesteur de 30 m<sup>3</sup> (l'exemple notre digesteur agricole du village)

### C. Estimation de la rentabilité du digesteur

#### 1. Les retombées financières du biogaz

L'étude de la viabilité financière des installations familiales de biogaz ne doit, pour être réaliste, prendre en compte que les biodigesteurs de volume inférieur à 30 m<sup>3</sup>.

Le biogaz est consommé pendant 2h donc une substitution pour moitié du gaz et de bois. car tous deux utilisés pour la cuisson des repas et le chauffage de l'eau.

Le prix du gaz butane est de 49 Dhs/la bouteille (sans compter son transport !). Le bois est à 800 Dhs/t.

Sachant bien que Mr El houari achète 12 tonne de bois/ans soit 9600 dhs. et il consomme également 2400 dhs de butane/an.

Donc une économie de devises de  $(9600+2400)/2=6000$  dhs /ans

## 2. Les retombées financières des biofertilisants

La valeur des biofertilisants peut se mesurer en fonction du degré de remplacement des engrais chimiques, ou en fonction des retombées financières obtenues par l'extension des champs de cultures.

L'évaluation des engrais organiques est difficile en raison des variations importantes de la qualité de digestat liquide récolté. La valeur fertilisante dépend :

- du pourcentage de matières sèche
- du rapport C/N
- du pourcentage d'urine dans la matière organique.
- du stockage des boues liquides.

En sortie du méthaniseur le digestat peut être utilisé en épandage agricole avec ou sans séparation de phase liquide/solide

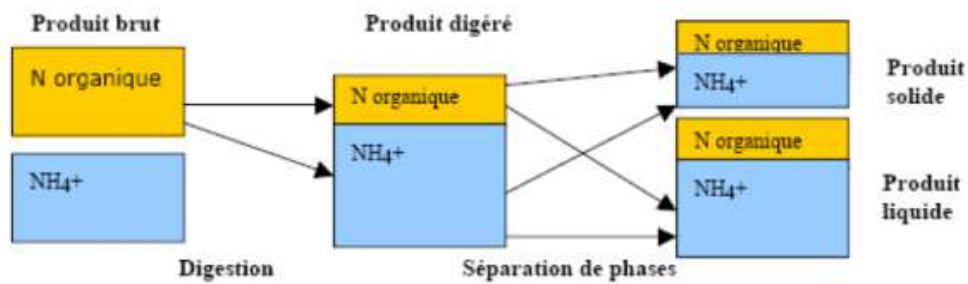
Avec une « maturation adaptée », le digestat peut atteindre des niveaux de qualité comparable à un compost.

Selon les analyses qui avaient été effectuées, 1 m<sup>3</sup> de digestat (ou 'effluent' à 8% MS) correspond à :

11,4 kg de sulfate d'ammoniaque + 1,1 kg de Super Phosphate + 11,5 kg de sulfate de Potasse (Marc Wauthélet).

Ces nutriments fertilisant proviennent des lisiers, crottes,... versés dans le digesteur. Comme indiqué précédemment, la digestion de ces matières n'occasionnent pas de pertes en nutriments, contrairement au dépôt de ces matières à l'extérieur et en tas qui peuvent occasionner des pertes de 50% d'azote.

La digestion permet une bonne minéralisation de l'azote en ammonium qui est un élément directement assimilable par les plantes (contrairement à l'azote organique et au nitrate) et moins lessivable dans les sols. Le digestat liquide est devenu un engrais à action rapide.



Source APESA

Pour le transport et le stockage, il est parfois plus aisé (surtout en hiver) de le mélanger avec des matières fibreuses (pailles, déchets secs de plantes,..) pour reconstituer un compost de bonne qualité.

Le fait de connecter la toilette au digesteur apportera son lot de nutriments (N, P et K).

Gagner 50% de l'azote des lisiers, crottes, signifie un gain annuel de 1207 Dhs (Marc Wauthelet)

#### D- Autres avantages des biodigesteurs au regard de l'agriculture.

Un certain nombre d'avantages ne peuvent pas être estimés parce qu'ils ne sont pas quantifiables.

Pour les utilisateurs des biodigesteurs ces avantages sont perçus comme générateurs de confort.

- 💡 Les biodigesteurs fournissent une énergie sûre avec un combustible propre qui est comparable aux autres énergies nouvelles. Cette énergie est facilement applicable et l'utilisation du biogaz n'est pas limitée à la cuisson sur feux. D'autres utilisations sont possibles, par exemple la cuisson au four qui auparavant n'était pas accessible aux fermiers à cause de l'indisponibilité ou le prix des énergies comparables.
- 💡 L'amélioration des conditions d'hygiène à la ferme sont évidentes par la réduction des germes pathogènes.
- 💡 La production de fertilisants propres n'est pas négligeable (azote, phosphore, potassium).comme indiqué dans chapitre III.7.analyse bactériologique.
- 💡 L'amélioration des conditions de vie à travers les installations de biodigestion est, du point de vue des agriculteurs, un élément de modernisation.
- 💡 Les prix des produits agricoles sont stagnants, en revanche les prix des engrais chimiques et fertilisants augmentent. La différence entre l'augmentation des coûts et la



stagnation des produits, menace le déjà très faible niveau de vie dans les zones rurales et produit une vie peu attractive. Le biogaz est un système intégré de ressources qui peut atténuer ces effets pervers en permettant l'utilisation de ressources disponibles tout en créant une vie rurale plus confortable.

- 🌿 L'apparition du Biogaz peut encourager les éleveurs à augmenter leur cheptel et à améliorer la situation des animaleries de manière à obtenir plus de matière organique pour l'alimentation des biodigesteurs. Dans notre cas le chef de la famille El houari collecte tout le fumier disponible même à l'extérieur de sa propriété et tout ça pour augmenter la production de biogaz.

La promotion des systèmes biogaz trouve sa justification dans le nombre des avantages indirects générés :

- Réduction de la déforestation en offrant une énergie de substitution pour les combustibles traditionnels que sont le bois et le charbon de bois.
- Economie en devises par la réduction des achats en combustibles et fertilisants.
- Amélioration des conditions de vie et des conditions sanitaires.

Le faible nombre de biodigesteurs en fonction ne permet pas une analyse économique globale mais une analyse limitée à l'impact sur la collectivité locale .

Pour le fermier, avoir ou non un biodigesteur est avant tout une question financière. Ils faut garder à l'esprit que les moyens financiers intègrent aussi bien la valeur des dépenses que la valeur des produits que l'on ne peut acheter ou vendre sur un marché, mais qui sont consommés à la maison. En conséquence, l'analyse financière d'une installation familiale de biogaz comprend:

- L'estimation de la totalité de combustible et fertilisant produits;
- Leurs valeurs par rapport au prix du marché;
- La comparaison des valeurs brutes avec les coûts d'investissement et de maintenance des biodigesteurs.

Les produits les plus intéressants issus des biodigesteurs sont :

Le biogaz.

Les biofertilisants



## CONCLUSION

Ce stage m'a permis tout d'abord de mettre en pratique toutes mes connaissances dans le domaine des analyses physico-chimiques, et microbiologiques. Ainsi que la possibilité de réaliser une étude et le suivi d'un procédé spécifique au traitement des déchets organiques d'une ferme en l'occurrence la biodigestion anaérobie.

Les résultats obtenus des expériences à partir du suivi du digesteur semblent être encourageants surtout en ce qui concerne la diminution des bactéries (99%), le taux de dégradation de la matière organique biodégradable qui arrive à 84%, la valeur agronomique du digestat qui est comparable à un engrais chimique et enfin une production de biogaz à raison de cinq heures par jour dans les conditions optimales.

Néanmoins, les digesteurs agricoles possèdent un temps de réponse relativement lent (150 jours pour le digesteur agricole étudié de la famille El Houari), ceci à cause de l'activité bactérienne et la température du digesteur qui ne dépasse pas 20°C. Ainsi, ayant effectué les mesures seulement sur trois mois, les résultats obtenus sur un temps si court ne peuvent pas être totalement représentatifs du bon fonctionnement du procédé.

Donc le choix de la biométhanisation agricole reste la meilleure solution pour ce type de condition en milieu rural, car il permet à la fois un traitement des déchets organiques, l'assainissement des eaux usées ainsi que la production de biogaz.

## Références bibliographiques

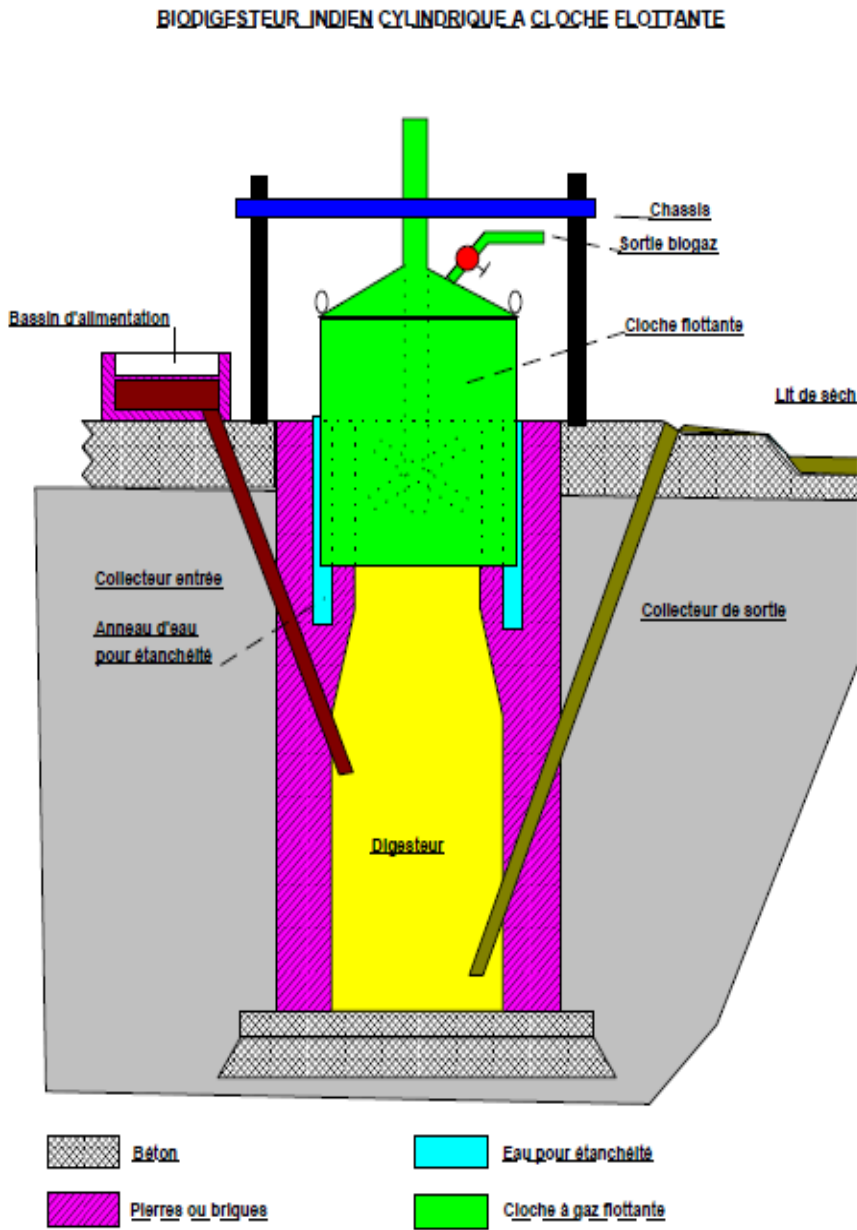
1. **ADANI F. et al. ; 2009.** Is digestate a nitrogen fertilizer ? 16th Nitrogen Workshop << Connecting different scales of N use in agriculture >>, Italie, juillet 2009. pp 347-348.
2. **ADEME,Chambre d'agriculture, fiche N°3,** intérêt agronomique du digestat issu de la méthanisation, Mars 2006  
  
Berne. [124.p.orgprints.org/13336/01/kopper-fuchs-2007-compost-bafu4307\\_fr.pdf](http://124.p.orgprints.org/13336/01/kopper-fuchs-2007-compost-bafu4307_fr.pdf)
3. **Brodeur, C. 2008.** Biomasse agricole : biogaz et biocombustibles. Groupe AGÉCO. [Enligne].[http://www.aqme.org/AxisDocument.aspx?id=1094&langue=fr&download=true&document=Catherine\\_Brodeur\\_\(AGECO\).pdf](http://www.aqme.org/AxisDocument.aspx?id=1094&langue=fr&download=true&document=Catherine_Brodeur_(AGECO).pdf)
4. **Burton, C.H. et C. Turner. 2003.** Manure management: treatment strategies for sustainable agriculture. United Kingdom: Silsoe Research Institute, 451 p.
5. **Couturier et Galiter2004** (SOLAGRO-ETAT DES CONNAISSANCES SUR LE DEVENIR DES GERMES PATHOGENES ET DES MICROPOLLUANTS AU COURS DE LA METHANISATION DES DECHETS ET SOUSPRODUITS ORGANIQUES.2004
6. **El Kasmi,A. (2009)** : Rapport inédit sur le développement durable à Dayet Ifrah initié par la Chaire UNESCO et l'Université Al Akhawayne.
7. **Filidei et al., 2003** Filidei, S., Masciandro, G. and Ceccanti, B., 2003. Anaerobic digestion of olive oil mill effluents: Evaluation of wastewater the organic load and phytotoxicity reduction. *Water, Air and Soil pollution*, **145**, 79 – 94
8. **Florencio, I., Field, J.A., Van Langerak, A. and Lettinga, O., 1996.** pH-stability in anaerobic bioreactors treating methanolic wastewaters. *Water Science Technology*, **33** (3), 177 – 184.
9. **GHATTAS,D,2004,** Valorisation des margines par digestion anaérobie
10. **Görish, U. et M. Helm. 2006.** La production de biogas. Paris: ULMER, 120 p
11. **Kupper T., Fuchs J. (2007)** : Compost et digestat en Suisse. Étude n° 1 : Micropolluants organiques dans le compost et le digestat; Etude n° 2 : Influences des composts et des digestats sur l'environnement, la fertilité des sols et la santé des plantes. Connaissance de l'environnement no 0743. Office fédéral de l'environnement,
12. **Levasseur, P. et S. Dutréme. 2007.** Hygiénisation des effluents d'élevage porcin. *Techni Porc*, 30(2) : 3-18.

13. **Mermet & Trassy(2010)**, Rapport du CAST (centre d'actualisation scientifique et technique ) ; ;
14. **Mignon.C.2009**, Valbiom ,apport final, utilisation du digestat comme fertilisant en agriculture
15. **Ministère de la coopération française, 1998**, Rapport CIRAD-EMVT n° 96059, TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE PORCHERIES EN ZONE CARAIBE.
16. Morelli et Rindome, 1990
17. **Morelli, A. and Rindome, B. (1990)** Fatty acids monitoring in the anaerobic depuration of olive oil mill wastewater. *Biological Wastes*, **32**, 253- 263.
18. Pain, B.F., Misselbrook, T.H., Clarkson, C.R. et Y.R. Rees. 1990. Odour and ammonia emissions following the spreading of anaerobically-digested pig slurry on grassland. *Biological Wastes*, 34 : 259-267.
19. **POUECH philipe 2009**, Intérêt des digestats et possibilités de valorisation APESA.
20. **SOLAGRO.2004**, Orgaterre, rapport de synthèse la qualité agronomique des digestat, C/568
21. **Vade mecum.2004** ; technique de l biométhanisation de biomasse humide pour les installation inferieur à 10MWth ;bureau d'étude IRCO Sprl, adapté par DEECC Consulting Sprl, Belgique
22. **Werner.C, (2004)**, Environnement and Infrastructure sector project ecosan Lübeck, Germany
23. **Werner.C, (2008)**, développements internationaux envers un assainissement écologique et durable : 2008 année de l'assainissement

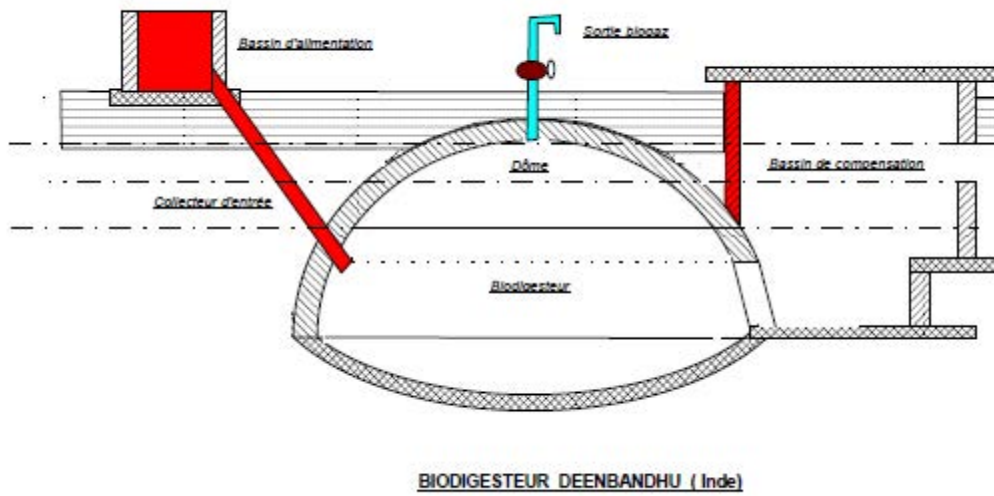
(<http://www.fao.org/WAICENT/FAOINFO/AGRICULT/AGA/AGAP/FRG/Welcome.htm>)

# Annexe

Schémas N°1



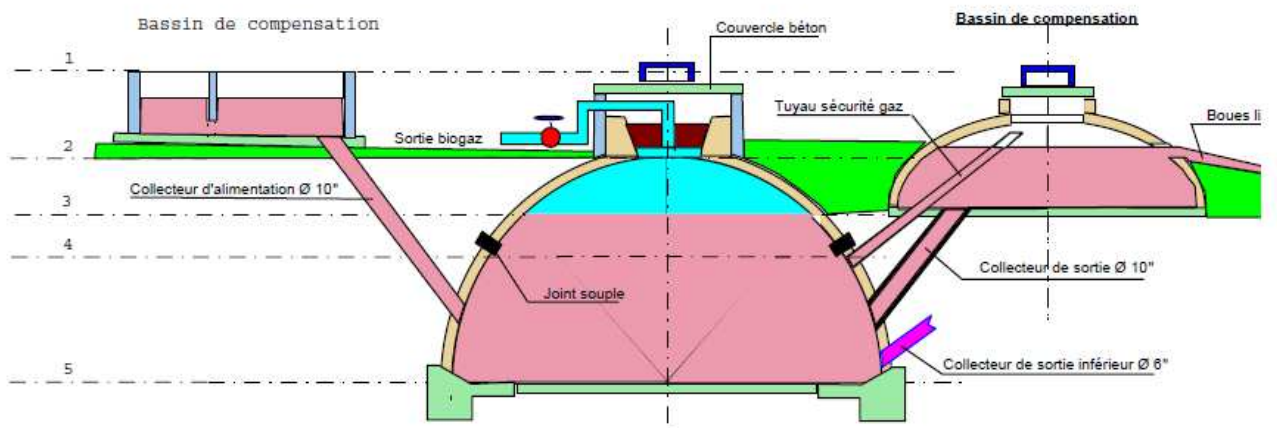
Schémas N°2



Schémas N°3

**BIODIGESTEUR STANDARD DE 12 m<sup>3</sup>**  
*Type à dôme fixe*

- 1 - Ligne de référence 0
- 2 - Niveau supérieur lizier (-0,60 m)
- 3 - Niveau bassin de compensation (- 1 m)
- 4 - Niveau inférieur lizier et joint souple (- 1,29 m)
- 5 - Niveau inférieur biogesteur (- 2,37 m)



Schémas N°4

**BIODIGESTEUR STANDARD DE 12 m<sup>3</sup>**  
*Type à dôme fixe*

- 1 - Ligne de référence 0
- 2 - Niveau supérieur lisier (-0,60 m)
- 3 - Niveau bassin de compensation (-1 m)
- 4 - Niveau inférieur lisier et joint couple (-1,29 m)
- 5 - Niveau inférieur biodigesteur (-2,37 m)

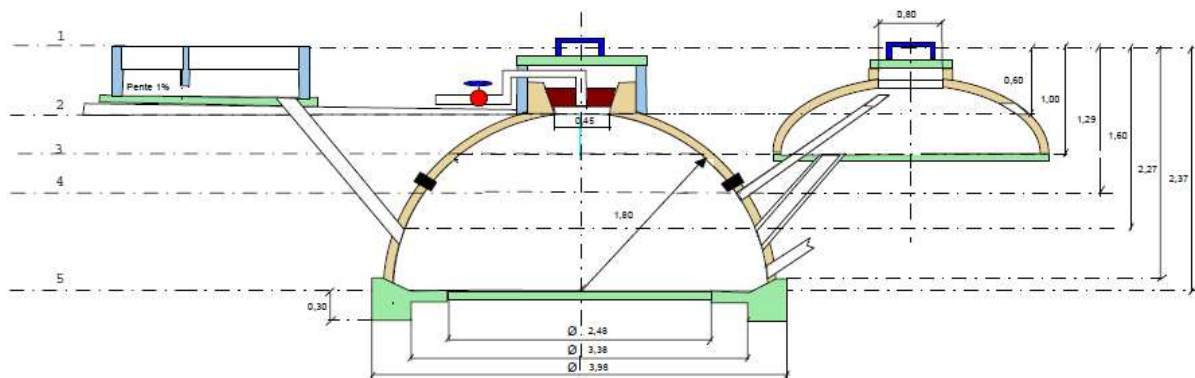
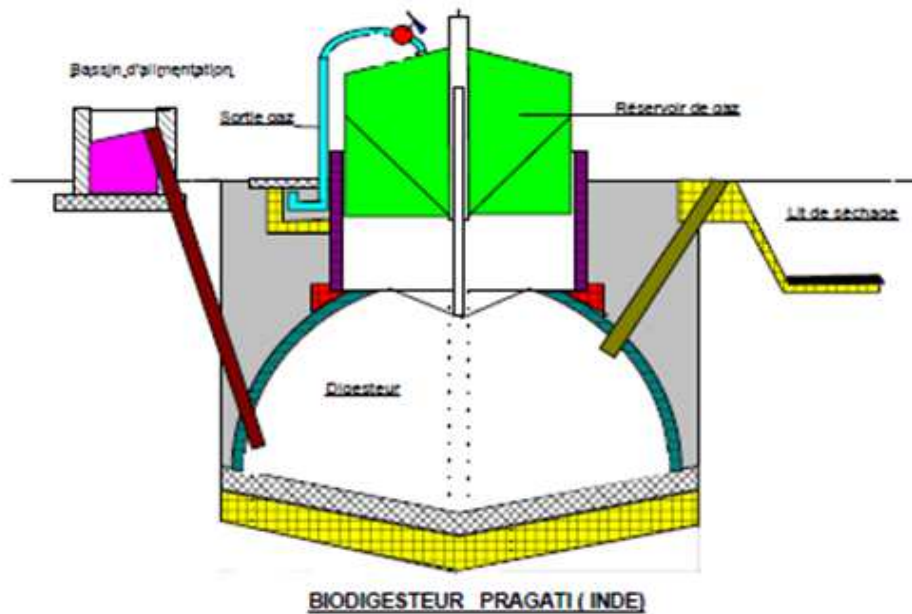


Schéma N°5

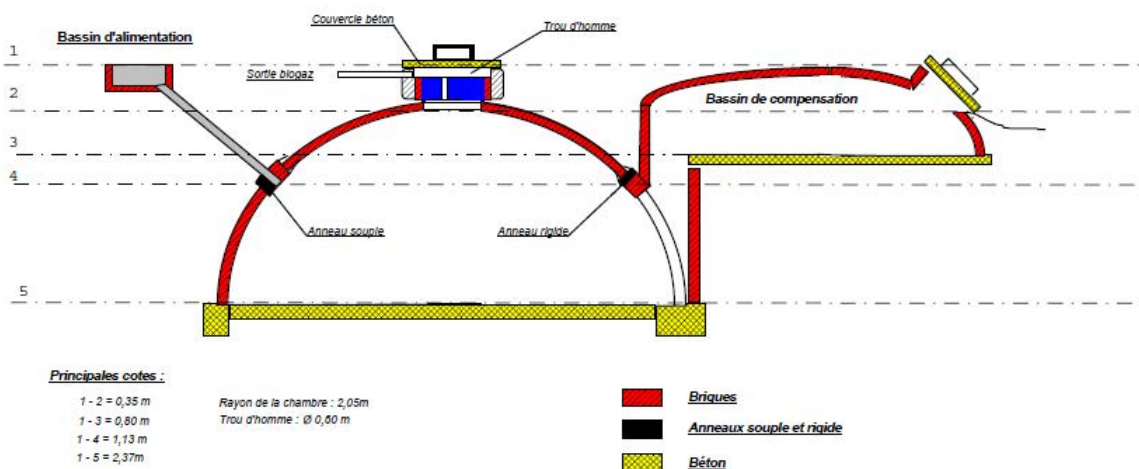




## Schémas N°6

### BIODIGESTEUR A DOME FIXE VERSION CAMARTEC.

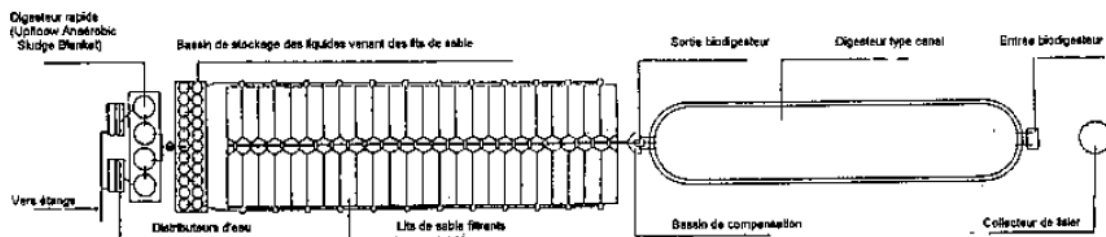
- 1 - Ligne de référence
- 2 - Niveau maximum du lisier
- 3 - Point bas du bassin de compensation
- 4 - Niveau bas lisier
- 5 - Centre de la chambre hémisphérique.



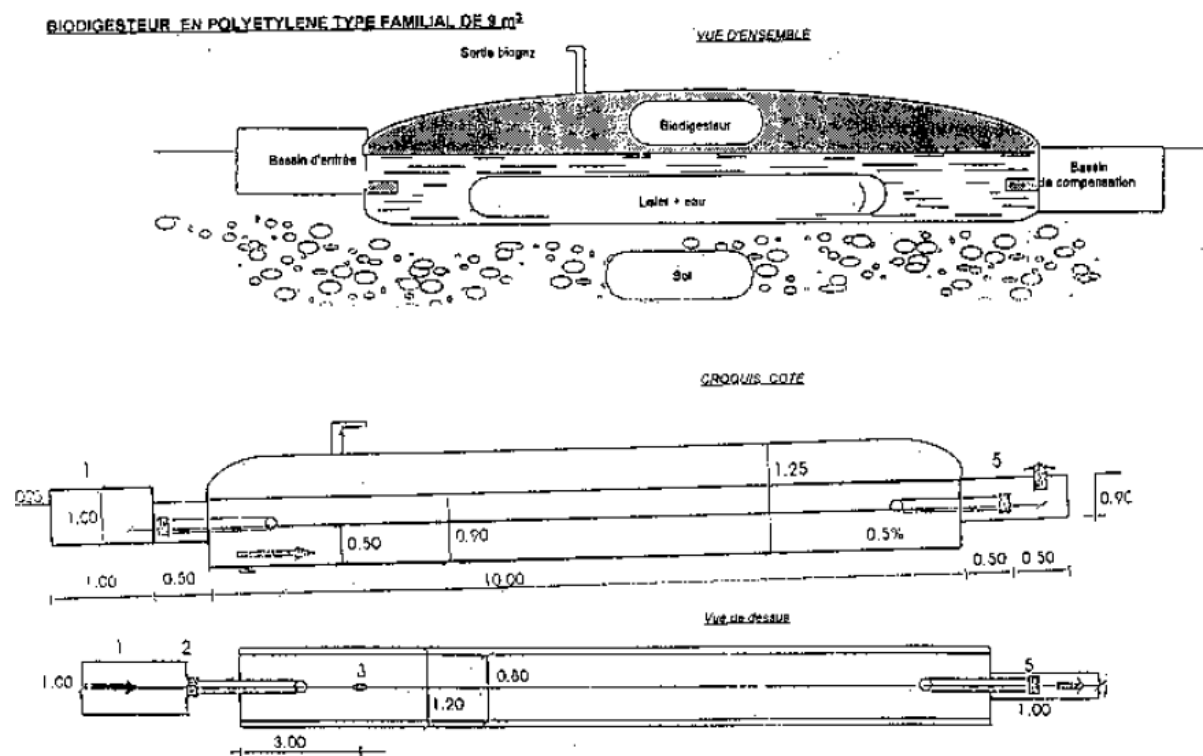
## Schémas N°7

### BIODIGESTEUR TYPE CANAL DE 680 m<sup>3</sup> AVEC RESERVOIR DE GAZ POLYETHYLENE EN SURFACE

Le biodigérateur a un temps de rétention de 40 à 50 jours  
Après le UASB, la DCO est de 2 mg/l.  
Le traitement final de l'eau par passage en étang d'élevage ou d'oxydation permet de réutiliser l'eau pour le lavage des porcherietés.

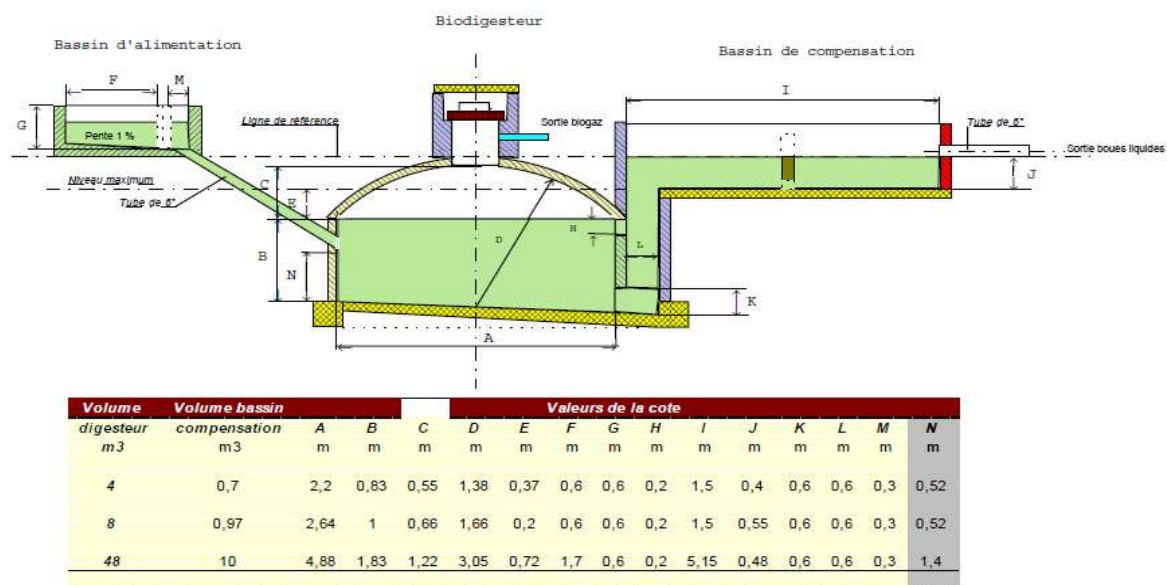


## Schémas N°8



## Schémas N°9

### SCHEMA DU BIODIGESTEUR DEVELOPPE PAR L'IIP LA HAVANE



## Annexe : Tableau

### Tableau N°1 du suivi de la temperature

date	température entrée	temperature sortie
01/04/2011	14,5	13,5
13/04/2011	13,4	12,4
14/04/2011	11,5	12,5
15/04/2011	14,6	12,6
04/05/2011	15	14
05/05/2011	13,9	13,6
06/05/2011	13,8	12,6
16/05/2011	13,43	14,5
17/05/2011	13,6	14
18/05/2011	13,8	15,2
01/06/2011	14,6	14,6
02/06/2011	15,4	13,4
03/06/2011	12,3	14,4
14/06/2011	14,3	16
20/06/2011	13,5	15,5
23/06/2011	14,5	15,4
27/06/2011	15,2	16,6

### Tableau N°2 du suivi Du Ph

date	PH entrée	PH sortie
01/04/2011	7,23	8,25
13/04/2011	7,75	8,13
14/04/2011	7,7	8,12
15/04/2011	7,6	8,2
04/05/2011	7,12	8,01
05/05/2011	7,5	8,5
06/05/2011	7,42	7,91
16/05/2011	7,08	7,91
17/05/2011	7,13	7,89
18/05/2011	7,18	8,21
01/06/2011	7,16	8,16
02/06/2011	7,35	8,2
03/06/2011	7,28	8,09
14/06/2011	7,18	7,95
20/06/2011	7,32	7,92

<b>23/06/2011</b>	7,41	8,18
<b>27/06/2011</b>	7,6	8,3

### Tableau N°3 du suivi Du suivi de DBO 5

Le 18/05/11

	jour 1	jour 3	jour 4	jour 5	jour 1	jour 3	jour 4	jour 5
<b>bouteille N°1</b>	410	908	1000	1000	2050	4540	5000	5000
<b>bouteille N°2</b>	240	625	770	850	2400	6250	7700	8500
<b>bouteille N°3</b>	85	185	215	240	1700	3700	4300	4800
<b>bouteille N°4</b>	50	208	258	310	250	1040	1290	1550
<b>bouteille N°5</b>	10	25	25	30	100	250	250	300
<b>bouteille N°6</b>	5	25	35	45	100	500	700	900