



**UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA**

**Faculté des Technologies**

Département des Energies Renouvelables



## **MEMOIRE DE MASTER**

Spécialité : **Conversion Thermique**

# **ÉTUDE DE PROSPECTION ET DIMENSIONNEMENT D'UNE UNITE DE MÉTHANISATION AGRICOLE**

Par

**Walid SADI**

Soutenu le 02/07/2018 devant le jury composé de :

M. MERZOUK	Professeur,	U. de Blida 1	Président
A. HAMID	Professeur,	U. de Blida 1	Examineur
F. FERRADJI	Maitre-assistant (A),	U. de Blida 1	Examineur
N. KHELALFA	Maitre-assistant (B),	U. de Blida 1	Promoteur

Blida, 2017/2018

## ملخص :

في سياق الاهتمام المتزايد بالزراعة، كثيراً ما تبرز الدراسات المختلفة الصعوبات في تحقيق التوازن الاقتصادي، بسبب تعريفة شراء الكهرباء. أحد الحلول الموصى بها هو استخدام الغاز الحيوي من النفايات الزراعية. هذا هو مشروع الميثان الزراعي.

يستجيب مشروعنا لهذا الطلب. وهو يتألف من تطوير أداة (برنامج) لدعم القرار. هذه الأداة بحساب التكاليف (من الغاز الحيوي الزراعية المقترحة المشتركة للماشية الكبرى (الأبقار والدواجن والأغنام والماعز والخيول) وجدواه، وبحساب المصالح الفنية والاقتصادية من الغاز الحيوي من قبل بما في ذلك اختيار المدخلات، وعملية إنتاج الميثان، فإن تكلفة شراء الكهرباء ... وأولي اهتمام خاص لتطوير وسائل توليد الطاقة الحرارية نظراً لتحسن متوقع في سياسة التسعير.

سمحت التحقيقات في إطار هذه الأطروحة بإقامة إجراءات اتصال على المتطلبات الأساسية اللازمة لإنشاء وحدة الهضم اللاهوائي. يمكن اعتبار هذه الأداة كمواصفات يجب إكمالها لتحديد جدوى المشروع.

الكلمات الرئيسية: الغاز الحيوي، والبرمجيات، والريحية، إمكانية والتشخيص المسبق.

## Résumé :

Dans le contexte d'un intérêt croissant de l'agriculture, les différentes études menées soulignent souvent les difficultés d'atteindre l'équilibre économique, en raison des tarifs d'achat de l'électricité. Une des solutions préconisées est d'utiliser le biogaz issu des déchets agricoles. C'est le projet de la méthanisation agricole.

Notre projet répond à cette demande. Il consiste à développer un outil (Logiciel) d'aide à la décision. Cet outil permet de calculer la rentabilité (d'un projet de méthanisation agricole, commun aux principales productions animales (bovines, avicoles, ovines, caprines, équines) ainsi que sa faisabilité. Il permet de calculer l'intérêt technique et économique de la méthanisation selon notamment le choix des intrants, le procédé de méthanisation, le coût d'achat de l'électricité... Une attention particulière a été portée aux modes de valorisation de l'énergie thermique compte tenu de la bonification prévue dans la politique tarifaire.

Les investigations dans le cadre de ce mémoire ont permis de mettre en place des actions de communication sur les pré-requis indispensables à la mise en place d'une unité de méthanisation. Cet outil peut être considéré comme un cahier de charge à remplir afin de déterminer la faisabilité du projet.

**Mots-clés :** biogaz, logiciel, rentabilité, faisabilité, pré-diagnostic.

## **Abstract :**

In the context of a growing interest in agriculture, the various studies conducted often highlight the difficulties of achieving economic equilibrium, because of the electricity purchase tariffs. One of the recommended solutions is to use biogas from agricultural waste. This is the project of agricultural methanation.

Our project responds to this request. It consists of developing a tool (software) for decision support. This tool makes it possible to calculate the profitability (of an agricultural biogas project, common to the main animal productions (cattle, poultry, sheep, goats, equines) as well as its feasibility. It makes it possible to calculate the technical and economic interest of the anaerobic digestion. according to the choice of inputs, the anaerobic digestion process, the cost of purchasing electricity ... Particular attention has been paid to the methods of valorization of thermal energy given the improvement provided in the tariff policy.

The investigations in the framework of this thesis allowed to set up communication actions on the prerequisites essential to the setting up of an anaerobic digestion unit. This tool can be considered as a specification to be completed in order to determine the feasibility of the project.

**Keywords :** biogas, software, profitability, feasibility, pre-diagnosis.

## *Dédicaces*

*Avant tout, je remercie DIEU de m'avoir donné le courage et  
la patience, pour accomplir ce travail.*

*A mes chers parents*

*Mes frères et sœurs*

*Mes amis et toute ma famille*

*Tous mes enseignants de l'école primaire à l'université*

*Et enfin toute personne que j'ai omis de citer.*

***Walid.***

## *Remerciements*

Ce travail a été réalisé dans le cadre de la préparation d'un mémoire de master en Energie Renouvelables, option Thermique au Département des Energies Renouvelables de l'université Saad Dahleb de Blida 1, sous la direction du Dr. Khelalfa Nawal qui je remercie vivement pour toute l'aide qu'il m'apporté durant toute la durée de préparation du présent mémoire.et Je remercie vivement les jurys

Enfin, je souhaite exprimer toute ma gratitude à tous les enseignants du département des énergies renouvelables SURTOUT Pr.A.Hamid et Pr. M. Merzouk, et Mr Lafri.

**Sommaire :**

Résume :.....i  
Dédias :.....iii  
Remerciement :.....vi  
Liste des figures :.....v  
Liste des tables :.....v

Introduction générale:.....1

**Chapitre I**

**I.1. INTRODUCTION :.....4**  
**I.2. HISTOIRE DE LA METHANISATION :.....4**  
**I.3. ETAT DES LIEUX DE L'ALGERIE : .....8**  
**I.4. DEFINITION DU BIOGAZ :.....8**  
    **I.4.1. EQUATION GOUVERNANTE DE LA DIGESTION ANAEROBIE : .....9**  
    **I.4.2. COMPOSANTS DU BIOGAZ : .....10**  
    **I.4.3. LES CARACTERISTIQUES DU BIOGAZ : .....10**  
**I.5. DEFINITION DE LA METHANISATION : .....11**  
    **I.5.1. LES ETAPES DE LA METHANISATION :.....12**  
        **I.5.1.1. L'hydrolyse :.....13**  
        **I.5.1.2. L'acidogènese : .....13**  
        **I.5.1.3. L'acétogènese : .....13**  
        **I.5.1.4. La méthanogènese :.....13**  
**I.6. LES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES INFLUENÇANT LA  
DIGESTION ANAEROBIE : .....13**  
    **I.6.1. LA TEMPERATURE :.....14**  
    **I.6.2. LE PH :.....14**  
    **I.6.3. L'ABSENCE DE L'OXYGENE :.....14**  
    **I.6.4. LE RAPPORT C/N :.....14**

---

<b>I.6.5. LE BRASSAGE :</b> .....	<b>15</b>
<b>I.6.6. LA PRESSION PARTIELLE EN HYDROGENE :</b> .....	<b>15</b>
<b>I.6.7. L'HUMIDITE :</b> .....	<b>15</b>
<b>I.7. LE DIGESTEUR :</b> .....	<b>15</b>
<b>I.8. LES DIFFERENTES FORMES DES DIGESTEURS :</b> .....	<b>16</b>
<b>I.9. LES DIFFERENTS TYPES DE DIGESTEUR :</b> .....	<b>18</b>
<b>I.9.1. LE MODE D'ALIMENTATION DES DIGESTEURS :</b> .....	<b>18</b>
<b>I.9.1.1. Le digesteur batch ou discontinu :</b> .....	<b>18</b>
<b>I.9.1.2. Le digesteur continu :</b> .....	<b>18</b>
<b>I.9.1.3. Le digesteur semi continu :</b> .....	<b>19</b>
<b>I.9.2. CLASSIFICATION SELON LE TYPE DE SUBSTRAT :</b> .....	<b>19</b>
<b>I.9.2.1. Solide :</b> .....	<b>19</b>
<b>I.9.2.2. Semi solide ou pâteux :</b> .....	<b>19</b>
<b>I.9.2.3. Liquide :</b> .....	<b>20</b>
<b>I.9.3. CLASSIFICATION SELON LE NOMBRE D'ETAPES :</b> .....	<b>20</b>
<b>I.9.3.1. Le procédé en mono-étape :</b> .....	<b>20</b>
<b>I.9.3.2. Le procédé en bi-étape :</b> .....	<b>20</b>
<b>I.10. LE SUBSTRAT :</b> .....	<b>21</b>
<b>I.11. QUELQUES DIGESTEURS REALISES EN ALGERIE :</b> .....	<b>22</b>
<b>I.12. LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DE BIOGAZ :</b> .....	<b>23</b>
<b>I.12.1. LES AVANTAGES :</b> .....	<b>23</b>
<b>I.12.2. LES INCONVENIENTS :</b> .....	<b>24</b>
<b>I.13. CONCLUSION :</b> .....	<b>24</b>

## **Chapitre II**

<b>II.1. INTRODUCTION :</b> .....	<b>27</b>
<b>II.2. ETUDE DE FAISABILITE :</b> .....	<b>27</b>
<b>II.3. LE DEVELOPPEMENT DE LA METHANISATION AGRICOLE :</b> .....	<b>27</b>
<b>II.3.1. APPUI A LA GESTION DE L'AZOTE DES EXPLOITATIONS AGRICOLES :</b> .....	<b>28</b>
<b>II.3.2. PRODUCTION D'ENERGIE RENOUVELABLE :</b> .....	<b>28</b>

---

<b>II.3.3. REDUCTION DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE :</b>	<b>28</b>
<b>II.3.4. CREATION D'ACTIVITE ECONOMIQUE ET D'EMPLOIS :</b>	<b>28</b>
<b>II.3.5. CREATION D'OPPORTUNITES EN AGRONOMIE :</b>	<b>29</b>
<b>II.4. QUELQUES QUESTIONS A SE POSER AVANT DE DEMARRER UN PROJET DE METHANISATION :</b>	<b>29</b>
<b>II.5. CAHIER DE CHARGE :</b>	<b>30</b>
1) <b>DEFINITION DU SITE :</b>	<b>30</b>
2) <b>LES VARIATIONS MENSUELLES DES TEMPERATURES DANS LA REGION :</b>	<b>30</b>
3) <b>LE GISEMENT :</b>	<b>30</b>
➤ <b>Gisement agricole :</b>	<b>30</b>
➤ <b>Gisement non agricole :</b>	<b>31</b>
4) <b>CARACTERISTIQUES DU GISEMENT :</b>	<b>32</b>
5) <b>ALIMENTATION QUOTIDIENNE DU DIGESTEUR :</b>	<b>32</b>
6) <b>DETERMINATION DES BESOINS ENERGETIQUES :</b>	<b>32</b>
➤ <b>Besoins énergétiques liés au(x) bâtiment(s) d'habitation :</b>	<b>33</b>
➤ <b>Besoins énergétiques liés au(x) bâtiment(s) technique(s) et ouvrages de l'unité de méthanisation :</b>	<b>33</b>
➤ <b>Besoins énergétiques spécifiques à l'exploitation ou extérieurs à l'exploitation agricole :</b>	<b>33</b>
7) <b>PARAMETRE DE FONCTIONNEMENT DU DIGESTEUR :</b>	<b>33</b>
8) <b>LA PRODUCTION DE BIOGAZ :</b>	<b>34</b>
9) <b>LE CO-GENERATEUR :</b>	<b>35</b>
10) <b>LE DIGESTAT :</b>	<b>35</b>
10.1. <b>Séparateur de phases :</b>	<b>35</b>
10.2. <b>Composition des différentes fractions des digestats :</b>	<b>36</b>
11) <b>ÉTUDE ECONOMIQUE, ENERGETIQUE ET ENVIRONNEMENTALE :</b>	<b>36</b>
11.1. <b>Les paramètres variables :</b>	<b>37</b>
11.2. <b>Equilibre économique des installations agricoles auditées :</b>	<b>37</b>
12) <b>QUELS SONT LES COUTS :</b>	<b>38</b>
a) <b>Coûts d'exploitation et recettes :</b>	<b>38</b>
b) <b>Résumé des coûts et du rendement économique des infrastructures :</b>	<b>38</b>
c) <b>Les installations en milieu agricole :</b>	<b>39</b>



---

<b>II.6. MODELES D’EVALUATIONS DE LA PRODUCTION DU BIOGAZ :</b>	<b>40</b>
A) EVALUATION DE LA PRODUCTION QUOTIDIENNE DE BIOGAZ, DE METHANE ET D’ENERGIE PRIMAIRE :	40
B) DETERMINATION DE LA QUANTITE D’ENERGIE PRODUITE :	40
➤ Production de l’énergie électrique :	40
➤ Production de l’énergie thermique :	41
C) QUELQUES REPERES :	41
<b>II.7.CONCLUSION :</b>	<b>41</b>

### **Chapitre III**

<b>III.1. DEFINITION D’UNE INTERFACE :</b>	<b>43</b>
<b>III.2. Définition du programme JAVA :</b>	<b>43</b>
<b>III.3. L’Algorithme de l’interface de faisabilité et de dimensionnement d’une unité de méthanisation agricole :</b>	<b>43</b>
<b>III.4. Guide d’utilisation de l’interface :</b>	<b>45</b>

### **Chapitre IV**

<b>Résultats de simulation et discussions</b>	<b>53</b>
<b>Conclusion générale :</b>	<b>57</b>
<b>Références Bibliographiques</b>	
<b>ANNEXE</b>	

## Liste des figures :

### Chapitre I

<b>Figure I.1 :</b> Schéma des étapes de la méthanisation .....	12
<b>Figure I.2:</b> Schéma du digesteur retenu .....	16
<b>Figure I.3 :</b> Schéma des différentes formes des digesteurs. ....	16
<b>Figure I.4 :</b> Un digesteur cylindrique en béton. ....	17
<b>Figure I.5 :</b> Un digesteur ovoïde construit en inox. ....	17
<b>Figure I.6 :</b> Un digesteur continental. ....	17
<b>Figure I.7 :</b> Schéma de principe d'un digesteur alimenté en discontinu. ....	18
<b>Figure I.8 :</b> Schéma de principe d'un digesteur alimenté en continu. ....	19
<b>Figure I.9 :</b> Un digesteur par voie pâteuse. ....	19
<b>Figure I.10 :</b> Un digesteur alimenté en continu avec une teneur en MS <5%. ....	20
<b>Figure I.11 :</b> Schéma d'un dispositif réalisé .....	22
<b>Figure I.12 :</b> Le digesteur réalisé .....	22
<b>Figure I.13 :</b> Schéma d'un digesteur alimenté par un chauffe-eau solaire réalisé .....	23

### Chapitre III

<b>Figure III. 1 :</b> Algorithme du logiciel construit.....	44
<b>Figure III. 2:</b> Interface d'application.....	45
<b>Figure III. 3:</b> choisit de nouveau ou ancien client.....	45
<b>Figure III. 4 :</b> liste des anciens clients.....	46
<b>Figure III. 5 :</b> les données d'ancien client.....	46
<b>Figure III. 6:</b> Définition du site.....	47
<b>Figure III. 7:</b> Les variations mensuelles des températures dans la région. ....	47
<b>Figure III. 8 :</b> Choix le mode du gisement.....	48
<b>Figure III. 9 :</b> Le gisement agricole.....	48
<b>Figure III. 10 :</b> Gisement non agricole.....	49
<b>Figure III. 11 :</b> Caractéristiques du gisement.....	49
<b>Figure III. 12 :</b> Des besoins énergétiques.....	50
<b>Figure III. 13 :</b> Evaluation de la production quotidienne de biogaz, de méthane. ....	50
<b>Figure III. 14 :</b> la taille de l'installation (quantité de biogaz produite).....	51
<b>Figure III. 15 :</b> Les Résultats d'Energies et le prix.....	51

## Chapitre IV

<b>Figure IV. 1 :</b> Inséré Les donnée de site.....	53
<b>Figure IV. 2 :</b> Insertion des températures . .....	53
<b>Figure IV. 3 :</b> Insertion les données.....	54
<b>Figure IV. 4 :</b> Insertion les données pour calculer la quantité.....	54
<b>Figure IV. 5 :</b> calculer la quantité de méthane produit.....	55
<b>Figure IV. 6 :</b> Affichage résultat.....	55

## Liste des tableaux :

### Chapitre 1

<b>Tableau I.1 :</b> composition du biogaz selon origines.....	10
<b>Tableau I.2 :</b> les caractéristiques du biogaz et du méthane déterminées à 0°C et 1 atm ....	10
<b>Tableau I.3 :</b> pouvoir calorifique du biogaz en fonction de la proportion de méthane .....	11

### Chapitre 2

<b>Tableau II. 1:</b> Définition du site.....	30
<b>Tableau II. 2 :</b> Moyenne des températures mensuelles sur une année.....	30
<b>Tableau II. 3:</b> Le prestataire définit la quantité et la qualité des matières organiques méthanisables.....	31
<b>Tableau II. 4:</b> Composition massique du gisement.....	32
<b>Tableau II. 5:</b> quantités journalières d'intrants à apporter.....	32
<b>Tableau II. 6:</b> Caractéristiques de fonctionnement du digesteur pour l'été et l'hiver.....	34
<b>Tableau II. 7:</b> production de méthane par les différents substrats.....	34
<b>Tableau II. 8:</b> caractéristiques du co-générateur.....	35
<b>Tableau II. 9:</b> Répartition des différentes fractions de digestat après séparation.....	36
<b>Tableau II. 10:</b> Caractéristiques des digestats.....	36
<b>Tableau II. 11:</b> coûts d'exploitation et recettes.....	38
<b>Tableau II. 12 :</b> Résumé des spécifications de base de la centrale.....	38

## **Nomenclature :**

DCO : Demande Chimique en Oxygène (g/L).

UASB : Réacteur anaérobie à lit de boues et à flux ascendant (Upflow Anaerobic Sludge Blanket).

EGSB : réacteur à lit de boue granulaire expansé (Expanded Granular Sludge Bed).

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

AGV : Acides Gras Volatils.

MO : Matière organique.

MV : matière volatile.

MS : matière sèche.

PCI : Pouvoir calorifique inférieur.

ST : Solides totaux.

PQEP : production quotidienne d'énergie primaire.

Dispo : disponibles.

PQM : production quotidienne de méthane.

PQB : production quotidienne de biogaz.

## **Glossaire :**

**Aérobic** : en présence d'oxygène

**Anaérobic** : en l'absence d'oxygène

**Biogaz** : Mélange gazeux produit par la bio méthanisation de déchets organiques, dont les principaux constituants sont le méthane et le dioxyde de carbone.

**Combustible fossile** : Matière organique qui a subi des transformations d'état ou de forme chimique lors d'un stockage prolongé dans l'écorce terrestre, et qui est utilisé comme source d'énergie. Exemple : charbon, pétrole.

**Digestat** : Résidu liquide issu de la bio méthanisation et comprenant les composés non dégradés.

**Effet de serre** : Réchauffement supplémentaire de l'atmosphère suite à l'augmentation de la présence dans celle-ci de gaz absorbant le rayonnement infra – rouge émis par la terre. Cette augmentation est notamment liée au développement des activités industrielles. Exemple de gaz à effet de serre : le méthane, le dioxyde de carbone, CFC (anciens gaz propulseurs, liquides de refroidissement).

**Matière organique** : Matière contenant des composés carbonés, contrairement à la matière minérale.

**Microorganisme** : Organisme (être vivant animal ou végétal) de très petite taille, comme les bactéries.

**Pouvoir calorifique inférieur (PCI)** : Chaleur dégagée (MJ/Nm<sup>3</sup>) par la combustion de 1 Nm<sup>3</sup> de biogaz lorsque l'eau produite reste à l'état vapeur.

# *Introduction générale*

## **Introduction générale**

La crise énergétique et ses conséquences sur l'économie mondiale révèle l'extrême dépendance des pays développés ou en voie de développement vis-à-vis des énergies fossiles. Cette nouvelle conjoncture suppose la mise au point ou le développement de procédés susceptibles de constituer de nouvelles sources d'énergie.

L'utilisation de la biomasse apparaît comme une solution satisfaisante. En effet des déchets organiques biologiques telles que les déchets ménagers ou animale, peuvent produire avantageusement de l'énergie. Ils représentent actuellement une source d'énergie renouvelable peu coûteuse, mais la principale difficulté réside dans la transformation de la biomasse d'une manière rentable.

Divers moyens sont appliqués dans ce but, ainsi la valorisation de la biomasse et sa transformation en énergie peut être assurée par divers processus comme la combustion, la pyrolyse ou par des procédés plus complexes, faisant intervenir des microorganismes conduisant à la production de gaz par fermentation anaérobie.

La fermentation anaérobie, aussi appelée la méthanisation est un processus biologique de dégradation de la matière organique par une flore microbienne qui se déclenche en absence d'air. Différents micro-organismes transforment les substrats organiques complexes en molécules simples (monomères, acides, alcools ...), puis en biogaz, composé majoritairement de méthane et de dioxyde de carbone.

La fermentation anaérobie des matières organiques dans un récipient fermé à col étroit permet la production d'une quantité de gaz suffisante pour servir de combustible. Le lisier fermenté constitue un engrais de bonne qualité car lors de la fermentation les bactéries triplent la quantité d'azote.

Pour optimiser la vitesse de dégradation de la matière organique, la méthanisation est conduite sans apport d'air dans des enceintes confinées appelées digesteurs. Les paramètres de la digestion sont ainsi maîtrisés.

Le biogaz issu de méthanisation est un mélange inflammable composé principalement de méthane ( $\text{CH}_4$ ) et de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ). Ce biogaz est une source d'énergie renouvelable dans la mesure où il est issu de matières organiques d'origine végétale ou animale ; dont les cycles de renouvellement sont courts.



L'objectif du présent mémoire consiste à étudier de faisabilité et le dimensionnement d'une unité de méthanisation agricole.

Cette étude doit apporter au porteur de projet les éléments techniques, économiques lui permettant de déterminer la faisabilité de son projet de méthanisation et de consulter les entreprises en vue d'investir sur le scénario optimal retenu.

Ce document décrit les investigations à mener et les données minimales que le prestataire technique doit restituer au bénéficiaire à l'issue de l'étude. Il donne également des recommandations concernant le déroulement de la prestation et la présentation des résultats. Il est à adapter au cas particulier du projet étudié et aux objectifs du porteur de projet.

Le scénario retenu doit être décrit aussi précisément que possible. L'analyse économique, environnementale et financière seront également détaillés, afin que le porteur de projet lance ensuite une consultation en vue de la réalisation de l'investissement.

Pour mener à bien les objectifs cités ci-dessus, nous avons conçu un outil (Logiciel) sous forme d'interface graphique permettant de simuler chaque cas .

Pour mener à bien notre travail, ce mémoire sera organisé de la manière suivante :

- Une partie généralités sur la méthanisation : où il sera question de cerner le concept de production du biogaz, ses avantages et inconvénients.
- Une deuxième partie matérielle et méthodes : étude de faisabilité d'une unité de méthanisation.
- Une troisième partie de présenter interface simulation et commentaire.

Et enfin on clôture par une conclusion générale

# *Chapitre I*

*Etude Bibliographique*

### **I.1. Introduction :**

L'objectif visé par la technologie du biogaz était de produire de l'énergie, mais très vite le composant environnement est apparu comme une raison supplémentaire importante pour construire de telles installations. En effet cette tâche concerne les voies de valorisation du biogaz, notre contribution à cette tâche se résume dans la mise au point d'un outil informatique d'aide à la décision pour la valorisation du biogaz.

La technologie des méthanisations apparaît comme une technique prometteuse pour relever ce défi. Ce premier chapitre est une synthèse bibliographique et il est structuré comme suit :

Dans un premier temps, nous allons définir la méthanisation et rappeler les étapes et les procédés de production du méthane, puis suivront les principes et les types de la digestion anaérobique, notamment ses avantages énergétiques.

### **I.2. Histoire de la méthanisation :**

L'émission de gaz par les marais fut découverte en 1776 par physicien italien Alessandro Volta [1], découvrait que les gaz émis par les terres marécageuse étaient combustibles, le 'gaz des marais' contient du méthane (65%) qui s'enflamme facilement, du gaz carbonique et des autres gaz. Cette observation allait mener à la théorie et à la pratique actuelle de récupération de l'énergie des gaz produits par la décomposition des matières organiques.

Dalton, Davy et Humphry [2] ont découvert la composition chimique du gaz, Ils montrèrent que le méthane était produit à partir des résidus animaux en décomposition. La digestion anaérobie de produits agricoles a débuté en 1808, avec les travaux de Davy, mettant en œuvre la fermentation anaérobie de paille et de fumier de canard.

En 1876, Herter [3] démontra que la transformation des boues en méthane et en dioxyde de carbone s'effectue en proportion stœchiométrique.

Le premier digesteur industriel fut construit en 1859 en Inde [4]. Le développement et l'intérêt pour cette technologie ont émergé dans une installation traitant des effluents sanitaires d'une léproserie utilisant le gaz pour l'éclairage. D'autres applications sont apparues de la digestion anaérobie des boues notamment pour éclairer les rues en Angleterre.

En 1884, Gayon [4], élève de Louis Pasteur, lors d'une expérimentation a obtenu 100 L de méthane par mètre cube de fumier à 35 °C. Pasteur suggéra d'utiliser le gaz produit pour chauffer ou éclairer.

Les travaux menés par Bunsen (1856), Hoppe-Steyler ([5] (1886), et Omelianskii (1900) ont permis de démontrer que les réactions enzymatiques dégradant la matière organique forment des acides gras et des alcools puis une conversion en méthane est effectuée [4].

Buswell, en 1920, initia la recherche fondamentale par la description des principales voies de la dégradation anaérobie et conçut les premières unités déméthanisations à la ferme [6].

Le concept de petites unités de méthanisation utilisant des sous-produits agricoles fut développé dès la fin des années 1930 par les travaux de Ducellier et Isman, enseignants à l'École Nationale d'Agriculture en Algérie. Leurs recherches ont conduit au dépôt d'un brevet en 1939 aux États Unis [7].

Cinq cents à mille unités de méthanisation de ce type ont été installées en France lors de la seconde guerre mondiale. Peu d'entre elles sont encore en fonctionnement. Par la suite, la Société Centrale d'Approvisionnement de France a acquis les droits de ce brevet permettant de travailler à la diminution de coût de production. Différents inconvénients apparurent au cours de ces travaux concernant la construction, le système de chauffage et la présence d'écume. En 1948, dix unités étaient en fonctionnement [5].

En 1951, la Société des Ingénieurs spécialisée en agriculture basée en Angleterre a été informée de l'importance de la production du gaz par ce processus pouvant servir au fonctionnement des tracteurs sur une exploitation agricole.

Au début des années soixante-dix, une centaine d'installations ont été construites en France. Les premiers travaux scientifiques apparurent à cette période. La fin des années soixante-dix n'a pas été propice au développement de cette technologie. En effet, les sources énergétiques fossiles étaient disponibles et bon marché, elles ont conduit à une stagnation de ce processus. En 1973 puis en 1979-1980, deux chocs pétroliers ont affecté l'économie des pays importateurs de pétrole. Une décadence affecta alors les procédés de méthanisation.

Cependant, la prise de conscience du besoin de diminuer les émissions de gaz à effet de serre, de produire des énergies renouvelables et de participer au développement durable a entraîné un regain d'intérêt pour ce procédé. La valorisation des déchets aussi bien ménagers qu'agricoles intervient directement dans cette optique de produire de l'énergie par l'utilisation de produits renouvelables ([5] , [6]).

En 1998, Henham et Makkar, ont étudié l'effet de la qualité du biogaz sur les performances d'un moteur hybride, à injection mixte de gasoil et de gaz. Ces auteurs ont montré que les performances du moteur augmentent avec la teneur en méthane (58%).

Cependant, un pourcentage plus élevé de méthane implique un biogaz plus énergétique et des performances améliorées (plus de puissance et de chaleur générées) [8].

Kim et al, 2004 ont étudié l'influence de différentes techniques de prétraitement de substrat sur le rendement de production de biogaz à partir des boues de station d'épuration. Les techniques testées sont : chimiques, ultrasoniques, thermochimiques et thermiques. Ces auteurs ont trouvé que le prétraitement thermochimique a donné les meilleurs rendements de production de biogaz et d'élimination de la matière organique. Les essais menés ont montré que la production de méthane a augmenté de plus de 34% et la réduction de la DCO a atteint 67,8%. Ces chercheurs ont trouvé que le volume de biogaz produit dans le cas de traitement thermochimique est de 5037L/m<sup>3</sup>. Quant aux autres techniques : chimiques, ultrasoniques et thermiques, le volume recueilli est seulement de 4147L/m<sup>3</sup>, 4413L/m<sup>3</sup> et 4843L/m<sup>3</sup> respectivement [9].

Martín Santos et al.2010 ont réalisé la digestion anaérobie des effluents liquides extraits à partir d'écorces d'oranges dans un réacteur agité mécaniquement. Les effluents testés sont fortement chargés en matière organique (150g DCO/L), ce qui les rend particulièrement polluants. Selon une stratégie différente par rapport aux travaux de la littérature et afin d'activer la biomasse libre contenue dans l'effluent à traiter, le réacteur a été alimenté avec un milieu synthétique composé principalement de glucose, d'acétate de sodium et d'acide lactique. Dans ce cas, la capacité en biogaz atteinte a été de 297NmL CH<sub>4</sub>/g DCO avec 84% de dépollution en un peu plus de 70h [10].

Le pouvoir fermentaire cible des effluents liquides extraits de déchets agricoles a été mis à profit par Fang et al. 2011. Ces auteurs ont proposé d'étudier la production de biogaz à partir de jus de pommes de terre. Pour cela, ils ont testé la capacité de production de trois types de bioréacteurs à savoir : réacteur en mode batch, le réacteur à lit de boue granulaire expansé (EGSB), et le réacteur à lit de boue anaérobie à flux ascendant (UASB). Le potentiel de méthane maximal déterminé en mode batch est de 470mL CH<sub>4</sub>/g MV). Ils ont montré que le potentiel de méthane obtenu dans le réacteur à lit de boue granulaire expansé était meilleur par comparaison à celui obtenu dans le réacteur à flux ascendant, il est de 380mL CH<sub>4</sub>/g MV avec un taux de charge organique de 3,2g DCO/L. Par contre, dans le réacteur à flux ascendant, la charge organique était plus élevée, elle était de 5,1g DCO/L,

ceci n'a pas permis d'améliorer le potentiel de méthane qui était de 240mL CH<sub>4</sub>/g MV [11].

En 2011, la France comptait 267 installations de méthanisation réparties dans différents secteurs produisant environ 1 000 GWh thermiques et 1 140 GWh électriques[12].

En Allemagne, il existe 7 100 établissements, dont 6 000 sont d'origine agricole. Ces unités produisent environ 19 000 GWh d'électricité [12].

Afin de déterminer les meilleures performances de traitement des déchets solides municipaux, Derbal et al. 2012 ont étudié l'influence de la température sur le procédé de méthanisation. Les expériences ont été menées dans un réacteur de capacité d'un litre et selon deux modes de température mésophile (35°C) et thermophile (55°C). Ils ont trouvé que le volume de biogaz produit dans le mode thermophile est relativement plus élevé comparativement au mode mésophile (0,481m<sup>3</sup>/kg et 0,450m<sup>3</sup>/kg respectivement).

La composition moyenne en biogaz pour les deux modes mésophile et thermophile est quasiment identique, elle est (CH<sub>4</sub>: 61,1%, CO<sub>2</sub>: 38,9%) et (CH<sub>4</sub>: 62,3%, CO<sub>2</sub>: 37,7%) respectivement [13].

La production de biogaz à partir des déchets de vinasse, a été réalisée par Syaichurrozi et al. (2013) en testant des rapports de DCO/N variés : 400/7, 500/7, 600/7 et 700/7. La fermentation a été menée en batch et à température ambiante durant 60 jours. Les résultats obtenus montrent que le volume optimal atteint de biogaz est de 139,17mL/g DCO pour une proportion de 600/7. Le modèle de Gompertz modifié et le modèle cinétique de biodégradation ont été utilisés pour décrire la cinétique de production de biogaz et de dégradation de la matière organique respectivement [14].

Scano et al. 2014 ont étudié la digestion anaérobie des déchets de fruits et légumes. L'étude expérimentale a été réalisée sur une période de 6 mois. Afin de maximiser le rendement de biogaz et d'améliorer sa qualité en termes de méthane, ces auteurs ont adopté différentes conditions : un taux de charge organique constant, un substrat d'alimentation équilibré et une teneur en sucres inférieure à 40%, ce qui leur a permis d'assurer la stabilité du procédé de méthanisation et d'obtenir un taux élevé en méthane, qui est de 0,43 Nm<sup>3</sup> /KgMV [15].

### **I.3. Etat des lieux de l'Algérie :**

Un premier digesteur fut construit à l'institut national agronomique d'EL Harrach et en 1948 on assiste à la mise en marche de la première voiture expérimentale au niveau africain. C'est en 1984 que le centre des équipements solaire de Bouzaréah (CDER) a relancé les recherches dans ce domaine à travers la réalisation d'un digesteur pilote à Bouzaréah et deux autres, l'un à Igli (Bechar) et l'autre au parc zoologique de Ben Aknoun[16].

En 2002, N. Mansouri et al : Première approche de la caractérisation du biogaz produit à partir des déjections bovines, l'article proposé présente une première approche de cette prospection qui consiste en l'installation d'un digesteur expérimental d'une capacité de 800 litres. Son utilisation pour une première biométhanisation mésophile a permis de produire 26,898 m<sup>3</sup> de biogaz à partir de 440 Kg de bouses de vaches durant 77 jours. La composition moyenne du biogaz est de 61% de méthane et de 35,65% de gaz carbonique[17].

La méthanisation des boues dans les régions chaudes de l'Algérie, notamment dans le sud-ouest de l'Algérie a été effectuée par Kaloum et al. 2011. Les expérimentations ont été menées dans un digesteur de laboratoire de capacité d'un litre. La quantité de biogaz produit dans ce digesteur était d'environ de 280,31NmL avec une capacité de production de 30NmL/mg DCO. Les performances d'élimination de la matière organique sont atteintes à 88%, ce qui permet de diminuer les quantités de boues à évacuer de la station et permet leur stockage [18].

En 21 Juin 2011, A.Zaatri et al (Etude de bioréacteurs anaérobies expérimentaux pour la production de méthane). Ce travail présente une première exploration dans la conception, la simulation et l'analyse expérimentale de bioréacteurs anaérobies à alimentation discontinue, Des résultats encourageants ont été obtenus avec des moyens très simples. Le bioréacteur réalisé a produit une quantité appréciable de méthane après environ 27 jours d'incubation [19].

### **I.4. Définition du biogaz : [20]**

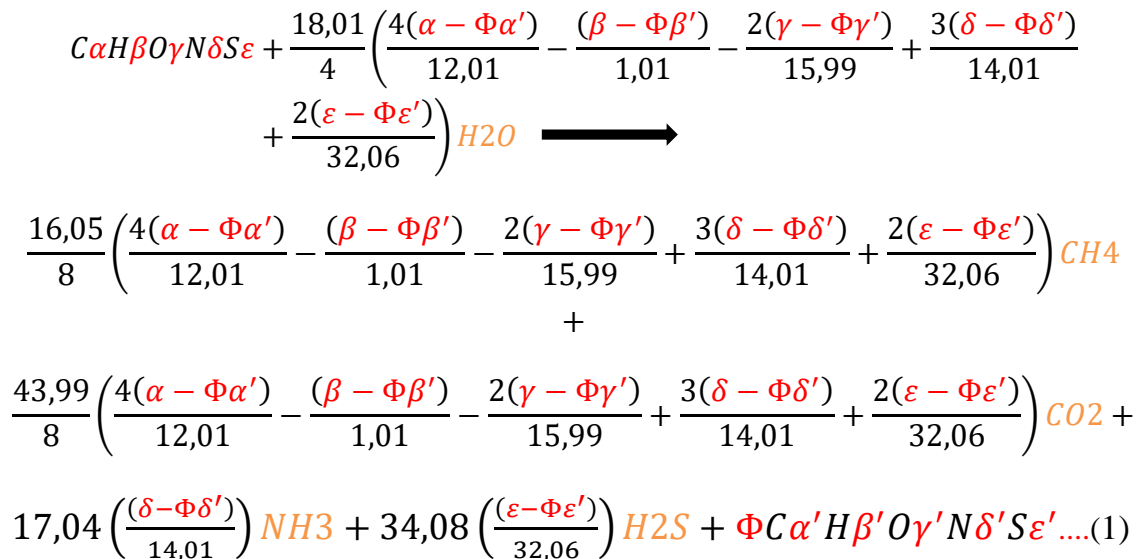
Le biogaz est un gaz résultant du processus de dégradation biologique des matières organiques en présence ou absence d'oxygène. Il contient une forte proportion de méthane et possède donc un fort potentiel calorifique et énergétique. Dans notre cas, il est produit

dans les CET (Centres d'Enfouissement Techniques), dans les méthaniseurs et dans les digesteurs de boues de stations d'épuration. Il doit être capté pour éviter les nuisances odeurs et contribution à l'effet de serre. Une fois capté, il peut être valorisé car il constitue une source d'énergie qui se substitue à l'énergie fossile.

**I.4.1. Equation gouvernante de la digestion anaérobie :**

L'équation stœchiométrique (1) qui gouverne la fermentation anaérobie et qui permet de calculer les quantités des composés produits : (Méthane (CH<sub>4</sub>), Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), Ammoniaque (NH<sub>3</sub>), Sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S) et une quantité de la biomasse fraîche), en considérant une unité de masse pour les réactifs [21]. La production du biogaz est désormais d'environ 70% de la masse organique dégradée pour les déchets organiques solides (Thermophilicdigester), et d'environ 67% pour la matière organique issue des stations d'épuration (Fixedbeddigester), [22] et [23].

L'équation suivante, gouverne la production de biogaz stœchiométrique à partir de n'importe quelle composition chimique de la matière organique, [24] :



$\alpha, \beta, \gamma, \delta$  et  $\varepsilon$ : (%) de la composition massique de la matière organique  
 $\alpha', \beta', \gamma', \delta'$  et  $\varepsilon'$ : (%) de la composition massique de la biomasse fraîche  
 $\Phi$ : rapport de la matière organique convertie dans la biomasse fraîche ~5%.



**I.4.2. Composants du biogaz : [25]**

Le biogaz se caractérise en premier lieu par sa composition chimique et par les caractéristiques physiques qui en découlent. Il est essentiellement un mélange de méthane (CH<sub>4</sub>) et de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) inerte. Cependant le nom « biogaz » regroupe une grande variété de gaz issus de procédés de traitement spécifiques, à partir des déchets organiques diverses (industriels, d’origine animale, ménagère...)

**Tableau I.1 : composition du biogaz selon origines [26].**

Composant	Décharge d’ordures ménagères (OM à 80%) production naturelle sans aspiration	Décharge d’ordures ménagères (OM à 80%) production forcée avec aspiration	Décharge d’ordures ménagères et de déchets industriels (50%-50%) production forcée avec aspiration	Ordures ménagères triées en digesteurs	Boues de stations d’épuration	Lisier de bovins ou d’ovins en fermenteurs	Distillerie
CH <sub>4</sub> en %	50-58	30-55	25-54-	50-60	60-75-	60-75-	68
CO <sub>2</sub> en %	25-34	22-33	14-29	38-34	33-19	33-19	26
N <sub>2</sub> en %	18-2	26-6	49-17	5-0	1-0	1-0	-
O <sub>2</sub> en %	1-0	8-2	8-5	1-0	< 0.5	< 0.5	-
H <sub>2</sub> O en %	4 (à30°C)	4 (à30°C)	4 (à30°C)	6 (à30°C)	6 (à30°C)	6 (à30°C)	8 (à30°C)
Total en %	100	100	100	100	100	100	100
H <sub>2</sub> S mg/m <sup>3</sup>	20-50	5-20	100-900	100-900	1000-4000	2000-10000	400
NH <sub>3</sub> mg/m <sup>3</sup>	-	-	-	-	-	50-100	-
Aromatique mg/m <sup>3</sup>	2	1	0-200	0-200	-	-	-
Organochlorés ou organofluorés mg/m <sup>3</sup>	0-200	0-100	100-800	100-800	-	-	-

**I.4.3. Les caractéristiques du biogaz :**

**Tableau I.2 : les caractéristiques du biogaz et du méthane déterminées à 0°C et 1 atm [27]**

Caractéristiques	Méthane (100% CH <sub>4</sub> )	Biogaz (70%)
PCI (kWh)	9.94	6.96
Densité/air	0.55	0.85
Vitesse de déflagration (m/s)	0.38	0.21
Limites d’inflammation (%)	5 – 15	6 – 18
Potentiel de combustion	54.55	24.71

Il est évident que le pouvoir calorifique du biogaz est également proportionnel à sa teneur en méthane comme l'indique le tableau suivant :

**Tableau I.3** : pouvoir calorifique du biogaz en fonction de la proportion de méthane [27].

<b>Proportion en CH<sub>4</sub> (%)</b>	<b>PCS (KWh / m<sup>3</sup>)</b>	<b>PCI (kWh / m<sup>3</sup>)</b>
50	4.8	4.3
60	5.7	5.1
70	6.7	6.0
80	7.6	6.9
90	8.6	7.8
100	9.5	8.6

A titre indicatif, le pouvoir calorifique d'1m<sup>3</sup> de biogaz (contenant 60% de méthane et 30% de gaz carbonique), peut être comparé à celui d'autres combustibles ou d'autres sources énergétiques [28].

### **I.5. Définition de La méthanisation :**

La méthanisation (ou appelée "digestion anaérobie") est la transformation de la matière organique en un biogaz composé principalement de méthane(CH<sub>4</sub>) (50% à75%) et de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) (25 % à 45%) et de quelques gaz traces (NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S) [29].

C'est une transformation naturelle qui se réalise dans tous les milieux où l'on trouve la matière organique en absence d'oxygène et où les conditions physico-chimiques sont compatibles avec celles du monde microbien vivant Elle est l'une des technologies permettant efficacement le traitement de la matière organique des déchets et de transformer les polluants de l'environnement en sources de richesse. Grace à ce procédé, il est possible de stabiliser les déchets, de réduire leurs volumes et enfin de produire un combustible de haute valeur énergétique. Cette transformation des déchets organiques en biogaz n'est pas simple, il s'agit en fait d'une série des réactions successives qui sont dues à diverses catégories de bactéries. Ces bactéries ont des conditions bien définies et des exigences particulières pour se développer à savoir l'absence d'oxygène, un pH proche de la neutralité, et une gamme de température bien déterminée.

### I.5.1. Les étapes de la méthanisation :

Lors du processus de digestion anaérobie, la conversion de composés organiques complexes en méthane et en dioxyde de carbone est réalisée par l'action concertée de microorganismes appartenant à une communauté microbienne complexe, tant d'un point de vue taxonomique que fonctionnel. Il a été recensé [30] près de 140 " espèces " sur un inventaire de 579 individus dans un digesteur. Ces populations mixtes de microorganismes sont majoritairement organisées sous la forme de biofilms ou d'agrégats granulaires [31]. Plus les substances présentes dans les eaux usées sont complexes, plus il y aura d'espèces microbiennes différentes présentes dans ces biofilms [32]. Le modèle développé par Zeikus (1980) [33] pour décrire le processus de méthanisation fait consensus (Figure 1.1), il comprend quatre étapes, réalisées par différents groupes de microorganismes. Chaque étape mène à la formation de composés intermédiaires, servant à leur tour de substrats lors de la phase suivante. Chaque étape est maintenant détaillée.

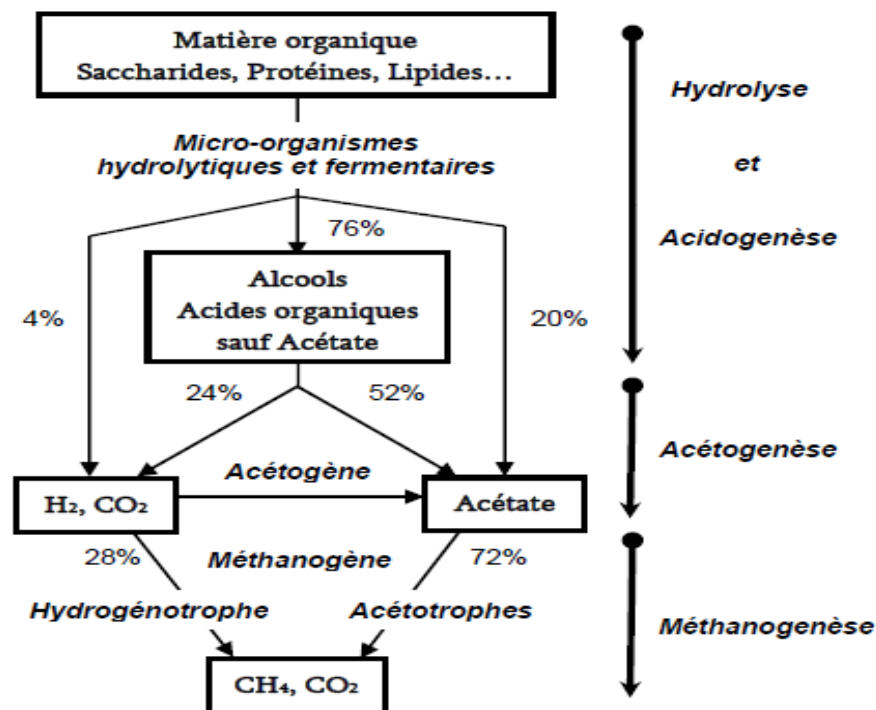


Figure 1.1 : Schéma des étapes de la méthanisation [34].

La méthanisation des matières organiques s'effectue en quatre étapes principales sous l'action de différents groupes de micro-organismes, il s'agit donc de :

**I.5.1.1. L'hydrolyse :**

Où les macromolécules (les polymères) qui composent la matière organique se dégradent en petites molécules solubles (monomères). Les lipides se dégradent en acides gras et glycérols, les protéines se dégradent en acides aminés, en peptides et en chaînes courtes, les polysaccharides se dégradent en monosaccharides et disaccharides, la cellulose enfin se transforme en glucose et en cellobiose. [35]

**I.5.1.2. L'acidogénèse :**

C'est la transformation des monomères en gaz carbonique, hydrogène et acides organique [36].

Il apparaît alors des acétates, des alcools tels l'éthanol, de l'ammoniaque et des acides gras volatiles (AGV) comportant de 2 à 5 atomes de carbone.

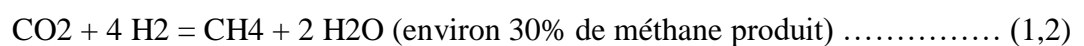
**I.5.1.3. L'acétogénèse :**

A ce niveau, les micro-organismes transforment les acides gras volatils et les alcools de l'étape précédente en hydrogène, gaz carbonique et acétates. Sulfure d'hydrogène se forme également lors de cette phase de transformation [35].

**I.5.1.4. La méthanogénèse :**

Représente la dernière étape de la méthanisation ou le méthane apparaît. Les bactéries méthanogènes interviennent pour élaborer le méthane à partir de l'hydrogène, du gaz carbonique et des acétates suivants les deux réactions suivantes [35].

1- De réduction du CO<sub>2</sub> :



2- De décarboxylation de l'acide acétique :



La production du méthane est donc issue d'un ensemble complexe de réactions.

**I.6. Les paramètres physico-chimiques influençant la digestion anaérobie : [37]**

La performance des procédés est liée étroitement avec les paramètres physicochimiques du milieu (température, capacité tampon). Des paramètres supplémentaires doivent être pris en compte dans la mise en œuvre de la digestion anaérobie en voie sèche tels que le contenu en particule solides, l'inoculum utilisé et la teneur en eau influençant directement ces performances.

**I.6.1. La température :**

Deux plages de températures optimales peuvent être définies : la zone mésophile (autour de 35°C) et la zone thermophile (entre 55-60°C) avec une décroissance de l'activité de part et d'autre de ces températures. Ces températures de fonctionnement dépendent surtout du réacteur (le digesteur) qui est prévu pour fonctionner dans une de ces gammes de températures.

**I.6.2. Le pH :**

Pour une digestion anaérobie des boues d'épuration le pH est autorégulé dans le digesteur avec des valeurs optimales comprises entre 6,8 et 7,4 car l'alcalinité produite par les méthanogènes sous forme de CO<sub>2</sub>, d'ammonium et de bicarbonate, permet de maintenir le pH dans la gamme de neutralité, mais un ajout de bicarbonate de soude peut être nécessaire pour le maintenir.

**I.6.3. L'absence de l'oxygène :**

L'oxygène est évidemment un inhibant (réaction anaérobie), cependant une petite quantité d'oxygène n'inhibe pas totalement et immédiatement la production de biogaz. En effet, certains groupes de bactéries, appelées anaérobies facultatifs, peuvent tolérer et absorber une petite quantité d'oxygène évitant ainsi d'inhiber les autres groupes de bactéries ne tolérant pas du tout l'oxygène (bactéries strictes). L'absence de l'oxygène est une condition pour le développement des bactéries méthanogènes, qui sont anaérobies stricts.

**I.6.4. Le rapport C/N :**

Le carbone et l'azote sont des éléments essentiels à la nutrition des microorganismes, ainsi que le phosphore et le soufre. Le carbone est primordial pour les bactéries en tant que source d'énergie et l'azote autant qu'élément de structure cellulaire. Les rapports C/N supérieurs à 23/1 ont été identifiés comme inadaptés pour une digestion optimale, et des rapports inférieurs à 10/1 se sont révélés inhibiteurs selon des études portant sur la digestion anaérobie thermophile des déchets de volailles et d'autres substrats celluloseux [38]. Pour un fonctionnement optimum d'un réacteur à chargement continu, les bactéries ont besoin d'un rapport C/N convenable pour leur métabolisme le rapport C/N idéal entre 20 et 30 [39].

**I.6.5. Le brassage :**

Le brassage du digesteur n'est pas essentiel pour que la digestion anaérobie se déroule. Cependant, il permet l'obtention d'un milieu homogène, c'est un moyen de favoriser les transferts thermiques, ioniques et métaboliques. Il permet aussi une augmentation des contacts entre les substrats à digérer et la flore fixée et évite les court circuits dans le réacteur, un court-circuit correspond à la sortie prématurée d'une partie du substrat de la cuve car celle-ci ne suit pas le parcours habituel, l'effluent ne subit pas donc la méthanisation totale. Le brassage se fait à l'aide d'un agitateur mécanique, ou d'un système hydraulique par la recirculation de la boue ou réinjection du gaz produit.

**I.6.6. La pression partielle en hydrogène :**

L'hydrolyse est une molécule clé dans le processus de la digestion anaérobie, c'est un substrat indispensable et énergétique pour les bactéries méthanogènes. Il est produit lors de l'acétogénèse à partir des produits de l'acidogénèse (AGV), cette faible pression partielle est assurée par les bactéries homoacétogénèse et hydrogénophiles qui consomment l'hydrogène au fur et à mesure de sa production.

**I.6.7. L'humidité :**

Pour toute activité biologique, la présence d'eau est indispensable surtout à la multiplication des microorganismes, selon L. Marache, une humidité minimale de 60 à 70 % est nécessaire à la méthanisation.

**I.7. Le digesteur :**

Le digesteur cœnurose réalise la méthanisation, appelé aussi fermenteur ou bioréacteur anaérobie. Nom donné au réacteur chimique où se déroule la fermentation des déchets à forte teneur en matière organique. Ce réacteur est composé d'une cuve fermée cylindrique étanche à l'air et de préférence isolée thermiquement de l'extérieur dans laquelle les microorganismes se côtoient pour dégrader chimiquement et biologiquement les effluents organiques. Il peut être équipé d'un système de chauffage, d'un système d'agitation, d'un système de prélèvement et d'un système de mesure de teneur en gaz de dispositifs permettant le contrôle de différents paramètres tels que le pH, la température, la pression [37].

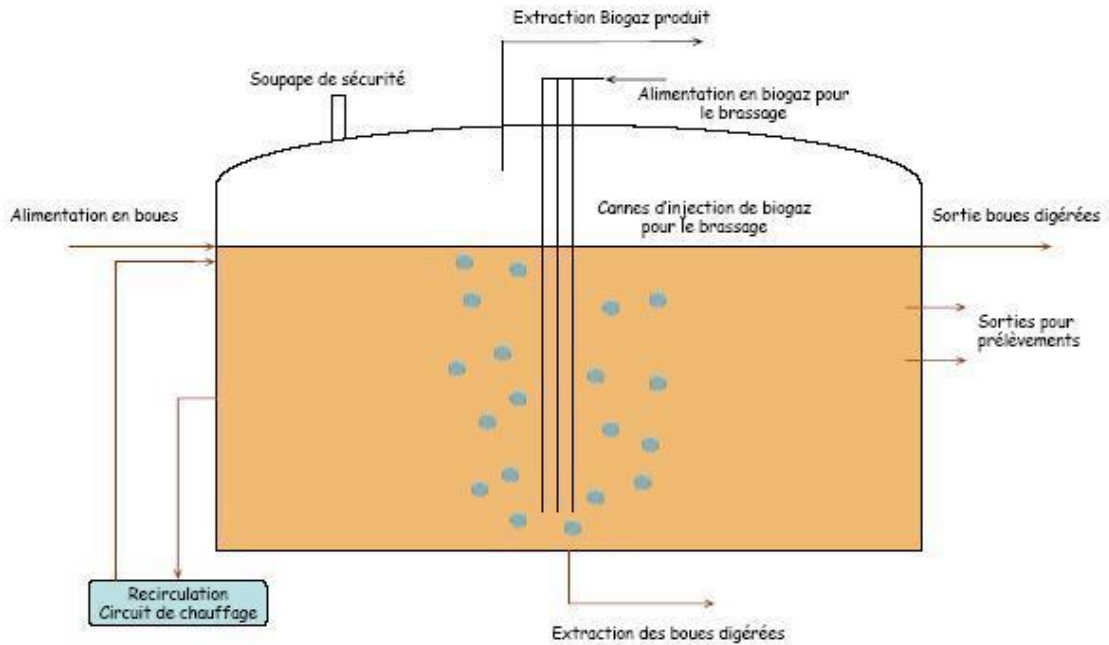


Figure I.2: Schéma du digesteur retenu [ARER.2003].

### I.8. Les différentes formes des digesteurs :

Il existe plusieurs formes de digesteur (ovoïde, cylindrique, ou bien continental), généralement construit en béton avec une protection interne en résine époxy mais pour les digesteurs de grande taille, l'acier vitrifié s'avère souvent plus compétitif.

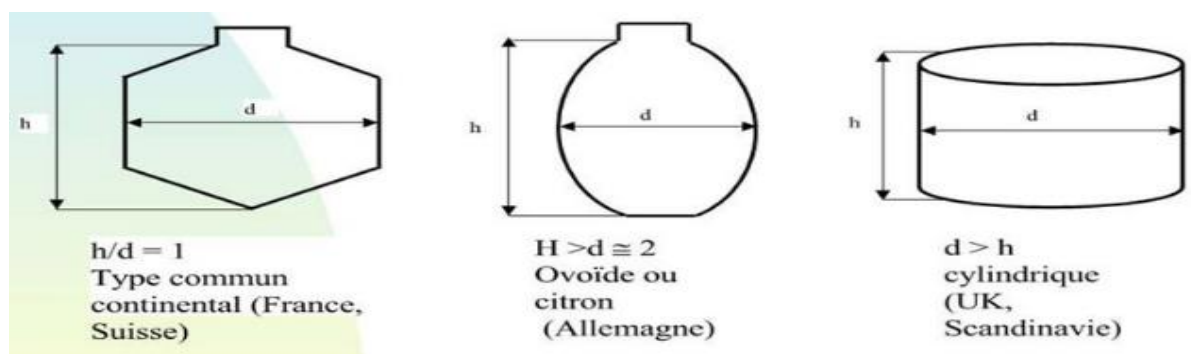


Figure I.3 : Schéma des différentes formes des digesteurs.

La plus répandue en Europe continentale elle est caractérisée par un rapport hauteur sur diamètre environ égal à 1, un fond conique (pour faciliter l'évacuation des sédiments) et un dôme conique ou bombé (pour résister à la pression). En Allemagne, les formes ovoïdes se sont développées pour les digesteurs de grande taille. Au Royaume-Uni et en Scandinavie, on trouve des digesteurs « cylindriques » avec toit et fond plat.



**Figure I.4 :** Un digesteur cylindrique en béton.



**Figure I.5 :** Un digesteur ovoïde construit en inox.



**Figure I.6 :** Un digesteur continental.



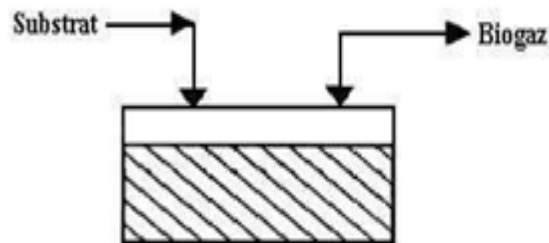
## I.9. Les différents types de digesteur : [40]

Le choix du digesteur varie en fonction du type de déchets à traiter, et de l'application projetée, on peut classer les digesteurs selon leur mode d'alimentation, le type de substrat, et le nombre d'étapes.

### I.9.1. Le mode d'alimentation des digesteurs :

#### I.9.1.1. Le digesteur batch ou discontinu :

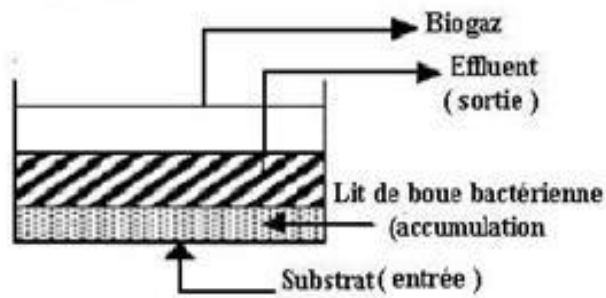
Ce type de digesteur a l'avantage d'une construction simple, le mode opératoire consiste à remplir le digesteur avec les substances organiques et laisse digérer, à la fin de la digestion, le digestat est évacué et le processus peut recommencer. Ces systèmes rustiques sont d'une grande simplicité technique, ils sont avantageux pour traiter les déchets solides comme les fumiers, les résidus agricoles, ou les ordures ménagères. La production de biogaz n'est pas régulière : au début de cycle, la production de biogaz est lente puis elle s'accélère, et atteint un taux maximal au milieu du processus de dégradation et chute enfin de cycle lorsque seuls les éléments difficilement digestibles restent dans le digesteur [37].



**Figure I.7 :** Schéma de principe d'un digesteur alimenté en discontinu.

#### I.9.1.2. Le digesteur continu :

Dans le digesteur du type continu, le substrat introduit de manière continue est digéré et déplacé soit mécaniquement soit sous la pression de nouveaux intrants vers la sortie sous forme de digestat. Le fonctionnement en continu, est bien adapté aux installations de grande taille.



**Figure I.8 :** Schéma de principe d'un digesteur alimenté en continu.

### **I.9.1.3. Le digesteur semi continu :**

Ce type de digesteur fonctionne avec une combinaison des propriétés des deux précédents, afin de tirer profit des avantages des deux modes de digesteur (batch et continu).

Le digesteur est rempli progressivement par petites charges successives réparties dans le temps. Le vidange est réalisé lorsque le volume utile du digesteur est atteint et que la production de biogaz n'est plus suffisante.

## **I.9.2. Classification selon le type de substrat :**

### **I.9.2.1. Solide :**

La teneur en matière sèche est supérieure à 15%.

### **I.9.2.2. Semi solide ou pâteux :**

La teneur en matière sèche entre 5 et 15 %.



**Figure I.9 :** Un digesteur par voie pâteuse.

La figure présente un digesteur par voie pâteuse ou digesteur piston, plus rare, ce digesteur traitera les mélanges avec un taux de matières sèche intermédiaire 6 à 15% voire au-delà.

**I.9.2.3. Liquide :**

La teneur de la matière sèche est inférieure à 5 %.



**Figure I.10 :** Un digesteur alimenté en continu avec une teneur en MS <5%.

La figure présente un digesteur alimenté en continu par pompe (lisier, graisses, eaux chargées...) et trémie (céréales, herbes, déchets agro-alimentaires...), avec un taux de matières sèches du mélange < 5 ou égal à 6%.

**I.9.3. Classification selon le nombre d'étapes :**

Selon les phases méthanogènes et l'acidogène se déroulent dans le même réacteur ou dans 2 cuves.

**I.9.3.1. Le procédé en mono-étape :**

Toutes les étapes de la digestion ont lieu dans la même enceinte, ils sont exploitables en continu ou en batch et principalement appliqués pour des substrats allant jusqu'à 40% de la matière sèche.

**I.9.3.2. Le procédé en bi-étape :**

Ce type de digesteur sépare la phase d'hydrolyse et l'acidogènes dans une première étape, et la méthanogènes dans une seconde étape. La recirculation de la phase liquide présente l'avantage de ne pas nécessiter constamment l'ajout d'eau réchauffée. L'avantage des procédés bi-étape réside dans le fait que la décomposition de la matière solide est de l'ordre de quelques jours. Cette séparation des phases, réduit le risque d'intoxication des cellules mélanogènes liée à la présence des acides gras volatils lorsque l'étape d'acidogènes n'est pas complètement terminée.

### **I.10. Le substrat :**

D'après certains auteurs, en particulier [R. Molette et al, 2003] ; plusieurs critères de la matière méthanisée sont à considérer :

- Le potentiel méthanogène comme important critère le volume maximal de méthane produit par une tonne de matière fraîche, plus le taux de matière organique est élevé, plus le volume de biogaz produit sera important, les graisses sont plus méthanogènes que les protéines ou les hydrates de carbone.
- La facilité de dégradation par les enzymes de la molécule.
- Son accessibilité (solubilisation, hydrolyse ...).
- Sa toxicité pour le vivant.

Donc les substrats qui peuvent faire l'objet d'un traitement par digestion anaérobie sont essentiellement :

- 1) Les effluents d'élevage.
- 2) Les eaux usées urbaines.
- 3) Les déchets agro-alimentaires.
- 4) La fraction organique des ordures ménagères.

Les interdits qui ne peuvent pas être destinés à la méthanisation :

- Les ligneux (bois, branchage).
- Les inertes tels que les sables, les matières plastiques (non biodégradables) ils peuvent perturber le fonctionnement du digesteur.
- Les métaux lourds et les composés des produits organiques (pesticides, antibiotiques...) ils perturbent le métabolisme des bactéries.

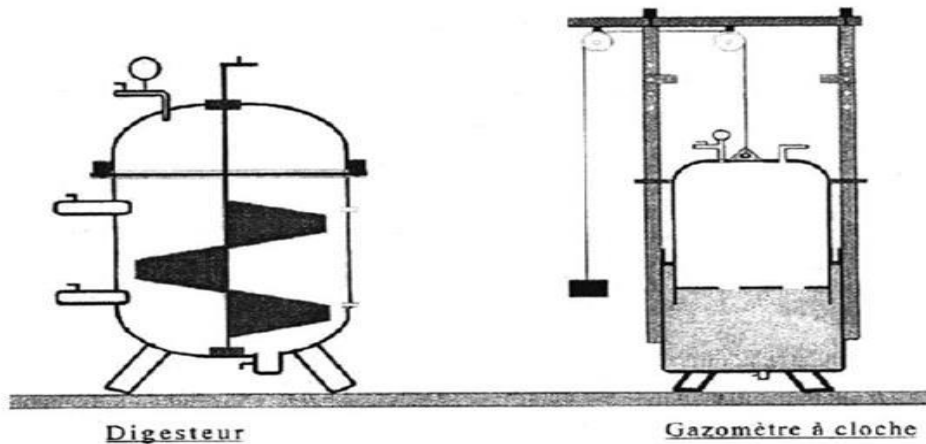
Dans les paragraphes qui se suivent, nous nous intéressons à détailler les différents substrats les plus utilisés dans le procédé de la méthanisation, basant sur les déchets d'élevage et agro-alimentaires puisque c'est l'objectif de notre étude.

- Les déchets d'élevages :

Les déchets d'animaux d'élevage comme les bovins, la volaille et vaches, représentent une production importante de la matière organique digestible ce qui a été démontré par S.Igoud et al, et d'autres études .Ces déchets ont un potentiel méthanogène relativement faible mais elles apportent des bactéries fraîches.

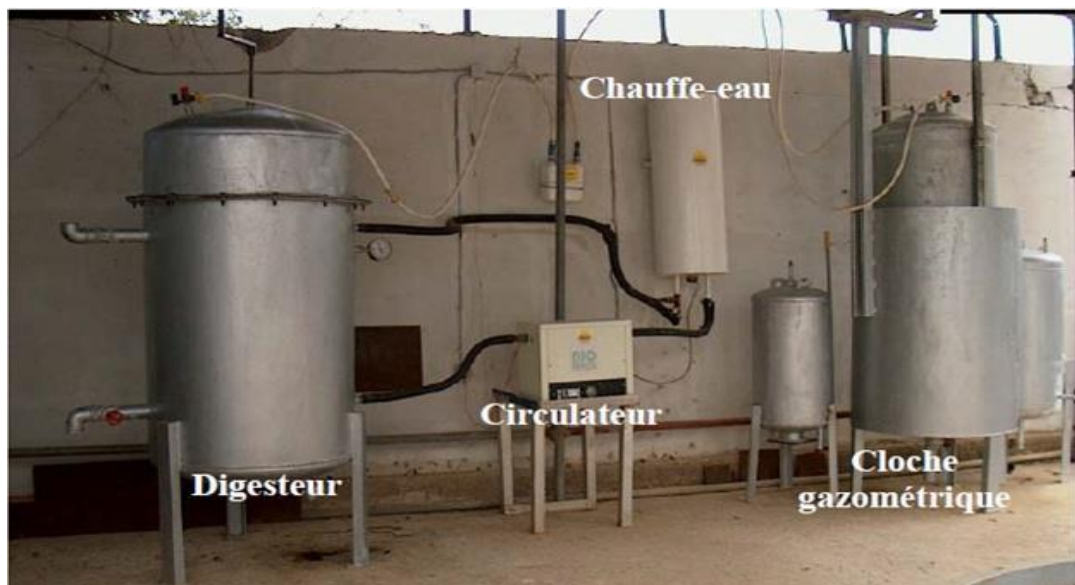
**I.11. Quelques digesteurs réalisés en Algérie :**

- I.Tou, al [41]. en (2001), en réalisé un digesteur d'une capacité de 800 litres, d'une hauteur de 1,65mètre sur un diamètre de 850 cm et une section à 1,25 m



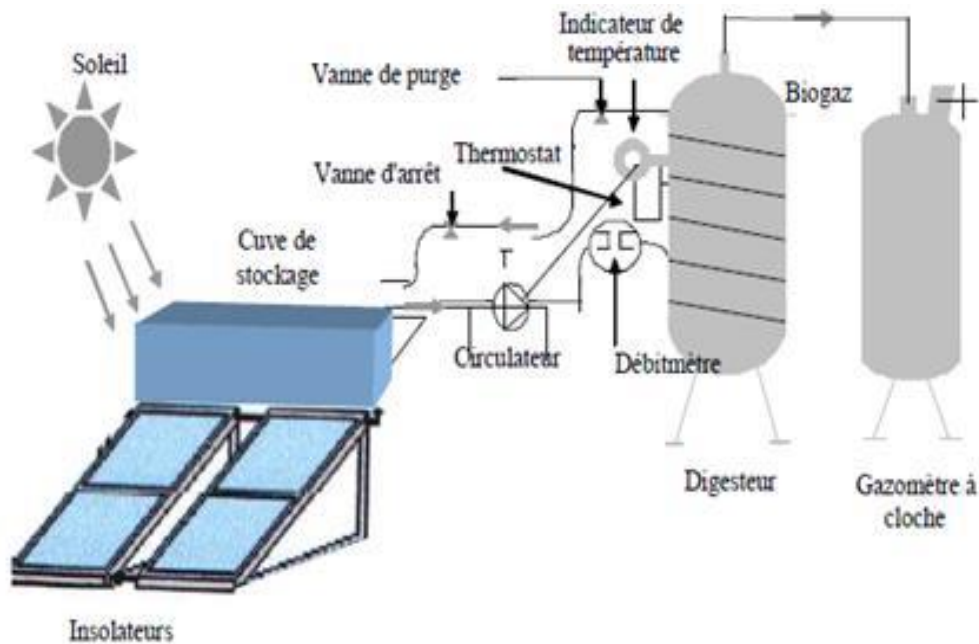
**Figure I.11 :** Schéma d'un dispositif réalisé par [I. Tou, al 2001].

- S.Igoud ,al[42] en(2002) ,ont réalisé un digesteur cylindrique d'une capacité de 800 litres ,d'une hauteur de 1,65 mètre et d'un diamètre de 1,25mètre , relié à un gazomètre à cloche d'une hauteur de 1,25 mètre pour le stockage de biogaz.



**Figure I.12 :** Le digesteur réalisé par [S.Igoud ,al 2002].

- A.Yttou ,al en(2007) ont réalisé un digesteur du type discontinu d'une capacité de 2800 litre , 1,65mètre d'hauteur ,et 0,85 de diamètre [43].



**Figure I.13 :** Schéma d'un digesteur alimenté par un chauffe-eau solaire réalisé par [A.Yttou ,al 2007].

## **I.12. Les avantages et les inconvénients de biogaz :**

### **I.12.1. Les avantages :**

- Réduction des émissions de gaz à effet de serre.
- Réduction de certains microbes dans les effluents agricoles.
- Valorisation énergétique et matière des biodéchets :
- Plusieurs débouchés du biogaz produit : production de chaleur, d'électricité ou de méthane après épuration du mélange.
- La phase liquide du digestat peut être utilisée comme engrais, la phase solide en amendement selon un plan d'épandage.
- Pas d'intervention nécessaire pendant la dégradation de la matière.

**I.12.2. Les inconvénients :**

- En raison de la présence d'H<sub>2</sub>S, le biogaz est un gaz explosif, corrosif et toxique. Un minimum de précaution doit être pris pour éviter la dégradation rapide des matériaux et risques pour les personnes.
- Le biogaz prend beaucoup de place, il faut 1000 m<sup>3</sup> pour stocker l'équivalent de 700 litres de fioul.
- Le gaz produit doit être consommé au fur et à mesure de sa production, il est très difficile à stocker, à cause du volume qu'il occupe.
- Le biogaz est malodorant, en lien avec l'H<sub>2</sub>S qui le compose, l'odeur n'est bien sur gênante qu'en cas de fuite dans l'installation.

**I.13. Conclusion :**

Dans ce chapitre on définit les concepts et les définitions sur la méthanisation et après avoir pris connaissance des principaux travaux passés.

La méthanisation est le processus de production d'énergie renouvelable à partir des déchets animales et agricoles, par production et récupération de biogaz.

# ***Chapitre II***

*Etude de faisabilité d'une unité de méthanisation*



**II.1. Introduction :**

Cette étude de faisabilité a pour but d'apporter au porteur de projet les éléments techniques, économiques et réglementaires leur permettant de se déterminer sur la faisabilité d'une telle opération sur leur exploitation agricole. Elle propose des solutions techniques adaptées au contexte et aux possibilités qu'offre le site.

L'étude de faisabilité n'est pas une simple formalité. Elle est généralement complexe, car les paramètres ressources et besoins sont des paramètres primordiaux qui sont à faire évoluer en parallèle, car ils interfèrent les uns sur les autres.

**II.2. Etude de faisabilité :**

Si l'opportunité a démontré qu'une installation semblait pertinente et intéressante, une étude de faisabilité peut être réalisée. La phase d'étude de faisabilité est une étape clé importante pour les étapes suivantes.

L'étude de faisabilité permet d'étudier dans le détail tous les aspects techniques, économiques, juridiques du projet. La conclusion de l'étude de faisabilité doit conclure sur la faisabilité technique et économique du projet. Il est possible que l'étude de faisabilité conclu sur la non faisabilité du projet de méthanisation pour des raisons techniques ou économiques.

Un projet de méthanisation est basé sur 5 grands piliers du montage de projet : la matière organique, l'énergie, la maîtrise du foncier, le retour au sol et les fonds propres nécessaires [44]. A partir de ces éléments, il faut veiller à la bonne cohérence de l'ensemble des points pour le porteur de projet : quelle quantité de matière je possède ? Quels réseaux d'acteurs pour le complément de matière ? Est ce qu'il y aura des évolutions à court terme de mon site ? Ai-je des possibilités pour l'épandage du digestat ? Ai-je des fonds pour investir personnellement dans l'unité ? Puis-je construire sur mon foncier et à quelles conditions ? Quels sont les enjeux énergétiques à court et moyen terme ?

**II.3. Le développement de la méthanisation agricole :**

Le développement de la méthanisation à la ferme mérite d'être soutenu dans une approche très ancrée dans les besoins des territoires et dans le respect de leur diversité, pour ses différents apports aux enjeux environnementaux et économiques actuels, notamment :

- Appui à la gestion de l'azote des exploitations agricoles.
- Production d'énergie renouvelable.

- Réduction des émissions de gaz à effet de serre.
- Création d'activité économique et d'emplois.
- Création d'opportunités en agronomie.

**II.3.1. Appui à la gestion de l'azote des exploitations agricoles :**

La méthanisation à la ferme participe de la gestion de l'azote dans une logique globale sur les territoires, en permettant de conserver l'azote contenu dans les effluents d'élevage, et de valoriser cet azote organique en substitution de l'utilisation d'engrais minéraux.

**II.3.2. Production d'énergie renouvelable :**

La méthanisation à la ferme permet la production d'énergie renouvelable sous forme de biogaz, valorisable localement en chaleur, en électricité raccordée au réseau (par cogénération) ou en biométhane injectable dans le réseau.

**II.3.3. Réduction des émissions de gaz à effet de serre :**

La méthanisation agricole participe à l'amélioration du bilan gaz à effet de serre des exploitations.

- Directement, par le captage des émissions de méthane liées aux effluents d'élevage qui se produisent naturellement au cours du stockage des déjections animales.
- Indirectement, par la substitution de chaleur, de carburants et d'engrais d'origine fossile productrice de gaz à effet de serre.

**II.3.4. Création d'activité économique et d'emplois :**

Pour les exploitations agricoles, la méthanisation à la ferme permet une diversification des revenus liée à la vente d'énergie. A ces recettes principales, s'ajoutent d'autres gains plus difficilement chiffrables, tels que l'économie d'engrais minéraux, la couverture des besoins de chaleur dans un contexte d'augmentation du coût de l'énergie, la valorisation des équipements de stockage des effluents (fosses à lisiers), la diversification des débouchés pour les déchets et résidus de l'activité agricole, ou encore la réduction des nuisances olfactives lors de l'épandage.

Sur l'exploitation agricole, l'activité de méthanisation suppose un temps de travail quotidien pour l'exploitant agricole.

Le développement de la filière méthanisation à la ferme permettra aussi de créer des emplois dans d'autres métiers, du bureau d'études au constructeur, au technicien de maintenance, et peut créer un effet de levier pour l'émergence et la structuration d'une filière d'équipement de méthanisation et de technologies innovantes.

### **II.3.5. Création d'opportunités en agronomie :**

La valorisation agronomique des digestats est un des points clés pour lever les freins au développement de la méthanisation agricole, en permettant notamment une diminution du recours aux engrais minéraux, et donc une réduction du coût des intrants.

Une nouvelle réflexion de la gestion de l'azote, en lien avec la possible utilisation de Cultures Intermédiaires à Vocation Énergétique en méthanisation agricole.

## **II.4. Quelques questions à se poser avant de démarrer un projet de méthanisation :**

Un projet de méthanisation, est un projet lourd, impliquant mais porteur de richesse, d'emploi et de satisfaction personnelle. Pour mener à bien à votre projet, quelques questions préalables s'imposent :

- Est-il rentable ?
- Quel est l'emplacement et l'altitude de la zone ?
- Combien le nombre de parcelles principales avec les surfaces à chaque pièce ?
- Moins de 1000 m<sup>2</sup> sont disponibles pour l'unité de méthanisation, ou la parcelle est sans accès ?
- Des habitations occupées par des tiers (hors votre famille ou gîte) sont à moins de 50 m de votre site d'implantation projeté ?

Pour répondre à cette problématique, nous devons répondre et apporté des éclaircissements à tout ce questionnement.

Pour cela nous allons proposer, dans ce présent mémoire, un « cahier de charge » auquel on devrait répondre à toutes ses conditions. Ces conditions seront développées dans ce qui suivra :

## **II.5. Cahier de charge :**

### **1) Définition du site :**

**Tableau II. 1:** Définition du site.

	<b>Les données</b>
Localisation	
L'altitude de la zone	
Le nombre de parcelles principales	
Les surfaces	

### **2) Les variations mensuelles des températures dans la région :**

Sont reportées sur le tableau (II.2) :

**Tableau II. 2 :** Moyenne des températures mensuelles sur une année.

<b>Mois</b>	<b>Température minimum</b>	<b>Température maximum</b>
Janvier		
Février		
Mars		
Avril		
Mai		
Juin		
Juillet		
Aout		
Septembre		
Octobre		
Novembre		
Décembre		

#### **➤ Ressources en substrats méthanisables :**

Le prestataire définit la quantité et la qualité des matières organiques méthanisables sur le territoire pour le projet, provenant de plusieurs sources :

- Gisement agricole
- Gisement non agricole

### **3) Le gisement :**

#### **➤ Définition du gisement :**

#### **➤ Gisement agricole :**

Le gisement agricole regroupe plusieurs catégories :

- ✓ Effluents d'élevage,
- ✓ Effluents agricoles,
- ✓ Cosubstrats.

Pour chaque typologie de déchets, le prestataire collectera les données suivantes :

- Provenance : intrants internes ou exogènes au projet.
  - Production totale (t/mois, t/an, teneur en matière sèche, en matière organique, en azote...) [45].
  - Mode de valorisation actuel : filière, pérennité de la filière, coûts, logistique, etc.
  - Mode de stockage existants ou à créer.
  - Potentiels méthanogènes par substrat (sur la base d'analyse si nécessaire à ce stade) préciser les sources.
  - Caractéristiques spécifiques : saisonnalité, nécessité d'un prétraitement, etc.
  - Recensement de cultures énergétiques sur l'exploitation et/ou envisagé pour le projet : catégorie, quantité, caractéristiques et pratiques culturales, potentiel méthanogène par substrat.
  - Estimation du potentiel de cultures énergétiques pouvant être cultivées. Quels sont les impacts pressentis sur l'organisation des exploitations concernées ?
- **Gisement non agricole :**
- Collectivités locales : tontes, biodéchets, huiles alimentaires, autres...(t/mois, t/an, modes de valorisation actuels et coûts de ces valorisations).
  - Industries agroalimentaires : boues, autres...
  - Autres : à préciser.

Les données collectées seront similaires au gisement agricole.

**Tableau II. 3:** Le prestataire définit la quantité et la qualité des matières organiques méthanisables.

<b>Gisement agricole</b>	Matière organique			
	Quantité (tonne)			
<b>Gisement non agricole</b>	Matière organique	Boues	Biodéchets	Autres
	Quantité (tonne)			

**4) Caractéristiques du gisement [45] :**

Le gisement retenu pour agriculteur sollicités pour cette étude est représenté sur le tableau (II.4). La répartition massique du gisement et les productions de méthane correspondantes sont reportées.

**Tableau II. 4:** Composition massique du gisement.

<b>Matériaux</b>	<b>t/an</b>
Fumier de bovin	
Fumier d'ovin	
Lactosérum	
Lisier de bovin	
Autre	
Total	

**5) Alimentation quotidienne du digesteur [45] :**

Les quantités introduites quotidiennes sont reportées sur le tableau (II.5).

**Tableau II. 5:** quantités journalières d'intrants à apporter.

<b>Quantité à ajouter chaque jour (t/j)</b>		
<b>Matériaux</b>	<b>Hiver</b>	<b>Été</b>
Fumier de bovin		
Fumier d'ovin		
Lactosérum		
Lisier de bovin		
Autre		
Total		

**6) Détermination des besoins énergétiques [44] :**

Il y a différentes façons de définir l'utilité d'une unité de méthanisation : elle peut permettre d'apporter un revenu complémentaire à l'agriculteur, comme être un outil d'aménagement du territoire ou un moyen vertueux de produire des énergies renouvelables locales. Quelle que soit la motivation de départ, le procédé ne devra pas être surdimensionné, c'est le point essentiel pour avoir une chance d'arriver au bout de la démarche.

➤ **Besoins énergétiques liés au(x) bâtiment(s) d'habitation :**

- Caractéristiques thermiques et données techniques de base du bâtiment et locaux : surface, volume, orientation, isolation, surface vitrée, renouvellement d'air, période de fonctionnement....
- Détermination des besoins énergétiques prévisionnels annuels.
- Détermination de la puissance de chauffage à installer.
- Calcul des besoins de production d'eau chaude sanitaire.
- Courbes monotones des consommations et de puissances de chauffage appelées sur l'année.

➤ **Besoins énergétiques liés au(x) bâtiment(s) technique(s) et ouvrages de l'unité de méthanisation :**

- Caractéristiques thermiques et données techniques de base des locaux et ouvrages à chauffer : surface, volume, isolation, surface vitrée, renouvellement d'air, période de fonctionnement...
- Détermination des besoins énergétiques prévisionnels annuels.
- Détermination de la puissance de chauffage à installer.
- Calcul des besoins de production d'eau chaude sanitaire.
- Courbes monotones des consommations et de puissances de chauffage appelées sur l'année.
- Calcul des autres besoins énergétiques liés aux activités du méthaniser mais autres que chauffage des locaux et production d'ECS.

➤ **Besoins énergétiques spécifiques à l'exploitation ou extérieurs à l'exploitation agricole :**

Préciser le consommateur spécifique de chaleur dans ce paragraphe.

- Recensement des consommateurs d'énergie à proximité du lieu de production (bâtiments communaux, industries, serres, exploitations agricoles, ...)
- Détermination des besoins énergétiques de ces consommateurs.

**7) Paramètre de fonctionnement du digesteur :**

Il fonctionnera en mésophile (38 à 40 °C). Les caractéristiques de fonctionnement du digesteur pour l'été et l'hiver sont reportées ci-dessous (tableau II.6).

**Tableau II. 6:** Caractéristiques de fonctionnement du digesteur pour l'été et l'hiver.

<b>Paramètre</b>	<b>Unité</b>	<b>Hiver</b>	<b>Eté</b>
Volume utile	m <sup>3</sup>		
Charge organique	(kg MV /m3/j)		
Temps de séjour	J		
Taux MS entrée	%		
Taux MS sortie	%		
Quantité de CH <sub>4</sub>	m <sup>3</sup> ( 6 mois)		
% CH <sub>4</sub> du biogaz	%		

En cas d'absence d'information nous avons pris pour les biodéchets 40% MS et 55% MV, biogaz a 60% CH<sub>4</sub>.

La charge organique ne sera pas la même en été et en hiver afin de l'adapter aux volumes d'intrants de chaque période. Une charge de 3 kg en été, conduirait à des temps de séjours trop courts pour une bonne utilisation de la matière.

### **8) La production de biogaz :**

Les valeurs de production de méthane sont reportées ci-dessous (Tableau II.7). Les fumiers de bovin et d'ovin qui représentent 45 % de la masse entrante, apportent 75 % de la production de méthane.

**Tableau II. 7:** production de méthane par les différents substrats.

<b>Substrats</b>	<b>t/an</b>	<b>CH<sub>4</sub> m3/an</b>	<b>%CH<sub>4</sub> / total</b>
Fumier de bovin frais (hiver)			
Fumier de bovin stocké (été)			
Fumier d'ovin frais (hiver)			
Fumier d'ovin stocké (été)			
Purin			
Total			

Il sera produit de méthane en hiver et été. Ce ratio peut varier si l'on décide de modifier la quantité de stockage pour l'été. Le passage en période d'été demandera des variations progressives des valeurs de différents paramètres de conduite, notamment la



charge organique qui dépendra de la quantité d'intrants apportées chaque jour et de sa durée de stockage.

Pour le traitement du biogaz, une première élimination de l'H<sub>2</sub>S se fait par introduction d'air dans le ciel gazeux du digesteur. Le biogaz subit d'abord une déshydratation puis passage dans un filtre à charbon actif avant d'être introduit dans le co-générateur.

### **9) Le co-générateur :**

Les caractéristiques du co-générateur sont indiquées sur le tableau (II.8).

Une partie des énergies brutes produites vont être utilisées sur le site pour donner « les énergies disponibles ». De l'énergie électrique va être utilisée pour la consommation des auxiliaires et une partie de l'énergie thermique sera utilisée pour chauffer le digesteur. L'énergie électrique va être raccordée au réseau et l'énergie thermique pourra être valorisée pour le séchage.

**Tableau II. 8:** caractéristiques du co-générateur.

<b>Puissance (kW)</b>	<b>Rendement électrique (%)</b>	<b>Rendement thermique (%)</b>	<b>Pertes (%)</b>

### **10) Le digestat :**

Au cours de la digestion, les 2/3 de la matière organique en biogaz. Le tiers restant constitue le digestat, composé de matière organique humidifiée (la lignine a été totalement conservée), d'éléments fertilisants et d'eau. Les avantages de la digestion pour le traitement des effluents et des déchets sont de réduire les odeurs de ceux-ci et de produire du biogaz pouvant servir de sources d'énergie. Ce procédé de traitement permet de réduire fortement la teneur en acides gras volatils, principaux responsables des odeurs désagréables des effluents d'élevage. Le digestat obtenu est homogène, ce qui facilite l'épandage. Par rapport à la biomasse de départ, le digestat présente un rapport C/N (Carbone/Azote) plus faible, principalement dû à la mobilisation des atomes de carbone pour la production du biogaz. Le digestat est donc plus pauvre en matière organique.

**10.1. Séparateur de phases :**

Il subit une séparation phase liquide/solide via une presse à vis. La fraction solide rejoint une aire de stockage et la fraction liquide est stockée dans une cuve couverte ou dans une bâche de stockage. Les volumes de la production annuelles des différentes fractions de digestat sont représentés sur le tableau (II.9) :

**Tableau II. 9:** Répartition des différentes fractions de digestat après séparation.

<b>Sortie digestat</b>	<b>Hiver(t)</b>	<b>Eté(t)</b>
Matières brute		
Fraction solide		
Fraction liquide		

**10.2. Composition des différentes fractions des digestats :**

Cette technique de séparation conduit à une phase solide de 25 % et une phase liquide de 6,4% en MS (tableau II.10)

**Tableau II. 10:** Caractéristiques des digestats.

<b>Moyenne sur l'année</b>	<b>Digestat brut</b>	<b>Phase liquide</b>	<b>Phase solide</b>
Digestat(t)			
Taux MS (% /MB)			
Taux MV /MS (%)			
Quantité de N-NH <sub>3</sub> (kg /t.MS)			
Quantité de N total (kg /t Ms)			

**11) Étude économique, énergétique et environnementale :**

Cette partie fera l'étude des différents paramètres qui influencent un projet de valorisation de biogaz d'un point de vue économique, énergétique et environnemental. Le but est de repérer quels sont les meilleurs choix à prendre pour optimiser le projet sur ces trois aspects.

Les installations de valorisation du biogaz présentent des aspects qualitatifs et quantitatifs variables selon :

- le mode de production du biogaz (usine de méthanisation, centre de stockage de déchets, station d'épuration, méthanisation à la ferme).

- la taille de l'installation (quantité de biogaz produite).
- les conditions environnementales (pluviométrie, température...).
- autre ...

Les contraintes sont donc spécifiques à chaque site. Ainsi, la quantité de méthane, la concentration de polluants dans le biogaz, la distance à un consommateur de chaleur, la place sur le site, la faisabilité du raccordement électrique sont autant d'exemples de contraintes liées à la mise en oeuvre d'une installation de valorisation du biogaz.

Par conséquent, il faut garder à l'esprit que les résultats de cette étude économique, énergétique et environnementale sont des indications de base qui ne peuvent se substituer à une étude d'un projet à réaliser.

### **11.1. Les paramètres variables :**

Les paramètres variables sont les caractéristiques de l'installation, telles que :

- le type de technologie.
- la puissance installée.
- le rendement électrique et le rendement thermique.
- la disponibilité du biogaz et des machines.
- le taux de valorisation thermique.
- la production de gaz par mois (à savoir si la production est stable, oscillante ou s'il y a des pics importants de variation).

C'est l'influence de ces paramètres sur le bilan énergétique qui va être étudiée.

Par ailleurs, d'autres paramètres vont influencer le bilan économique de l'installation :

- la présence d'une unité de traitement du biogaz.
- la composition du biogaz en COV, H<sub>2</sub>S et siloxanes.
- la consommation électrique des équipements annexes.

L'étude de différents scénarios permet d'analyser l'impact de ces paramètres sur le bilan économique, le bilan énergétique et le bilan gaz à effet de serre.

### **11.2. Equilibre économique des installations agricoles auditées [46] :**

L'étude montre que, quel que soit le pays, la rentabilité des installations est basée principalement sur trois paramètres :

- une taille minimale.
- le recours à la co-digestion.
- le prix de rachat de l'électricité produite.

Les deux premiers paramètres peuvent être optimisés dans le cadre d'une étude préalable. Le dernier est une affaire de volonté au niveau national. Cependant si la rentabilité est une condition nécessaire, elle n'est pas suffisante pour motiver le développement de cette technologie.

**12) Quels sont les coûts :**

**a) Coûts d'exploitation et recettes [47] :**

**Tableau II. 11:** coûts d'exploitation et recettes.

<b>Doc Entrante</b>	<b>Coûts de Fonctionnement</b>	<b>Recettes</b>
Main-d'œuvre		
Electricité		
Réactifs		
Combustible		
Elimination des boues		
Valorisation du biogaz		
Total		

**b) Résumé des coûts et du rendement économique des infrastructures :**

Tel que vu précédemment, la planification d'une centrale de méthanisation comporte plusieurs volets dont l'essentiel a été présenté sous l'angle de l'importation des substrats, des infrastructures et des opérations du digesteur et de la conversion énergétique. L'ensemble des spécifications de la centrale est résumé au tableau (II.12).

**Tableau II. 12 :** Résumé des spécifications de base de la centrale.

<b>Spécifications de la centrale</b>	
Capacité (t/an)	
Capacité (tonne ST/an) (Solides totaux)	
Lisier traité (t/an)	
Matières résiduelles de table traitées (t/an)	
Production annuelle de biogaz (m3)	
Valeur énergétique brute (GJ/an)	
Valeur énergétique brute (kWh/an)	

**c) Les installations en milieu agricole :**

Dans les conditions actuelles, la vente d'électricité seule n'est pas suffisante pour rentabiliser un projet : il faut compter sur la valorisation de la chaleur et/ou le traitement de déchets extérieurs. Par un effet d'échelle, l'investissement diminue quand la puissance électrique installée augmente. Le génie civil est un poste important, il représente près de la moitié de l'investissement.

La présente formule générale de l'évolution des coûts d'investissement en fonction de la capacité, a été utilisée pour transposer le total des coûts recensés (par technologie) [48]

$$\frac{\text{Investissement du projet}}{\text{Investissement recensé}} = \left[ \frac{\text{Capacité du projet}}{\text{Capacité recensé}} \right]^{0,6}$$

Calcul des investissements pour infrastructures de méthanisation pour une centrale de méthanisation, à partir des coûts d'investissement recensés de Applied Technology.

Coûts d'investissement d'Applied Technology = X (\$)

Capacité de traitement recensée = Y tonnes

Capacité de traitement du projet = Z tonnes

$$\text{Calcul : } I = \left( \frac{Z}{Y} \right)^{0,6*} X$$

Investissement du projet = I (\$)

**II.6. Modèles d'évaluations de la production du biogaz :**

Il existe plusieurs modèles d'évaluation de la production du biogaz. Nous présentons dans ce chapitre quelques modèles très utilisés.

**a) Evaluation de la production quotidienne de biogaz, de méthane et d'énergie primaire :**

Connaissant la masse de déchets disponible par jour M, la composition en matière organique des déchets MO et la productivité du biogaz P on a [49] :

$$PQB = \frac{M \cdot P}{100} * MO \quad (2.1)$$

PQB : production quotidienne de biogaz

M est en tonne par jour et P en m<sup>3</sup>/t de matière organique. Et sera prise à 450 m<sup>3</sup>/tonnes de matières organiques [Tchouate et al, 2003].

En supposant que le biogaz est composé à 60% de Méthane on obtient :

$$PQM = PQB * \frac{60}{100} \quad (2.2)$$

PQM : production quotidienne de méthane

Connaissant le PCI du méthane qui est de 9.94 KWh/m<sup>3</sup>, la production quotidienne d'énergie primaire est donnée par :

$$PQEP = PQM * 9.94 \quad (2.3)$$

PQEP : production quotidienne d'énergie primaire

Car 1m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> = 9,94 KWh d'énergie primaire.

**b) Détermination de la quantité d'énergie produite [50] :****➤ Production de l'énergie électrique :**

Connaissant la quantité quotidienne d'énergie primaire et le rendement électrique on en déduit que :

$$E_{\text{électrique}} = \text{Dispo}_{\text{gaz}} * \text{Dispo}_{\text{machine}} * \eta_{\text{électrique}} * PQEP \quad (2.4)$$

Dispo : disponibles.

PQEP : production quotidienne d'énergie primaire.

➤ **Production de l'énergie thermique :**

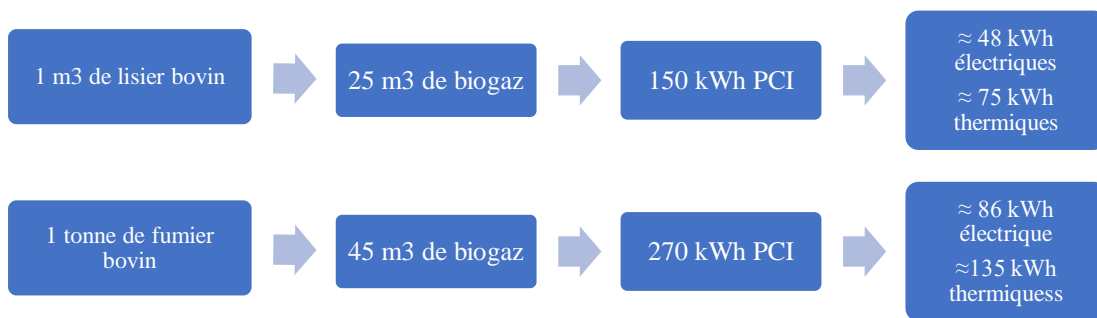
Elle sera donnée par :

$$E_{\text{thermique}} = \text{Dispo}_{\text{gaz}} * \text{Dispo}_{\text{machine}} * \eta_{\text{thermique}} * \text{PQEP} \quad (2.5)$$

Dispo : disponibles.

PQEP : production quotidienne d'énergie primaire.

**c) Quelques repères [51] :**



Pouvoir calorifique inférieur (PCI) = quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'un kilo de combustible.

PCI du méthane	➔	9,94 kWh / m3	PCI du biogaz (à 60% de méthane)	➔	6 kWh / m3
1 kWh = 3,6 MJ			1 tep = 11 620 kWh = 41,86 GJ		

**II.7. Conclusion :**

A la fin de cette étude, nous devons connaître et juger de la faisabilité et de la rentabilité de l'unité de méthanisation ou non selon les données fournies et les résultats obtenus, et pour ce faire, nous avons construit le logiciel sous forme d'interface graphique.

# *Chapitre III*

*Guide d'utilisation de l'interface*



### **III.1. Définition d'une interface :**

Les programmes informatiques actuels nécessitent une interactivité homme-machine. De ce dialogue découlera un échange d'informations. Cela se fait via une interface utilisateur qui peut être en mode texte ou en mode table. On s'intéresse dans cette étude à cette dernière.

Une interface graphique est formée d'une ou plusieurs fenêtres qui contiennent divers composants graphiques (*widgets*) [52] tels que : Menu, Champs texte, Boutons, Icônes.

Ces derniers sont utilisés par l'utilisateur de l'interface selon sa demande d'acquisition de l'information. L'ordre d'exécution des instructions de l'interface est transcrit dans un programme particulier qui n'apparaît pas à l'utilisateur.

### **III.2. Définition du programme JAVA :**

La particularité et l'objectif central de Java est que les logiciels écrits dans ce langage doivent être très facilement portables sur plusieurs systèmes d'exploitation tels que UNIX, Windows, Mac OS ou GNU/Linux, avec peu ou pas de modifications. Pour cela, divers plateformes et frameworks associés visent à guider, sinon garantir, cette portabilité des applications développées en Java. [53]

### **III.3. L'Algorithme de l'interface de faisabilité et de dimensionnement d'une unité de méthanisation agricole :**

Pour la seconde partie, nous avons conçu une interface (en utilisant JAVA) pour pouvoir faire des simulations qui auront les résultats suivants :

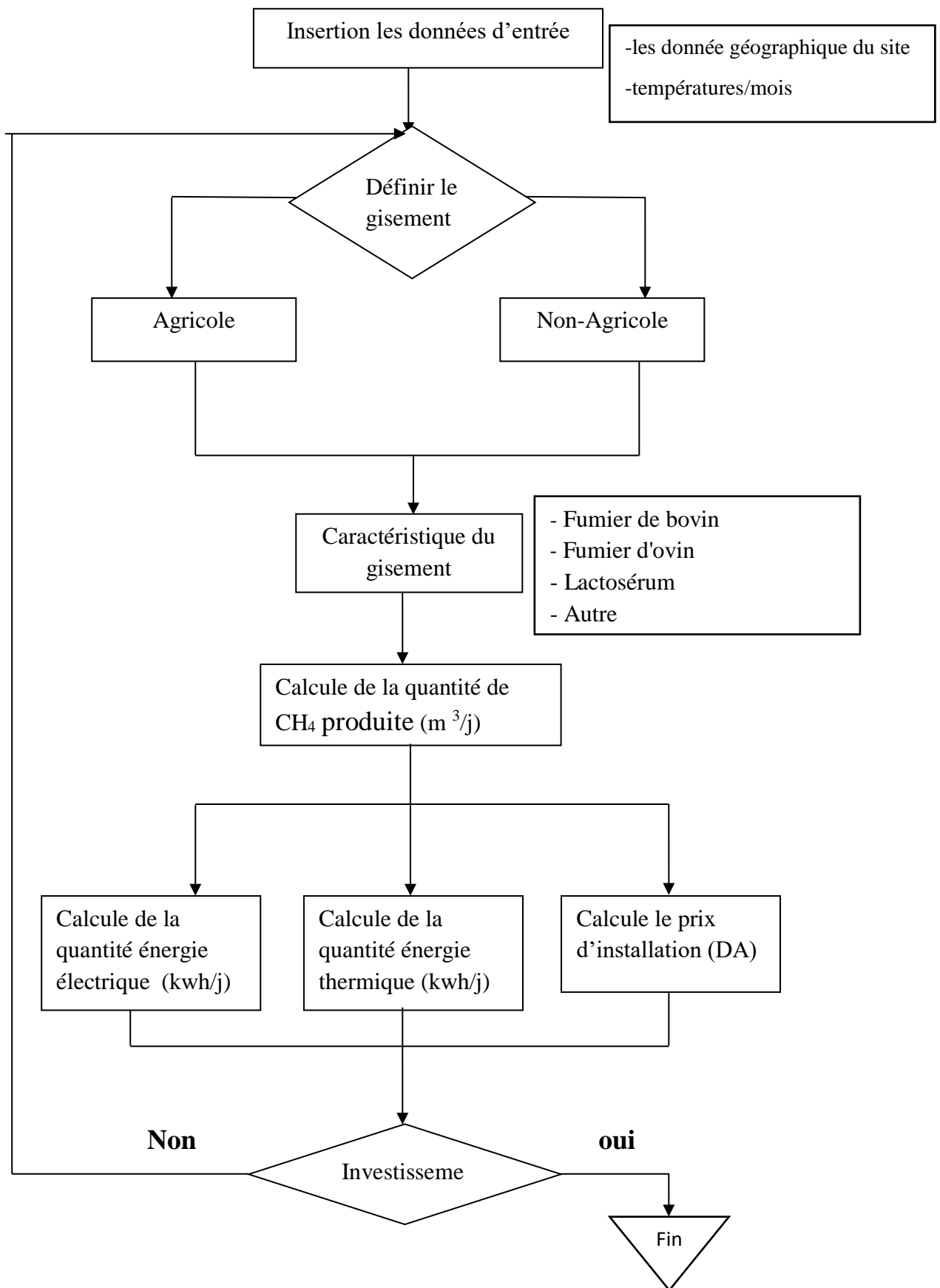


Figure III. 1 : Algorithme du logiciel construit

### III.4. Guide d'utilisation de l'interface :

Nous présentons dans ce chapitre le guide d'utilisation de l'interface du logiciel de faisabilité et de dimensionnement d'une unité de méthanisation agricole que nous avons réalisé.

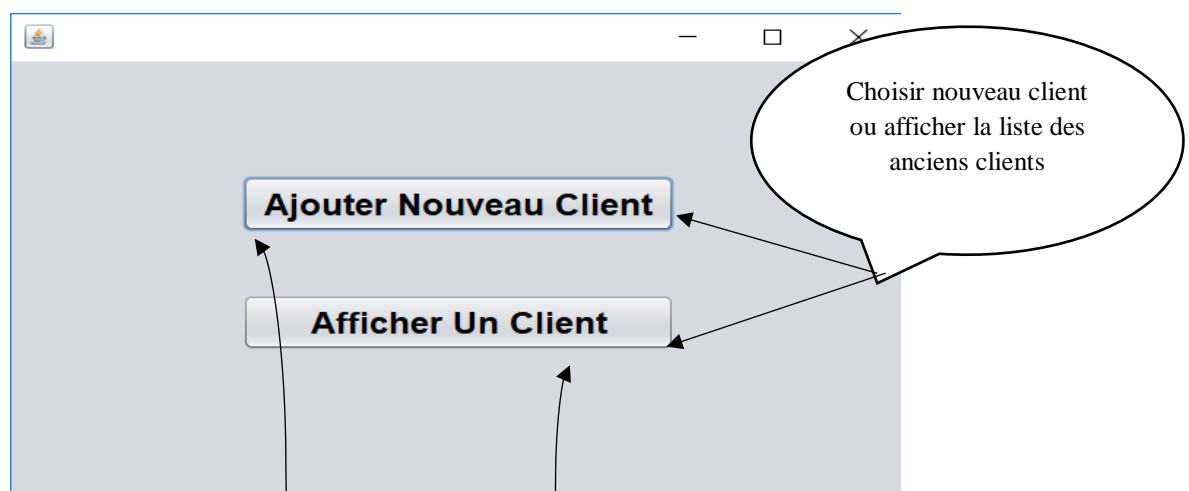
Cependant, il est nécessaire d'expliquer chaque étape d'utilisation de cette interface. Cela sera décrit dans ce qui suit.

La première fenêtre de cet outil de simulation est une page d'accueil (Figure III.2) qui contient une description de l'interface.



**Figure III. 2:** Interface d'application.

En cliquant sur le bouton « **Debut** » apparaît la fenêtre suivante « Figure III.3 »



**Figure III. 3:**choisit de nouveau ou ancien client

En cliquant sur le bouton « **Afficher un client** » apparaît la fenêtre suivante « Figure III.4».

En cliquant sur le bouton « **Ajouter nouveau client** » apparaît la fenêtre suivante « Figure III.6».

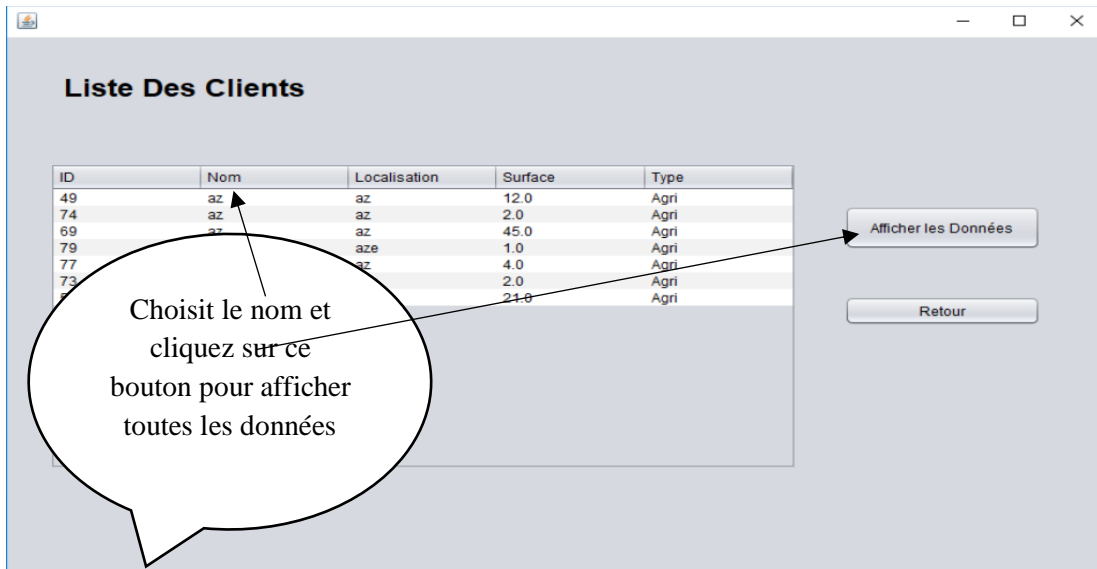


Figure III. 4 : liste des anciens clients.

En cliquant sur le bouton « **afficher les donnée** » apparait la fenêtre « Figure III.5 ».  
 En cliquant sur le bouton « **Retour** » apparait la fenêtre suivante « Figure III.3 ».

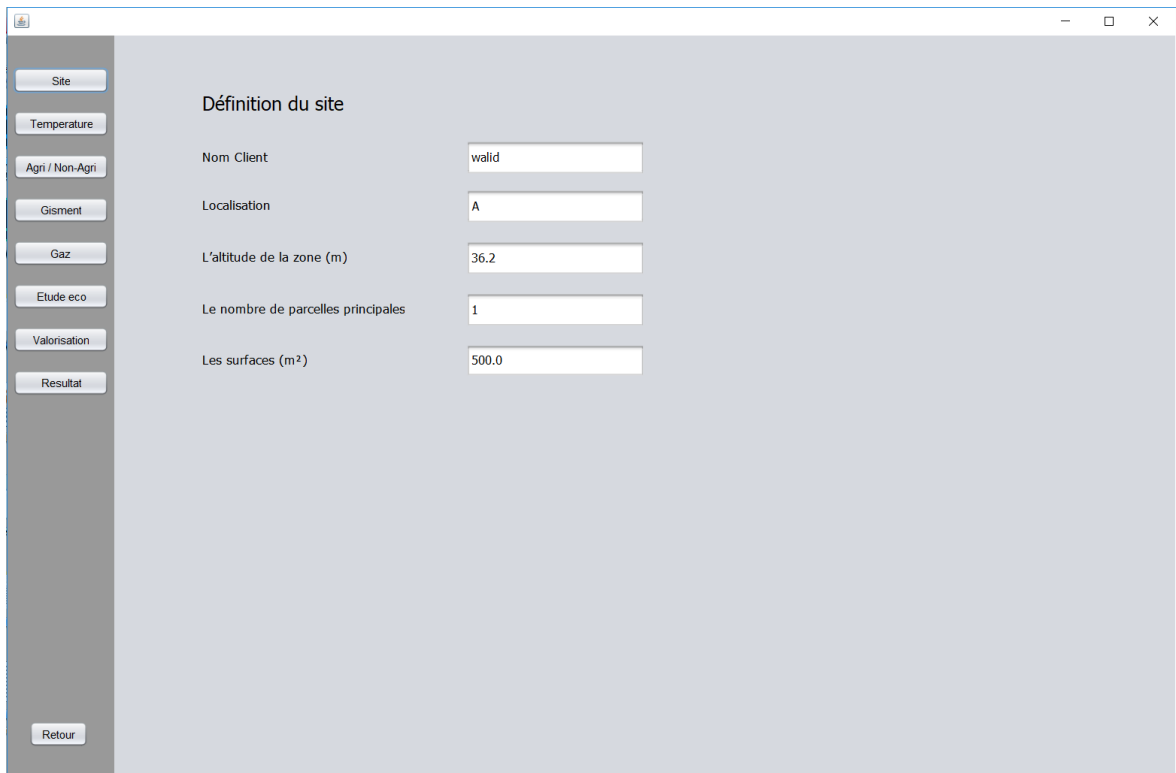


Figure III. 5 : les données d'ancien client.

**Définition du site**

Nom Client

Localisation

L'altitude de la zone (m)

Le nombre de parcelles principales

Les surfaces (m<sup>2</sup>)

Inséré les données du site

**Figure III.6:** Définition du site.

En cliquant sur le bouton « **Suivant** » apparait la fenêtre « Figure III.7 ».

En cliquant sur le bouton « **Retour** » apparait la fenêtre « Figure III.3 ».

**Tableau des temperatures**

Insérer la température max et min pour chaque mois

Mois	T-Min (°C)	T-Max (°C)	Mois	T-Min (°C)	T-Max (°C)
Janvier	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Juillet	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Fevrier	<input type="text"/>	<input type="text"/>	aout	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Mars	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Septembre	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Avril	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Octobre	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Mai	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Novembre	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Juin	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Decembre	<input type="text"/>	<input type="text"/>

**Figure III.7:** Les variations mensuelles des températures dans la région.

En cliquant sur le bouton « **suisvant** » apparait la fenêtre « Figure III.8 » où on choisit le mode du gisement.

En cliquant sur le bouton « **Retour** » apparait la fenêtre « Figure III.6 ».

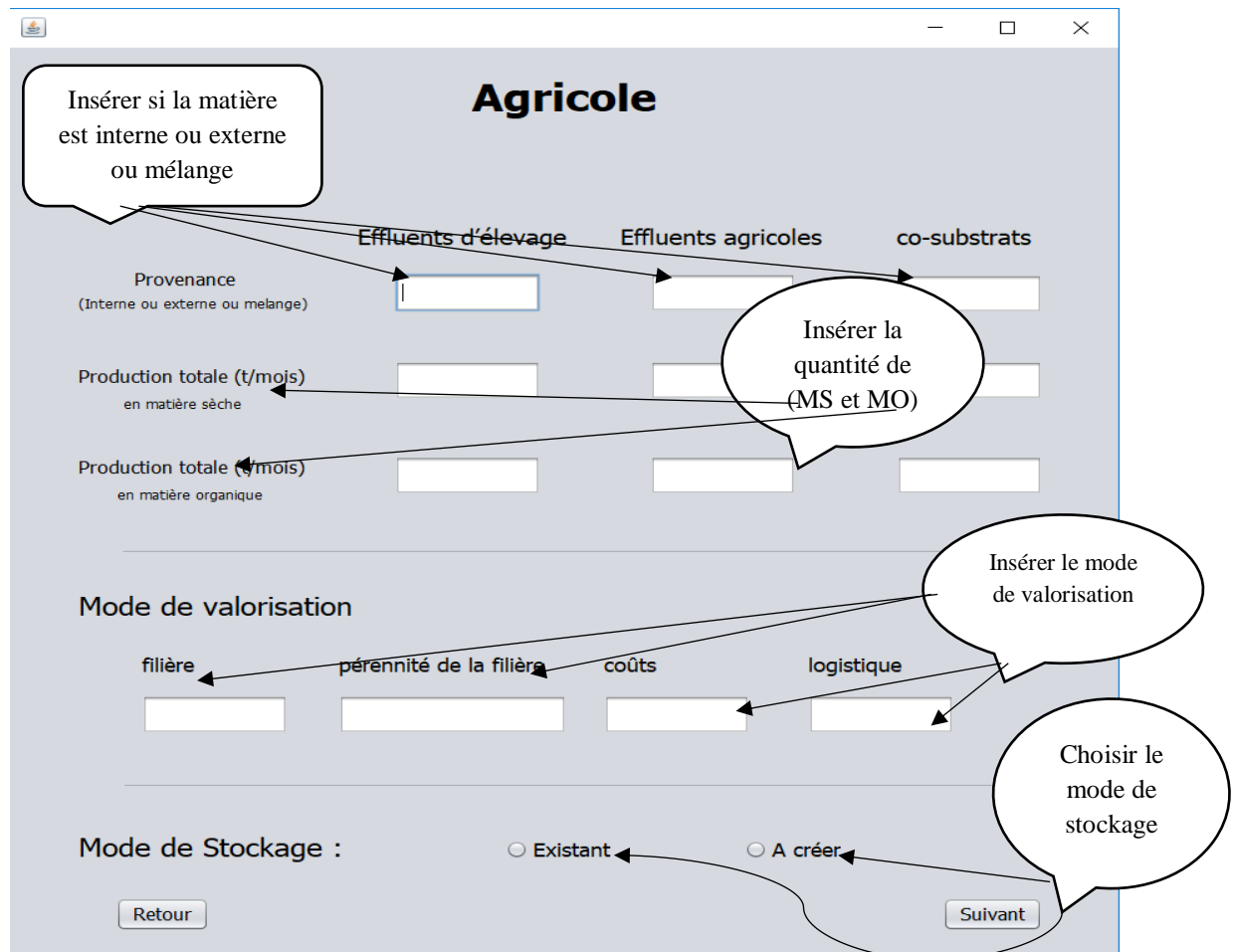


**Figure III. 8 :** Choix le mode du gisement.

En cliquant sur le bouton « **Agricole** » apparait la fenêtre « Figure III.9 ».

En cliquant sur le bouton « **Non-Agricole** » apparait la fenêtre « Figure III.10 ».

En cliquant sur le bouton « **Retour** » apparait la fenêtre « Figure III.7 ».



**Figure III. 9 :** Le gisement agricole.

Type de Dechet	t/mois	t/an
Tonte	<input type="text"/>	<input type="text"/>
biodéchets	<input type="text"/>	<input type="text"/>
huiles alimentaires	<input type="text"/>	<input type="text"/>
boues agroalimentaires	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Retour Suivant

Insérer la quantité de déchet par mois et par année

Figure III. 10 : Gisement non agricole.

En cliquant sur le bouton « **suivant** » dans le « Figure (III.9) et (III.10) » apparaît la même fenêtre « Figure III.11».

Matériaux	t/mois	t/an
Fumier de bovin	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Fumier d'ovin	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Lactosérum	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Lisier de bovin	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Autre	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Total	0	0

Calcul Total

Retour Suivant

Insérer la quantité de déchet par mois et par année et calculer le total

Figure III. 11 : Caractéristiques du gisement.

En cliquant sur le bouton « **Suivant** » apparaît la fenêtre « Figure III.12 »

Et en cliquant sur le bouton « **Retour** » dans « Figure III.9 » l'apparaît la fenêtre « Figure (III.9) ou Figure (III.10) ».

Evaluation des besoins energetiques

Insérer la consommation électrique et thermique dans le bâtiment

	Bâtiment(s) d'habitation		Unité de méthanisation		Exploitation agricole	
	Mois	Année	Mois	Année	Mois	Année
Consomation electrique	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Consomation chauffage	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Suivant

Figure III. 12 : Des besoins énergétiques.

En cliquant sur le bouton « **suivant** » apparait la fenêtre « Figure III.13 »

Evaluation de la production quotidienne de biogaz (Methane)

Insérer les données de chaque jour pour calculer la quantité de biogaz dégagé

Date	Production Quotidienne de Biogaz

Données

Date: 07/06/2018

M (t/j):

V (m3):

M (t):

MO (m3/j):

Ajouter

Retour    Supprimer    Suivant

Figure III. 13 : Evaluation de la production quotidienne de biogaz, de méthane.

En cliquant sur le bouton « **suivant** » apparait la fenêtre suivante « Figure III.14»

En cliquant sur le bouton « **Retour** » apparait la fenêtre suivante « Figure III.12 »



Quantité de méthane produit (m3/j)

Taille de l'installation  Petite  Moyenne  Grande

Accordent au reseau electrique  Oui  Non

Choix de la taille de l'installation

Choisir si vous voulez vous raccorder au réseau

**Figure III. 14 :** la taille de l'installation (quantité de biogaz produite).

En cliquant sur le bouton « **suivant** » apparaît la fenêtre « Figure III.15 ».

**Energie Electrique**

Dispo Gaz

Dispo Machine

rendement électrique

production quotidienne d'énergie primaire.

**Energie Thermique**

Dispo Gaz

Dispo Machine

rendement thermique

production quotidienne d'énergie primaire.

Prix Installation  Prix (DA)

Prix de la production (année)

Prix de la maintenance

Prix de main d'oeuvre

Elimination des boues

Prix total

Insérer les données et cliquez sur le bouton afficher résultat pour calculer et afficher le résultat final

**Figure III. 15 :** Les Résultats d'Energies et le prix.

Cliquer sur le bouton « **Terminer** » pour fermer l'application.

# *Chapitre VI*

*Résultats de simulation et discussions*

**Exemple de simulation :**

Dans ce chapitre nous allons faire exécuter un exemple de simulation :

Les données sont les suivantes [52] :

- ✓ Nous allons prendre la disponibilité des machines égale à la disponibilité du biogaz égale à 95%.
- ✓ Les rendements électriques et thermiques de notre moteur à gaz seront.

$\eta_{\text{électrique}} = 38 \%$  et  $\eta_{\text{thermique}} = 40 \%$ . Notre installation aura donc un rendement de 78%.

The screenshot shows a software window titled "Définition du site" with the following fields and values:

Nom Client	BLIDA
Localisation	B
L'altitude de la zone (m)	36.2
Le nombre de parcelles principales	1
Les surfaces (m <sup>2</sup> )	700

Buttons: Retour, Suivant

**Figure IV. 1 :** Inséré Les donnée de site.

The screenshot shows a software window titled "Tableau des températures" with the following table:

Mois	T-Min (°C)	T-Max (°C)	Mois	T-Min (°C)	T-Max (°C)
Janvier	9	15	Juillet	27	37
Fevrier	9	15	Aout	26	37
Mars	11	18	Septembre	22	31
Avril	14	22	Octobre	19	27
Mai	18	27	Novembre	13	19
Juin	23	33	Decembre	10	15

Buttons: Retour, Suivant

**Figure IV. 2 :** Insertion des températures [53].

**Agricole**

	Effluents d'élevage	Effluents agricoles	co-sustrats
Provenance (Interne ou externe ou melange)	interne	interne	interne
Production totale (t/mois) en matière sèche	40	40	40
Production totale (t/mois) en matière organique	60	60	60

---

**Mode de valorisation**

filière	pérennité de la filière	coûts	logistique
0	0	0	0

---

**Mode de Stockage :**       Existant       A créer

Figure IV. 3 : Insertion les données.

Données nécessaires au calcul de la quantité de biogaz dégagé :

M=80(t/j)      V=100(m3)      M=5 (t)      MO=450 m3

**Evaluation de la production quotidienne de biogaz (Methane)**

Date	Production Quotidienne de Biogaz
07/06/2018	7200.0

**Données**

Date: 07/06/2018

M (t/j): 80

V (m3): 100

M (t): 5

MO (m3/j): 450

Figure IV. 4 : Insertion les données pour calculer la quantité.

Après la saisie des données dans le tableau dans Figure IV.4 de l'évaluation de la production de biogaz, on obtient des résultats justes et cela après comparaison avec l'étude déjà réalisée [52] .

Quantité de méthane produit (m3/j)

Taille de l'installation  Petite  Moyenne  Grande

Accordent au reseau électrique  Oui  Non

**Figure IV. 5 :** calculer la quantité de méthane produit.

**Energie Electrique**

Dispo Gaz

Dispo Machine

rendement électrique

production quotidienne d'énergie primaire.

Resultat : 15120.6655

**Energie Thermique**

Dispo Gaz

Dispo Machine

rendement thermique

production quotidienne d'énergie primaire.

Resultat : 15916.49

**Prix Installation** Prix (DA)

Prix de la production (année)

Prix de la maintenace

Prix de main d'oeuvre

Elimination des boues

Prix total

**Figure IV.6 :** Affichage résultat.

On constate que les résultats sont satisfaisants car en les comparant avec les résultats obtenus [52] ils sont pratiquement identiques.

# *Conclusion générale*

### **Conclusion générale :**

Dans cette étude l'intérêt est porté sur la faisabilité et le dimensionnement d'une unité de méthanisation agricole.

Les problématiques abordées dans l'étude permettent en sachant comment produire de la méthanisation agricole, et quelles sont les valorisations énergétiques possibles du biogaz produit, et aussi quels sont les coûts d'investissement pour la création d'une unité de méthanisation agricole. Pour mener à bien les objectifs cités ci-dessus, nous avons conçu un outil (Logiciel) sous forme d'interface graphique permettant de simuler chaque cas, pour le rendre plus facile de savoir si une l'unité de méthanisation est rentable ou non.

Cet outil est conçu selon un organigramme permet de calculer :

- ✓ La quantité de biogaz dégagée
- ✓ La quantité de l'énergie électrique produite
- ✓ La quantité de l'énergie thermique produite
- ✓ Le prix de l'installation

Et enfin cet outil nous permet de répondre à la question si le projet de méthanisation agricole d'une ferme donnée est rentable ou pas.

Tous ces résultats sont obtenus à partir d'un algorithme sur lequel est basée notre interface graphique. Pour cela les étapes sont décrites dans un organigramme.

L'interface obtenue est une interface facile à l'utilisation ( friendly interaface). Elle est conçue de manière modulaire. L'utilisateur peut ainsi simuler plusieurs installations et ainsi pouvoir choir la meilleure ou la plus adéquate à son projet. Il gagnera en temps de décision et en argent. Cela peut être utilisée aussi pour déterminer le projet optimal.

En perspective, il serait intéressant d'améliorer cette interface en insérant :

- ✓ Le calcul du digestat
- ✓ Le dimensionnement de chaque élément de l'installation de la méthanisation
- ✓ Le calcul de la quantité de biogaz possible à stoker

## Références Bibliographiques :

- [1] R.D Schmid, 'Biotechnologie et de génie génétique', Edition Flammarion Médecine - Science, 2005, 172p.
- [2] B.D La Farge, 'Le Biogaz, Procédé de fermentation méthanique', Edition Masson, 1995,237p.
- [3] U. MARCHAIM, Les procédés de production de biogaz pour le développement de technologies durables,1994,1014-4218, FAO, 95 p.
- [4] L. ANDRÉ,' de verrous scientifiques et technologiques pour la compréhension et l'optimisation du procédé de méthanisation voie sèche discontinu de sous-produits d'origine agricole', Thèse de Doctorat de l'Université de Technologie de Compiègne,16 Juin 2016.
- [5] J. Van Brakel,1980. Biogasbefore 1970 : a review. Trop Sci. 22, 105-148.
- [6] F. Béline, P. Peu, P. Dabert, A.Tremier , ' La méthanisation en milieu rural et ses perspectives de développement en France', Sciences Eaux & Territoires,2013,6-12.
- [7] Ducellier, G.LR., Isman, A.M.L., System for producing a pulsating circulation in apparatus containing gase volving products,1939, US2174203 A US patent.
- [8] A. Henham, K. Makkar,1998 Combustion of simulatedbiogas in a dual-fuel diesel engine. Energy Conversion and Management 39, 2001-2009.
- [9] S.H. Kim, G.H. Kafle,'Anaerobic treatment of apple waste with swinemanure for biogas production : Batch and continuous operation', Applied Energy,2004,103, 61-72.
- [10] M. Santos, J.A. López, A.F. Pérez, A.M. Martín 'Modelling the anaerobic digestion of waste water derived from the pressing of orange peel produced in orange juice manufacturing', BioresourceTechnology 101(11), 2010,3909-3916.
- [11] C. Fang, K. Boe, I. Angelidaki 'Biogas production frompotato-juice, a by-productfrompotato-starchprocessing, in upflowanaerobicssludgeblanket (UASB) and expanded granularsludgebed (EGSB) reactors ,BioresourceTechnology102 (10),2011, 5734-5741.
- [12] Analyse des coûts d'investissement en méthanisation agricole Comparaison France et Allemagne,Février 2013.
- [13] K. Derbal, M. Bencheikh-lehocine, A. Meniai ,Study of Biodegradability of Organic Fraction of Municipal Solids Waste. Energy Procedia,2012, 19, 239-248.
- [14] I. Syaichurrozi, B. Budiyo, S. Sumardiono Predictingkinetic model of biogas production and biodegradabilityorganicmaterials : Biogas production from vinasse at variation of COD/N ratio. Bioresource Technology 149, 390-397,2013.



- [15] E.A. Scano , C. Asquer ,A. Pistis , L. Ortu , V. Demontis , D. Cocco , Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant. *Energy Conversion and Management* 77, 22-30, 2014.
- [16] L. AMROUCHE et S. IGOUD, pourquoi s'intéresser au biogaz, juin 2005.
- [17] S. Igoud, I. Tou, S. Kehal, N. Mansouri et A. Touzi , Première Approche de la Caractérisation du Biogaz Produit à Partir des Déjections Bovines, Vol. 5 (2002) 123-128.
- [18] M. Djaafri<sup>1</sup>, S. Kaloum, M. Khelafi, A. Tahri, F. Salem, K. Kaidi, L. Bensmail, O. Barako, A. Kadri, A. Amrouche, Méthanisation des déchets organiques issus de la résidence universitaire de l'université Africaine de la ville d'Adrar Sud-Ouest de l'Algérie *Sci. 5 (S2)* (2014) 2484-2488.
- [19] A. Zaatri, N. Kacem Chaouche et M. Karaali, Etude de bioréacteurs anaérobies expérimentaux pour la production de méthane, Vol. 14 N°2 (2011) 291 – 300.
- [20] [https://www.actuenvironnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/biogaz.php4](https://www.actuenvironnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/biogaz.php4) (consulté le 04/04/2017).
- [21] R. Labrecque, C. Laflamme, Méthode pour l'analyse technico-économique de scénarios de traitement de déchets putrescibles, *Vecteur Environnement* 2008, 41(1), 40–3.
- [22] E. Sanchez, S. Montalvo, L. Travieso, X. Rodriguez X, Anaerobic digestion of sewage sludge in an anaerobic fixed bed digester, *Biomass Bioenergy* 1995, 9(6), 493–5.
- [23] T. Forster-Carneiro, M. Pérez, L.I. Romero, Thermophilic anaerobic digestion of source sorted organic fraction of municipal solid waste, *Bioresource Technol* 2008, 99(15), 6763–70.
- [24] M. Philippe, M. Bernard, M. Christine, B. Claude, 'Economic and environmental assessment on the energetic valorization of organic material for a municipality in Quebec, Canada', *Elsevier/Applied Energy* 87 (2010) 275–283.
- [25] [http://www.biogaz-energie-renouvelable.info/biogaz\\_composition.html](http://www.biogaz-energie-renouvelable.info/biogaz_composition.html) (consulté le 05/04/2017).
- [26] A. Damien, 'Guide du traitement des déchets' 3ème Edition, Dunod, 2004, 448 p.
- [27] B.D La Farge, 'Le Biogaz, Procédé de fermentation méthanique', Edition Masson, 1995, 237p.
- [28] A, Demeyer, F. Jacob, M. Jay, G. Menguy et J. Perrier, 'La Conversion bioénergétique du rayonnement solaire et les biotechnologies', Edition Tec & Doc, 1980, pp. 213-215.

- [29] A. Bilal, Optimisation de l'utilisation du biogaz des méthaniseurs, Thèse de Magister, 20 juin 2011.
- [30] J. Godon, E. Zumstein, P. Dabert, F. Habouzit et R. Moletta, " Microbial 16S rDNA, diversity in an anaerobic digester." Appl. Environ. Microbiol, 1997a 63 (7): 2802-2813.
- [31] J.A. Shapiro, " Thinking about bacterial populations as multicellular organisms." Annu Rev Microbiol 52, 1998, 81-104.
- [32] N. Azbar, P. Ursillo et R. E. Speece," Effect of process configuration and substrate complexity on the performance of anaerobic process", Water res, 2001, 35 (3) : 817-829.
- [33] G. Zeikus,(1980). Microbial populations in digesters. Anaerobic digestion. Stafford, Wheatley et Hughes. Londres, Applied Science, 1980, 61-87.
- [34] G. Moletta, 'Procédés biologiques anaérobies, Dans Gestion des problèmes environnementaux dans les industries agroalimentaires' Technique et documentation - Editions Lavoisier, Paris (2002).
- [35] A. Damien, 'Guide Du traitement des déchets', 4ème Edition, Dunod, 2006, 520 p.
- [36] B.D La Farge, 'Le Biogaz, Procédé de fermentation méthanique', Edition Masson, 1995, 237p.
- [37] O. Cheknane, Biomasse, (cours), 2016.
- [38] J. Rapport, R. Zhang, B.M. Jenkins, & R.B. Williams Current anaerobic digestion technologies used for treatment of municipal organic solid waste. University of California, Davis, Contractor Report to the California Integrated Waste Management Board, 2008.
- [39] A. Punal, M. Trevisan, A. Rozzi, J. Lema, 2000 Influence of C:N ratio on the start-up of up-flow anaerobic filter reactors. Water Research, 2000, 34, 2614-2619.
- [40] S. Melle Benarour, 'Réalisation d'un digesteur pour la production du biogaz', thèse de Master, 29/09/2016.
- [41] I. Tou, S. Igoud et A. Touzi, Production de Bio méthane à partir des déjections animales (article), Rev. Energie Renouvelables : Production et valorisation - Biomasse, C.D.E.R Alger (2001) 103-108.
- [42] S. Igoud et al, Première Approche de la caractérisation du Biogaz Produit à Partir des Déjections Bovines (article), Revu. Energie Renouvelable. Vol.5 (2002) 123-128.
- [43] A. Yettou, R. Miri et M. Blhamel, Etude expérimentale d'un digesteur de production de biogaz alimenté en énergie par un chauffe-eau solaire (article), Revu des Energies Renouvelables CER'07 oujda a (2007) 13-17, Université Houari Boumedienne Bab Ezzouar Alger.

[44] MONTAGE DE PROJET DE MÉTHANISATION.

[45] Fiche n°3 Cahier des charges pour trouver un bureau d'études Conduite de projet et faisabilité.

[46] Etude de la faisabilité d'une installation de méthanisation à la ferme en Savoie : application à la haute vallée de la Maurienne.

[46] Réalisation d'un référentiel technico-économique des unités de méthanisation de produits organique agricoles et non agricole à petite échelle en Europe lots 1 et 2, contrat ADEME n°0375C0057,24 septembre 2003.

[47] BIOTECHNOLOGIES POUR LETRAITEMENT DE L'EAU ET DES DECHETS, Méthanisation,6-10 juin 2011, Narbonne.

[48] B. Frédéric, étude de faisabilité techno-économique et sociopolitique d'un projet régional de méthanisation de lisier de porc en co-digestion, Université de Sherbrooke février 2009.

[49] M. Maurer, R. Gendre, Le BIOGAZ en Alsace : Potentiel, étude économique, énergié, Programme l'Alsace dit oui aux énergies renouvelables,2004.

[50] RECORD, Techniques de production d'électricité à partir de biogaz et de gaz de synthèse,2009, 253 p, n°07-0226/1A.

[51] La méthanisation, Fiche technique, Comment se transforme la matière organique en énergie ?

[52] M. GWOGON,' Etude de faisabilité sur la production de l'électricité a partir du biogaz a edea (cameroun)', thèse de Master,03/2013.

[53] site : [www.ncdc.noaa.gov](http://www.ncdc.noaa.gov)

**ANNEXE**  
**ESTIMATION DES INVESTISSEMENTS POUR UNE CENTRALE DE MÉTHANISATION EN FONCTION DE LA CAPACITÉ DE TRAITEMENT**

**ESTIMATION DES INVESTISSEMENTS POUR UNE CENTRALE DE MÉTHANISATION EN FONCTION DE LA CAPACITÉ DE TRAITEMENT**

La présente formule générale de l'évolution des coûts d'investissement en fonction de la capacité, a été utilisée pour transposer le total des coûts recensés (par technologie) à une centrale d'une capacité de traitement de 8 300 t de solides totaux.

$$\frac{\text{Investissement du projet}}{\text{Investissement recensé}} = \left[ \frac{\text{Capacité du projet}}{\text{Capacité recensé}} \right]^{0,6}$$

**Exemple : Calcul des investissements pour infrastructures de méthanisation pour une centrale de méthanisation, à partir des coûts d'investissement recensés de Applied Technology.**

Coûts d'investissement d'Applied Technology = 5 890 571,23 \$

Capacité de traitement recensée = 13 800 tonnes

Capacité de traitement du projet = 8 300 tonnes

Calcul :

$$\text{Investissement du projet} = \left[ \frac{8300 \text{ t}}{13800 \text{ t}} \right]^{0,6} \times 5\,890\,571,23 \text{ \$}$$

Investissement du projet = 4 341 870,00 \$

Les résultats des cinq estimations utilisées se retrouvent au tableau A-7.1.

Tableau A-7.1 : Estimation des investissements en dollar canadien pour une centrale de méthanisation d'une capacité de traitement de 8 300 t de ST, selon les cinq sources de coûts recensés.

	Applied Technologie	RCM-Biothane	Andigen	Biopower Technologies	Estimation maison
Investissement de base digesteur	4 341 870,00 \$	5 742 361,12 \$	4 304 822,05 \$	4 176 715,3 \$	4 327 675,41 \$

Pour l'estimation des investissements du scénario moyen, la moyenne des cinq résultats a été utilisée, soit 4 578 688,78 \$.