

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en
Génie Mécanique
Option : Energétique

Etude de l'efficacité énergétique d'une ferme pilote

Proposé et encadré par :
Dr N.E KHELALFA

Réalisé par :
M. HAMAI DI Badreddine
M. BOUNOUA Yacine

Année universitaire 2018/2019

Table des matières

Résumé

Abstract

ملخص

remerciement

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

	Introduction générale.....	09
1	Recherche bibliographique	11
1.1	Définition et historique :.....	11
1.2	La méthanisation en Algérie :.....	12
1.3	Le processus de la digestion anaérobie	13
i.	Description des étapes :.....	13
ii.	L'environnement réactionnel.....	16
iii.	Les principaux inhibiteurs	18
1.4	Les différents types de technologies utilisé dans la méthanisation.....	19
iv.	Technologie en voie sèche discontinue	19
v.	La voie humide	21
1.5	Différents systèmes de digesteurs	22
vi.	Les exigences d'une installation de digesteur.....	22
vii.	Digesteur Lit de boues expansées	23
viii.	Digesteur « lagon couvert »« Covered Lagoon Digester».....	24
ix.	Digesteur à lit fixe et à lit fluidisé	25
x.	Digesteur à circulation	26
xi.	Digesteur mixe complet « Complete Mix Digester ».....	26
1.6	Les différents matériaux utilisés dans la construction d'un digesteur	27
xii.	Acier	27
xiii.	Le béton	27

1.7	Comparaison entre les digesteurs.....	28
1.8	Valorisation du biogaz	28
xiv.	Valorisation thermique.....	28
xv.	Valorisation électrique (avec ou sans cogénération)	29
xvi.	Le biogaz carburant	29
1.9	Propriétés du biogaz.....	30
1.10.	30
2	Problématique	31
3	L'interface	32
3.1	L'Organigramme.....	33
3.2	L'interface	36
4	Partie calcul	50
4.1	Tonnage :	50
xvii.	Calcul de masse volumique.....	50
xviii.	Tonnage journalier :	50
xix.	Tonnage annuel :	50
4.2	Qualité de déchet et valorisation en biogaz :	51
4.3	CALCUL DE QUANTITE DE BIOGAZ PRODUITE PAR AN :	51
i.	Calcul de matière sèche annuelle.....	51
ii.	Calcul de matière organique annuelle :	51
iii.	Estimation de quantité de biogaz annuelle	51
iv.	Estimation de débit de biogaz par heure.....	51
v.	Estimation de débit de méthane par heure ch_4 /h.....	51
4.4	PROPRIETES DU BIO GAZ	52
i.	Calcul de l'énergie pouvant être produite par le biogaz en un an	52
ii.	Estimation de l'énergie valorisable produite en un an.....	52
iii.	Calcul de l'énergie fournie par le biogaz en une heure et choix du moteur.....	53
4.5	Le choix de Co-générateur	54
4.6	Production d'électricité et de chaleur :	54
4.7	Consommation :	56
i.	Consommation d'électricité :.....	56
ii.	Energie électrique totale consommée par le digesteur en une année :	56
iii.	Energie électrique consommée par la ferme en une année :.....	56
iv.	Energie électrique pouvant-être vendue :.....	56
v.	Estimation de chaleur requise :.....	57
vi.	Pertes thermiques	58

vii.	Quantité de chaleur consommée par le digestat :	58
4.8	Commentaire :	59
4.9	Suggestions :	60
viii.	Suggestion N°01 :	60
ix.	Suggestion 02 : pour une grande production	61
4.10	Conclusion.....	62
5	Références	64

Résumé :

Dans notre mémoire nous nous sommes intéressés à l'étude et l'exploitation d'un digesteur à circulation de 250m³ pour faire d'une ferme (à El Affroun de 100 vaches), une ferme autonome en énergie. Ce projet a pour premier objectif, de dimensionner l'installation de génération d'énergie (chaleur, gaz, électrique ou cogénération) en usant de la biomasse. Le second objectif est de développer un outil d'aide à la décision (un logiciel) qui permettra dans l'avenir à étudier et à dimensionner n'importe quelle ferme désirant générer de l'énergie grâce à ses déchets. Cet outil de calcul permet aussi d'estimer le coût de la facture de cette installation.

Mots clés : Biogaz, biomasse, valorisation énergétique, traitement de déchet, production d'électricité, cogénération, type de digesteur.

Abstract:

In our thesis, we were interested in the study and the exploitation of a 250m³ plug flow digester to make of a farm (in El Affroun of 100 cows), an autonomous farm in energy. The main objective of this project is to size the energy generation plant (heat, gas, electricity or cogeneration) using biomass. The second objective is to develop a decision support tool (a software) that will allow in the future studying and sizing any farm wishing to generate energy through its waste. This calculation tool also makes it possible to calculate the bill for this installation.

Key words: Biogas, Biomass, waste to energy, waste treatment, electricity production, cogeneration.

ملخص

في مذكرتنا سلطنا الضوء على دراسة و استغلال هاضم بدورة 250 متر مكعب للجعل من المزرعة (في العفرون ب 100 بقرة) مزرعة ذاتية التزويد بالطاقة. هذا المشروع يهدف بالدرجة الاولى الى تحجيم تركيب مصنع لإنتاج الطاقة (حرارة، غاز، كهرباء توليد مشترك للطاقة) باستعمال الكتلة الحيوية, الهدف الثاني هو تطوير اداة لدعم القرار (برنامج) أداة الحساب هذه .التي سوف تسمح مستقبلا بدراسة و تحجيم أي مزرعة كانت بغرض تزويدها بالطاقة بفضل فضلاتها, تسمح أيضا بتقدير قيمة هذا التركيب

الكلمات المفتاحية: الغاز الحيوي، الكتلة الحيوية، استعادة الطاقة، معالجة النفايات ، توليد الكهرباء ، التوليد المشترك للطاقة ، نوع الهضم

Remerciement

Louange à notre seigneur et créateur ALLAH qui nous a doté de la merveilleuse faculté de raisonnement et de nous avoir incité à acquérir le savoir. C'est à lui que nous adressons notre gratitude en premier lieu.

Nous tenons à exprimer toute nos reconnaissances à notre directrice de mémoire, Dr N.E KHELALFA. Nous la remercions de nous avoir encadrés, orientés, aidés et conseillés.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté de nous rencontrer et de répondre à nos questions durant nos recherches. Sans oublier le chef de département Professeur Mustapha TEMAR qui a rapporté pleins de bonne manière dans notre département, en facilitant la tâche administrative aux étudiants.

Nous tenons à remercier tous les membres de jury pour avoir accepté de présider et d'examiner ce travail.

Nous remercions nos très chers parents, qui ont toujours été là, pour nous.

Nous remercions tous les étudiants(es) de master en génie mécanique, option : Energétique et installation énergétique.

Liste des Figures

Figure 1 : Processus simplifié de la digestion anaérobie des matières organiques.....	13
Figure 2: Pouvoirs méthanogène.....	15
Figure 3: Les effluents d'élevages avant et après la digestion anaérobie: (Naskeo Environnement, 2015)	16
Figure 4: Schéma simplifié de processus de la digestion anaérobie	22
Figure 5:Schéma montrant le processus de Lit de boues expansées	23
Figure 6: Composants du système de lagon couvert	24
Figure 7:schéma montrant le fonctionnement d'un digesteur à lit fluidisé	25
Figure 8: Conception typique d'un digesteur à Circulation	26
Figure 9: Conception typique du digesteur mixte complet (Viswa , Mattsson, & Karlsson, 2013)	26
Figure 10: schéma montrant le fonctionnement du digesteur mixte complet (Hanif, 2013).....	27
Figure 11: Fenêtre N° 01 du logiciel ASF TOOLS	36
Figure 12: Fenêtre N°01' de l'application web ASF digital	36
Figure 13:Fenêtre N°02 du ASF.....	37
Figure 14: FenêtreN°02' de l'application web.....	38
Figure 15: fenêtre n°02 de l'ASF Tools.....	39
Figure 16: Fenêtre N°3 du ASF.....	40
Figure 17: Fenêtre N°03' de l'application web	41
Figure 18: FenêtreN°04 de l'ASF Tools.....	44
Figure 19: FenêtreN°04' de l'application web ASF digital	45
Figure 20: FenêtreN°05 de l'ASF Tools.....	46
Figure 21: FenêtreN°05' de l'application web ASF Digital.....	47
Figure 22: fenêtre N°6 du ASF Tools	48
Figure 23: fenêtre N°6' de l'application web ASF Digital	49
Figure 24: Les caractéristiques du cogénérateur ecoGEN16AGc	55
Figure 25: « Digesteur utilisé digesteur à circulation " plug flow digester"	56
Figure 26: Répartition de l'énergie électrique produite par l'unité de méthanisation	57
Figure 27: schéma montrant la structure surfacique du digesteur	57
Figure 28: Répartition de l'énergie thermique annuelles	59

Liste des tableaux

Tableau 1: Gammes de températures permettent la mise en œuvre du processus de digestion anaérobie.	17
Tableau 2: comparaison entre les différents types de digesteurs.....	28
Tableau 3: les caractéristiques du déchets	51
Tableau 4: tableau récapitulatif des résultats trouvés	53
Tableau 5: Tableau montrant les caractéristiques de Co-générateur	54
Tableau 6: Structure et son coefficient d'échange	58
Tableau 7: répartition de l'énergie thermique annuelles	59
Tableau 8: suggestion pour 345 MWhél et 580MWth annuel.....	60
Tableau 9: suggestion pour 1321.7MWhél et 2183.7MWth annuel	61

Liste des abréviations

AGV: Acide Gras Volatile

ASF: Algerian Smart Farm

C/N: le rapport carbone, azote

D.M: Dry Matter

E/ Energie

GNC: Gaz Naturel Comprimé

GNL: Gaz Naturel Liquéfié

GNV: Gaz Naturel pour Véhicules

M.S: Matière sèche

M.V: Matière Volatile

MB: Matière de Base

MO: Matière Organique

Nm: Normal mètre

PCI: Pouvoir Calorifique Inférieur

Qa: quantité de biogaz annuelle

$Q_{CH_4/h}$: Débit de Méthane par Heure

Qh: Débit de Biogaz par Heure

tMO: Tonnes de Matière Organique

UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket

V.M: volatile Matter

V₁: volume un

V₂: Volume deux

Introduction générale

L'utilisation des énergies fossiles comme le pétrole et ses dérivés, le gaz naturel et le charbon sont des formes d'énergie qui s'accompagnent par des pollutions de la planète comme les émissions de gaz à effet de serre (GES) dont le principal gaz est le dioxyde de carbone ayant pour conséquence le réchauffement climatique, la fonte des glaces, la remontée des océans...

Une des solutions recherchées est l'utilisation des énergies renouvelables comme l'énergie solaire où l'Algérie dispose d'un gisement important, l'énergie éolienne, la géothermie, l'énergie hydraulique et l'énergie de biomasse.

Nous sommes intéressés dans ce présent travail à la valorisation des déchets par énergie biomasse appelée l'énergie verte. C'est une source énergétique propre sans effet néfaste sur l'environnement naturel et c'est un moyen de lutter contre les Gaz à effet de serre (GES).

Dans cette étude, nous développons une méthodologie de dimensionnement de l'installation de génération d'énergie par biomasse et à l'exploitation d'un digesteur à circulation de 250m³ pour faire d'une ferme (à El Affroun) de 100 vaches une ferme autonome en énergie. Ce travail sera mis sous la forme d'un logiciel (outil d'aide à la décision) qui permettra de faire tous les calculs et les choix techniques ainsi que de facturer le projet. Pour cela des études préliminaires furent nécessaires.

La biomasse c'est la fraction biodégradable des produits composant les matières organiques soit les déchets et résidus provenant de l'agriculture, les substances végétales et animales, la sylviculture et les industries connexes ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers. La biomasse peut être utilisée comme combustible.

La méthodologie de cette valorisation est la production du biogaz par processus de méthanisation en conversion biomasse microbiologique. La méthanisation est un procédé de conversion simple des matières organiques en absence d'oxygène et en présence des microorganismes.

Nous présenterons dans le premier chapitre l'énergie biomasse, les procédés de méthanisation, les types du digesteur et la valorisation énergétique du biogaz.

Le deuxième chapitre est une description de la problématique qui nous a mené à choisir ce sujet pour le traiter.

Le troisième chapitre est la partie digitale de notre projet où nous présentons notre logiciel ASF TOOLS ainsi que l'application web ASF digital, avec un mode d'emploi ainsi que l'organigramme de l'interface.

Nous présenterons dans le chapitre quatre les résultats et les discussions obtenus. Ils porteront sur l'effet des températures ambiantes, la température d'immersion dans le digesteur, la nature des déchets leurs composition la teneur en matières organique/sèche ; les transferts de chaleur et leur effet sur l'énergie consommée et l'énergie produite.

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion et les perspectives, où nous évoquerons les recommandations dans le but de bien comprendre les phénomènes de méthanisation anaérobie et de passer à grande échelle.

1 Recherche bibliographique

1.1 Définition et historique :

La méthanisation (ou encore appelé « digestion anaérobie ») est la transformation de la matière organique en un biogaz composé principalement de méthane et de gaz carbonique par un consortium microbien fonctionnant en anaérobiose.

C'est une transformation naturelle qui se réalise dans tous les milieux où l'on trouve de la matière organique en absence d'oxygène, et où les conditions physico-chimiques sont compatibles avec celles du vivant. Elle se réalise donc dans les marais, les intestins des animaux et des insectes, les rizières, le fond des lacs...c'est une transformation qui permet d'éliminer la matière organique pour faire un biogaz énergétique, via le méthane qu'il contient.

Alessandro volta (1745-1827) montra en 1776 que le gaz produit dans les marais était combustible(inflammable). Lavoisier notamment, en 1787, mis en évidence que le gaz inflammable de volta était du « gaz hidrogenuim carbonatrum » Ce n'est qu'en 1865 que le terme méthane fut proposé.

De nos jours, dans un contexte mondial où la demande en énergie est croissante, le changement climatique avéré et les démarches de développement durable nécessaires, la méthanisation est un choix judicieux pour répondre à ces problématiques car elle comporte plusieurs avantages (ADEME, 2015):

- la production d'énergie renouvelable,
- la production d'un digestat présentant une valeur agronomique,
 - la réduction des gaz à effet de serre (GES) par captage direct du méthane émis par les déchets organiques ou par substitution du biogaz à l'énergie fossile, et du digestat aux engrais minéraux chimiques,
 - la diminution de la quantité de déchets organiques, et en particulier ceux non valorisables par une filière de compostage car trop humides (grasses)

Aujourd'hui en Algérie la méthanisation reste une méthode négligée vu le prix du gaz de ville. Mais est-ce que le gaz de ville est durable. (Moletta & Verstraete, 2008).

1.2 La méthanisation en Algérie :

L'utilisation du biogaz en Algérie remonte à 1940. Son exploitation avait permis la mise en marche des phares et des bouées qui ont illuminés toute la cote algérienne.

C'est surtout grâce aux travaux de deux chercheurs DUCCELLIER et ISMAN que ce biocombustible convertible en toute forme d'énergie (chaleur, électricité, carburant...) a été exploité.

Un premier digesteur fut construit à l'institut national agronomique (ENSA ex INA) d'El Harrach et en 1948 on assiste à la mise en marche de la première voiture expérimentale au niveau africain.

L'année d'après, 08 cuves de 40 m³ furent construites et produisirent jusque dans les années 1960 près de 30 000 m³ biométhane par an. Le substrat de digestion était récupéré du cheptel qui comptait 15 bovins, 12 chevaux, et 25 porcs produisant en moyenne 260 tonnes de fumier par an.

Le gaz produit servait pour la cuisine de l'internat (200 élèves), pour les besoins du laboratoire et de 02 tracteurs. Après l'indépendance, cette technologie a été malheureusement abandonnée au profit de l'énergie fossile alors qu'en parallèle elle s'est développée dans les pays voisins que ce soit en Tunisie, au Maroc et même dans les autres pays africains (Burkina, Mali, Niger, Sénégal...).

En effet, on dénombre actuellement en Tunisie plus d'une cinquantaine de digesteurs familiaux, les eaux usées de la ville d'Agadir (Maroc) sont traitées par méthanisation et le biogaz produit sert de carburant pour les pompes et les tracteurs.

En ce qui nous concerne, ce n'est qu'en 1984 que CDER de Bouzaréah a relancé les recherches dans ce domaine à travers la réalisation d'un digesteur pilote à Bouzareah et de deux autres, l'un à Igli (Bechar) et l'autre au parc zoologique de Ben Aknoun.

Ces premières tentatives de recherche ont été redynamisées, en 2000, par l'équipe de recherche de Biogaz de la Division Bioénergie et environnement.

Les activités se sont concrétisées par la conception et la réalisation d'un premier digesteur de 800 litres puis d'un second de 70 litres. La bouse de vache est utilisée comme substrat. Cette première approche vise l'autonomie énergétique des zones agricoles et isolées. (Amrouche & Igoud, 2005)

1.3 Le processus de la digestion anaérobie

Quel que soit le procédé appliqué (voie humide ou voie sèche), la méthanisation repose toujours sur le même processus de dégradation de la matière organique : la digestion anaérobie

i. Description des étapes :

La digestion anaérobie est une réaction biologique multi-étapes impliquant une multitude de micro-organismes qui forment un réseau trophique. Quatre grandes étapes permettant la transformation de la matière organique complexe en molécules simples que sont le méthane et le dioxyde de carbone (figure 01) :

- L'hydrolyse,
- L'acidogènes,
- L'acétogénèse
- La méthanogènes

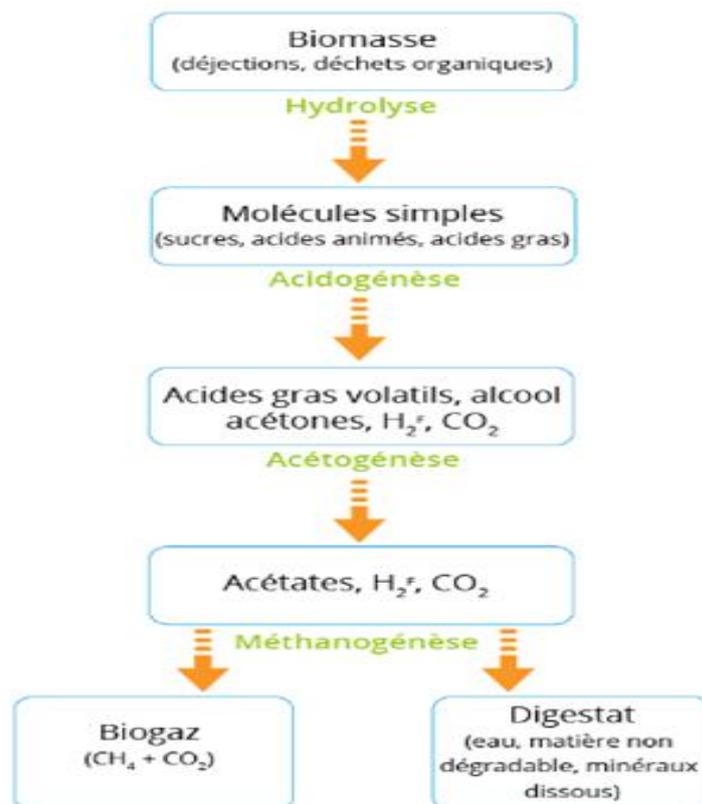


Figure 1 : Processus simplifié de la digestion anaérobie des matières organiques

(Naskeo Environnement, 2015)

A chacune de ces étapes, des micro-organismes particuliers sont impliqués et les « déchets » des uns alimentent les autres (Godon, 2008). Une description rapide et simplifiée de ces étapes est donnée dans les paragraphes qui suivent.

a) L'hydrolyse

L'hydrolyse est la première étape de la digestion anaérobie. Au cours de celle-ci, les molécules complexes sont transformées en molécules plus simples, de type monomère. Les polysaccharides (cellulose, hémicellulose) sont ainsi découpés en sucres simples comme le glucose, les protéines en acides aminés et les lipides en acides gras.

Les micro-organismes impliqués dans l'étape d'hydrolyse sont des bactéries à métabolisme anaérobie strict ou facultatif (GODON, 2008)

b) L'acidogénèse :

Cette étape permet de transformer les monomères produits pendant l'hydrolyse en acides gras volatils (AGV) (acétate, propionate, butyrate,...), en alcool (éthanol), en hydrogène et en dioxyde de carbone.

Elle est réalisée par des bactéries anaérobies facultatives (Gujer & Zehnder, 1983). Cette biomasse est la même que pour l'étape d'hydrolyse. L'acidogénèse est un mécanisme intracellulaire qui nécessite que les molécules pénètrent dans la membrane des bactéries. Son rendement énergétique étant élevé, cette réaction reste possible à des concentrations en produits (AGV, alcool, ...) élevées, soit à des pH faibles.

En cas de surcharge organique, l'acidogénèse peut provoquer l'inhibition totale ou partielle de la digestion anaérobie. En effet, la cinétique de l'acidogénèse étant beaucoup plus élevée que celles des autres étapes (S. G. Pavlostathis, 1991); (Shimizu, 1993), elle peut provoquer une accumulation d'acides gras volatils (AGV), et par suite, une diminution du pH défavorable à la croissance des microorganismes méthanogènes. Ceci peut être évité à condition qu'une communauté microbienne adaptée soit présente lors du démarrage de la digestion anaérobie (McMahon , Zheng, Stams, Mackie, & Raskin , 2004).

c) L'acétogénèse

Cette étape intracellulaire regroupe l'ensemble des réactions conduisant à la production d'acétate. Deux groupes de bactéries dites acétogènes sont impliqués lors de cette étape.

Le premier groupe impliqué, est constitué des bactéries acétogènes productrices obligées d'hydrogène (OPHA : Obligate Hydrogen Producing Acetogens). La thermodynamique de l'acétogénèse ne permet pas une consommation spontanée des AGV (GODON, 2008) à moins

de réduire la pression partielle de l'hydrogène dans le milieu réactionnel, c'est-à-dire de consommer instantanément l'hydrogène produit.

Cette voie métabolique n'est donc possible qu'en présence de microorganismes consommateurs d'hydrogène, comme les méthanogènes.

Le deuxième groupe de bactéries acétogènes est constitué des bactéries dites homoacétogènes. Elles produisent l'acétate à partir de substrats carbonés ou de dioxyde de carbone et d'hydrogène. En consommant l'hydrogène présent dans le milieu réactionnel, elles participent au maintien des conditions optimales de fonctionnement des OPHA.

d) La méthanogenèse

Les micro-organismes impliqués dans cette dernière étape ont un métabolisme anaérobie strict et appartiennent au domaine des *Archaea*. Elles permettent la production de méthane à partir des produits des étapes précédentes selon deux voies métaboliques principales :

- ✓ La méthanogenèse hydrogénophile
- ✓ La méthanogenèse acétoclastique.

Les méthanogènes hydrogénophiles produisent du méthane à partir de dioxyde de carbone et d'hydrogène, participant également au maintien d'une faible pression en hydrogène pour le développement des bactéries acétogènes.

- Les méthanogènes acétoclastes utilisent de l'acide acétique, du méthanol et des méthylamines pour fabriquer du méthane (Garcia, 2000). Dans un digesteur, 60% à 70% de la production de méthane provient des méthanogènes acétoclastes (Abbassi-Guendouz, et al., 2012) (GODON, 2008).

Chaque substrat organique produit une quantité de méthane qui lui est propre. Quelques exemples couramment utilisés en méthanisation sont présentés en figure 2 :

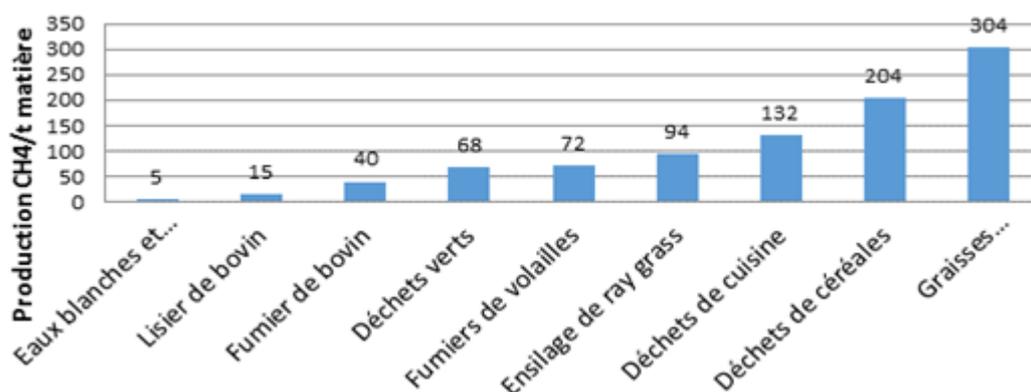


Figure 2: Pouvoirs méthanogène (Naskeo Environnement, 2015)

La décomposition de la matière organique fournit également un produit riche en humus et partiellement stabilisé, appelé **digestat**, qu'il est ensuite possible **de valoriser comme fertilisant naturel** et organique pour l'agriculture.

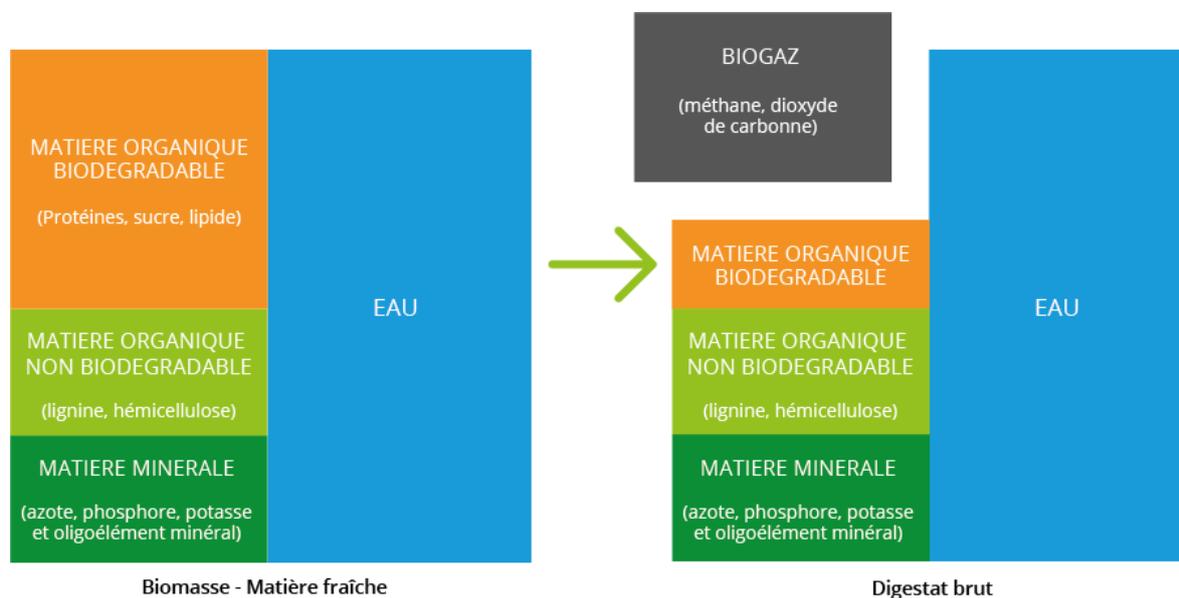


Figure 3: Les effluents d'élevages avant et après la digestion anaérobie : (Naskeo Environnement, 2015)

ii. L'environnement réactionnel

Les quatre étapes complémentaires de la digestion anaérobie présentées précédemment se déroulent en parallèle dans un seul et même milieu réactionnel.

La grande diversité des microorganismes impliqués rend l'équilibre de ce système biologique très fragile et sensible aux conditions physico-chimiques ambiantes, détaillées dans ce qui suit.

e) La température

Plusieurs gammes de températures permettent la mise en œuvre du processus de digestion anaérobie.

Dans les conditions psychrophiles, le milieu réactionnel est maintenu à des températures comprises entre 10 et 20°C (Jha, 2011); (Wellinger, 1999). Historiquement, ce procédé était très utilisé dans les années 1980 lorsque le biogaz servait pour le chauffage (Kothari, 2014)

Entre **20 et 45°C**, on parle de digestion anaérobie mésophile qui est la plus employée de nos jours (Kothari, 2014) et en particulier par les **unités de méthanisation à la ferme**.

Généralement équipées de Co-génératrices, ces unités utilisent la chaleur produite sur site pour maintenir les digesteurs à une température comprise entre 35 et 40°C (Wellinger, 1999).

Au-delà de 45°C et jusqu'à 65°C, la digestion est dite thermophile (Kothari, 2014). Ce type de procédé nécessite plus d'énergie pour le maintien des conditions de température, mais présente des avantages sanitaires, permettant l'élimination d'un plus grand nombre de germes pathogènes que les réacteurs mésophiles et psychrophiles (Weiland, 2010).

Du fait de leur réglementation sanitaire plus stricte, les unités de méthanisation centralisées travaillent souvent en conditions thermophiles (Kothari, 2014); (Wellinger, 1999).

Les conditions **mésophiles et thermophiles sont équivalentes en termes de rendement de méthane produit sur une grande variété de substrats** (Cecchi, 1993); (Shi, 2013); (Wellinger, 1999).

En conditions psychrophiles en revanche, les rendements rapportés sont plus faibles : 30% en moins pour les fumiers de bovins et 22% en moins pour les boues de station d'épuration (Wellinger, 1999).

Travailler en **conditions thermophiles permet d'augmenter les cinétiques** de production de méthane par **rapport aux conditions psychrophiles et mésophiles**.

Ainsi, le temps de séjour des solides peut être raccourci (Kothari, 2014) ; (Wellinger, 1999) et le volume de digesteur diminué (Bouallagui, 2004); (Kothari, 2014)

Ces conditions permettent également de favoriser l'étape d'hydrolyse (Bouallagui, 2004) qui peut toutefois être à l'origine d'une accumulation d'AGV et inhiber le système s'il n'est pas bien contrôlé (Shi, 2013).

Etape thermique	Températures de processus	Temps de séjour minimum
Psychrophile	< 20 °C	70 à 80 jours
Mésophile	30 à 42 °C	30 à 40 jours
Thermophile	43 à 55 °C	15 à 20 jours

Tableau 1: Gammes de températures permettent la mise en œuvre du processus de digestion anaérobie.

f) Le pH

A chaque étape de la digestion anaérobie correspond un pH optimal de fonctionnement pour les microorganismes impliqués.

Les étapes d'hydrolyse et d'acidogénèse montrent de meilleures performances à des pH compris entre 5,5 et 6,5 (Jha, 2011) ; (Kothari, 2014).

L'acétogénèse a un pH de fonctionnement alcalin compris entre 8 et 11 et avec une production maximale d'acétate à pH 8 selon (Nie, 2007)

La dernière étape (la méthanogénèse) trouve son optimum autour de la neutralité. Plusieurs gammes de pH sont citées dans la littérature qui sont très proches les unes des autres : (Jha, 2011) parlent d'un pH compris entre 6,8 et 7,6 alors que (Ward, 2008) mentionnent un pH de 6,5 à 8,5.

Le pH optimal de la méthanisation se situe donc entre 6,5 et 8,5 (Bernet, 2008).

Ces valeurs de pH sont à mettre en relation avec la présence de certains composés chimiques potentiellement inhibiteurs.

Un pH alcalin par exemple favorisera la formation d'ammoniac sous forme de NH_3 , qui est l'un des principaux composés inhibiteurs de la digestion anaérobie (Chen, 2008).

A l'inverse, les pH faibles conduisent à la formation de sulfure d'hydrogène (H_2S), également inhibiteur de la réaction (Bernet, 2008).

g) Les co-facteurs

Les micro-organismes de la digestion anaérobie utilisent la matière organique comme source de carbone et d'énergie mais ont cependant besoin d'autres éléments pour se développer. Ceux-ci sont des macroéléments, comme l'azote et le phosphore, et des microéléments, comme le fer, le nickel, le zinc, le magnésium, le calcium, le sodium et le cobalt (Bernet, 2008); (GODON, 2008).

Les études actuelles ne permettent pas de donner avec précision les besoins des microorganismes concernant ces éléments, mais une carence peut causer un dysfonctionnement de la digestion.

iii. Les principaux inhibiteurs

L'équilibre physico-chimique d'un réacteur de méthanisation dépend d'un grand nombre de facteurs. Chaque déséquilibre entraîne l'accumulation de différents composés inhibiteurs et un potentiel dysfonctionnement de la chaîne trophique.

i) Les acides gras volatils

Les acides gras volatils (AGV) sont des intermédiaires réactionnels de la réaction de méthanisation dont la concentration influe sur le pH des digesteurs. Parmi tous les AGV, l'acide propénoïque est considéré comme le plus toxique pour la digestion anaérobie (Hanaki, 1994) et agit principalement sur l'étape d'hydrolyse (Jha, 2011).

ii) L'ammoniac

Lors de la digestion anaérobie, l'ammoniac (NH_3) est principalement produit par dégradation de la matière organique azotée, comme les protéines ou l'urée (Chen, 2008).

Pour des pH inférieurs à 9,2, on le trouve majoritairement sous sa forme ionisée, l'ammonium (NH_4^+). La membrane des microorganismes étant perméable au NH_3 , cette forme est la plus inhibitrice (de Baere, 1984), agissant directement sur le pH intracellulaire et sur certaines réactions enzymatiques (Wittmann, 1995)

iii) le sulfure d'hydrogène

Le sulfure d'hydrogène (H_2S) est la forme protonée de l'ion sulfure (S^{2-}), lui-même produit à partir des formes oxydées du soufre (sulfate (SO_4^{2-}), sulfure (SO_3^{2-}) ou thiosulfate ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$) lors de la digestion anaérobie. Ce gaz soluble dans l'eau, **à l'odeur caractéristique « d'œuf pourri », est mortel pour l'homme** à des concentrations supérieures à 700 ppm dans l'atmosphère.

Lors de la dégradation de matière organique, la réduction des formes oxydées du soufre est réalisée par des Bactéries Sulfato-Réductrices (BSR). Ces derniers participent également à la dégradation des AGV, de l'éthanol et de l'hydrogène, entrant ainsi en compétition avec les acétogènes microorganismes et méthanogènes (GODON, 2008).

Cette compétition peut entraîner une pénurie d'intermédiaires réactionnels et un dysfonctionnement de la chaîne trophique, allant jusqu'à l'arrêt de production de méthane (Harada, 1994).

1.4 Les différents types de technologies utilisés dans la méthanisation

iv. Technologie en voie sèche discontinuée

Pour les gisements à dégrader dont la teneur en matière sèche est supérieure à 15%

h) A. Les spécificités de la digestion anaérobie par voie sèche

Les conditions décrites dans la partie précédente s'appliquent quel que soit le procédé de méthanisation utilisé.

Cependant, d'autres paramètres, tels que le ratio C/N, le taux d'humidité, l'inoculation ou la taille des particules, influencent le déroulement du processus de digestion anaérobie.

Chacune des voies solide ou liquide possède ses propres spécificités concernant ces derniers.

i. Le ratio Carbone Azote C/N

Le ratio C/N donne une indication sur l'équilibre nutritif des substrats à valoriser. Le carbone sera utilisé par les microorganismes comme source d'énergie et l'azote est un nutriment essentiel pour le développement de ces mêmes microorganismes.

Si la quantité d'azote est trop faible, la croissance des microorganismes sera ralentie, la dégradation de la matière organique sera freinée et le rendement en méthane amoindri.

Dans le cas contraire, une concentration en azote trop élevée peut conduire à une accumulation d'azote ammoniacal, toxique pour les microorganismes

Plusieurs auteurs s'accordent à donner un ratio optimal compris entre 20 et 30 (Jha, 2011); (Kothari, 2014); (Wang, 2014). (Hills, 1979) **Préconise un ratio de 25 pour la digestion de fumiers de vaches laitières.**

L'efficacité du ratio C/N est également dépendante du procédé mis en œuvre. (Wang, 2014) Ils ont montré **que le ratio C/N optimal était corrélé à la température.**

Pour un même mélange de fumiers de bovins, de fientes de volailles et de paille de riz, les ratios **C/N optimum étaient de 26 et 31 en conditions mésophiles (35°C) et thermophiles (55°C)** respectivement.

L'augmentation de la température accélère la dégradation et la solubilisation de l'azote organique, qui doit être contrebalancée par un ajout de carbone pour éviter l'inhibition de la digestion anaérobie.

ii. Le taux d'humidité

Pour être assimilés par les microorganismes, les nutriments doivent être dissous dans une phase aqueuse, faisant de l'eau un élément essentiel au bon fonctionnement de la digestion anaérobie (Lay, 1997).

De ce fait, **augmenter le taux d'humidité permet d'augmenter le taux de croissance des microorganismes** (Pommier, 2007), et en particulier des méthanogènes (Lay, 1997). La

biodégradation de la matière organique se trouve accélérée et les rendements de méthane améliorés (Pohland, 1975)

Du point de vue physique, un taux d'humidité trop faible peut causer des problèmes d'accessibilité de la matière (organique, métabolites et nutriments) et de transfert de masse (Abbassi-Guendouz, et al., 2012); (Pommier, 2007); (Yang, 2015).

iii. L'inoculation

L'inoculation d'un réacteur de méthanisation permet d'introduire l'ensemble des microorganismes responsables de la digestion anaérobie dans le substrat, et en particulier les microorganismes méthanogènes actifs.

La présence de ces dernières permet d'éviter une inhibition due à une acidogenèse trop importante et une accumulation d'AGV (Chugh, 1998).

Elle se fait le plus souvent par l'ajout d'un digestat (liquide ou solide) au substrat brut à dégrader (Ward, 2008); (Xu, 2013).

iv. La taille des particules

Le broyage des substrats est un prétraitement souvent utilisé sur les unités de méthanisation à grande échelle (Barakat, 2013). Il permet d'améliorer le rendement de biogaz et d'accélérer la dégradation de la matière organique en facilitant la solubilisation des intermédiaires réactionnels, en augmentant la surface d'échange avec les microorganismes et en facilitant l'homogénéisation du substrat (Sharma, 1988); (Silva, 2011); (Yang, 2015).

v. La voie humide

La voie humide est principalement réservée aux effluents avec des taux de matières sèches inférieurs à 20% (boues, lisiers, graisses). Elle est **plus répandue que la voie sèche au niveau industriel et agricole.**

Les effluents sont généralement amenés dans les silos par des pompes ou des trémies agricoles puis brassés afin d'homogénéiser le mélange et éviter la formation de blocs.

Le digesteur est constitué d'une grande cuve contenant l'ensemble des intrants et qui agit sur eux comme un estomac. Il possède au minimum un mélangeur et également un bloc de chauffage qui sert à maintenir le mélange à la température optimale de digestion. Quant à la partie supérieure, elle est en forme de dôme pour stocker le gaz. Le schéma de principe simplifié est identique à celui de la figure suivante.

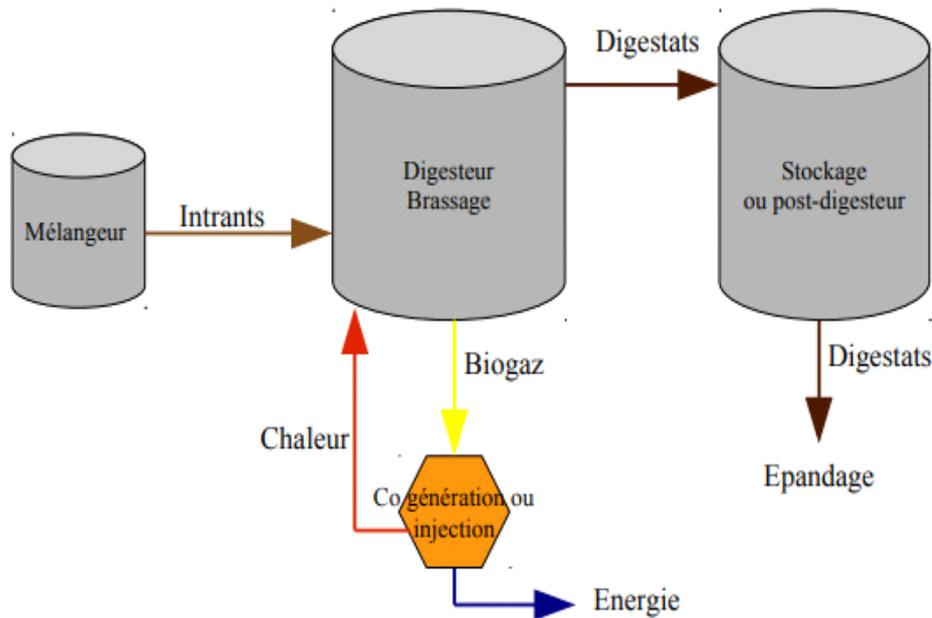


Figure 4: Schéma simplifié de processus de la digestion anaérobie

1.5 Différents systèmes de digesteurs

D'une manière générale, les digesteurs comprennent :

- Le réservoir de digestion, isolé thermiquement.
- Un système de chauffage.
- Des systèmes de mélange et des systèmes de décharge pour les sédiments et le substrat épuisé.

Le choix du type de réacteur à considérer dans un processus de digestion anaérobie dépend non seulement des caractéristiques de la charge à traiter (notamment de sa teneur en solide) mais aussi des contraintes technico-économiques relatives à la mise en œuvre de l'installation.

vi. Les exigences d'une installation de digesteur

Quelle que soit la conception choisie, le digesteur (ou cuve de fermentation) doit répondre aux exigences suivantes :

i) Étanchéité à l'eau / au gaz

Étanchéité afin de prévenir les infiltrations et la menace qui en résulte pour la qualité du sol et de la nappe phréatique ; l'étanchéité au gaz afin de garantir le confinement correct de la totalité du rendement en biogaz et d'empêcher l'air d'entrer dans le digesteur (ce qui pourrait entraîner la formation d'un mélange explosif).

j) . *Isolation*

Si et dans quelle mesure dépend de la température de processus requise, du climat local et des moyens financiers ; La perte de chaleur doit être minimisée si les températures extérieures sont basses.

k) *Surface minimale*

Minimiser les coûts de construction et réduire les pertes de chaleur à travers les parois. Une structure sphérique présente le meilleur rapport volume / surface. Pour une construction pratique, une construction hémisphérique avec un sol conique est proche de l'optimum.

l) *Stabilité structurelle*

Suffisante pour résister à toutes les charges statiques et dynamiques, durable et résistante à la corrosion.

m) *La taille du digesteur*

La quantité de fumier introduite dans un digesteur chaque jour a un effet important sur son fonctionnement. Ceci est mesuré par le volume ajouté par rapport au volume du digesteur, mais la quantité réelle introduite dans le digesteur dépend également de la température à laquelle le digesteur est maintenu. Afin de déterminer la taille d'une unité de biogaz, l'équation mathématique suivante doit être réalisée :

$$\text{Taille du digesteur (m}^3\text{)} = \text{apport journalier (m}^3 \cdot \text{Jour}^{-1}\text{)} \times \text{temps de rétention (jour)}$$

vii. *Digesteur Lit de boues expansées*

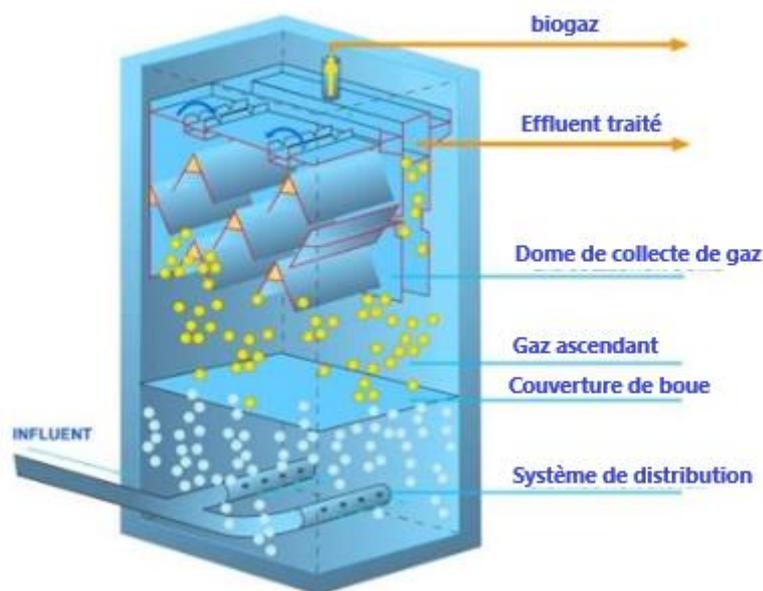


Figure 5:Schéma montrant le processus de Lit de boues expansées

(Biogaz world , 2019)

Le processus de lit de boues expansées (UASB : Upflow Anaerobic Sludge Blanket) est une méthode fréquemment utilisée pour le traitement biologique d'effluents industriels.

Le succès du bioréacteur est fondé sur ce que l'on appelle le séparateur à trois phases. Il permet au réacteur de séparer le gaz, l'eau et les mélanges de boues moyennant des conditions de turbulence élevée. Par conséquent, des concepts compacts sont possibles.

La technologie UASB brevetée est dotée de capots de dégagement multiples des gaz pour la séparation du biogaz. Par conséquent, les interfaces gaz/eau extrêmement larges réduisent considérablement la turbulence. (paques , s.d.).

viii. *Digesteur « lagon couvert » « Covered Lagoon Digester »*

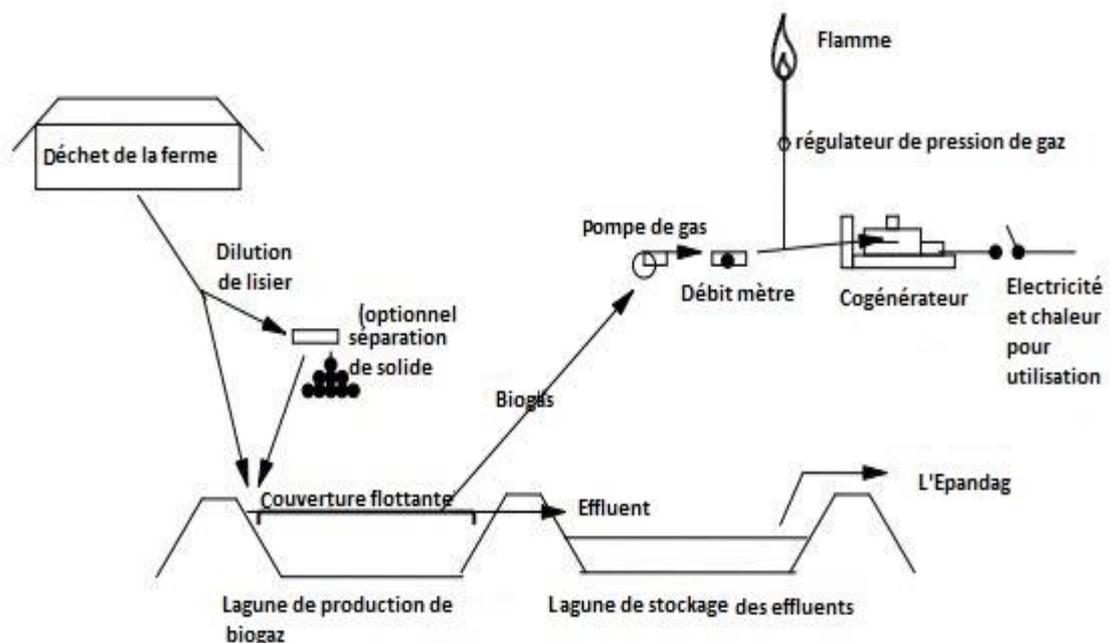


Figure 6: Composants du système de lagon couvert

(Krich, et al., 2005)

Ce type de digesteur produit du biogaz à température ambiante à base de lisier dilué contenant moi de 2% de matière sèche, pour piéger le biogaz une couverture imperméable flotte sur le top de la lagune qui contient du lisier.

Ce type de digesteur est utilisé dans les zones chaudes. L'arrangement le plus réussi inclue deux lagunes connectées, séparant le traitement biologique pour la production de biogaz, et le stockage de digestat pour l'épandage. Ce système est constitué de :

- Séparateur de solide
- Un ou deux lagunes
- Couverture de lagune flottante
- Système de traitement de biogaz

ix. Digesteur à lit fixe et à lit fluidisé

Les réacteurs à lit fixe contiennent un support fixe sur lequel la biomasse se fixe et se développe. Les supports sont inertes et présentent différentes formes géométriques (granules, grille...).

Les digesteurs à lit fluidisé sont caractérisés par une importante mobilité des supports ce qui assure une bonne homogénéité du milieu réactionnel, assure un bon transfert à l'interface entre le liquide et le biofilm et limite le risque de colmatage. Ce type de réacteur est particulièrement robuste aux surcharges organiques comparé au réacteur infiniment mélangé. (M, 2013)

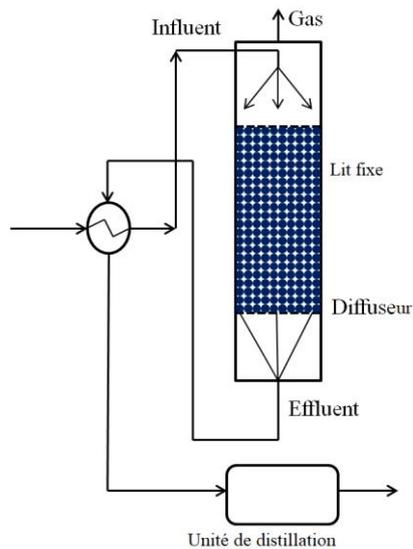


Figure 7:schéma montrant le fonctionnement d'un digesteur à lit fluidisé

x. *Digesteur à circulation*

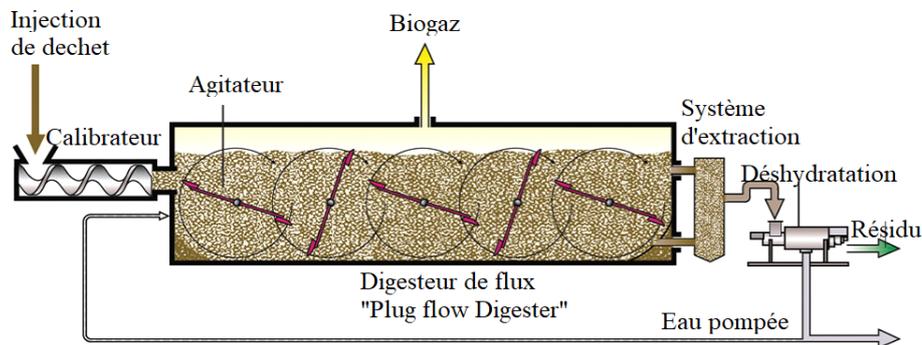


Figure 8: Conception typique d'un digesteur à Circulation

(Waste Treatment by Dry Digestion, s.d.)

Réservoir long et étroit, généralement chauffé et souterrain, avec couvercle de collecte des gaz imperméable. Le contenu se déplace dans le digesteur à mesure que du nouveau fumier est ajouté. Les systèmes plug-flow modifiés peuvent utiliser des techniques de mélange vertical.

xi. *Digesteur mixe complet « Complete Mix Digester »*

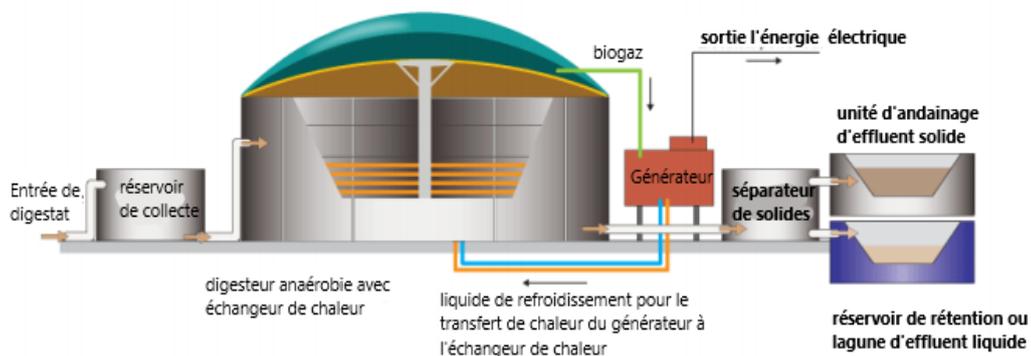
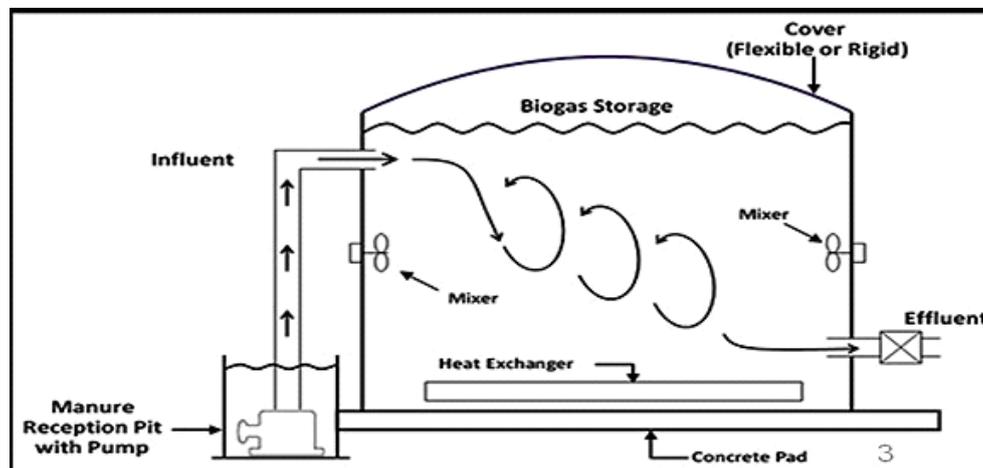


Figure 9: Conception typique du digesteur mixe complet (Viswa , Mattsson, & Karlsson, 2013)

Réservoir chauffé ou non chauffé au-dessus ou au-dessous du sol avec couvercle de collecte des gaz imperméable. Contenu mélangé par moteur ou pompe. Les digesteurs à mélange complet fonctionnent mieux quand il y a une certaine dilution du fumier excrété avec de l'eau (par exemple, les eaux usées de laiterie); le fumier doit être manipulé avec du lisier (figureN°10). (agstar, 2011)

10:



Figure

schéma montrant le fonctionnement du digesteur mixe complet (Hanif, 2013)

1.6 Les différents matériaux utilisés dans la construction d'un digesteur

Dans les pays industrialisés, la plupart des nouveaux digesteurs sont construits en béton ou en acier étanche aux gaz. Des additifs sont mélangés au béton pour le rendre étanche aux gaz.

xii. Acier

L'acier est intrinsèquement étanche aux gaz, a une bonne résistance à la traction et il est relativement facile à construire (par soudage). La susceptibilité à la corrosion à la fois à l'extérieur (humidité atmosphérique) et à l'intérieur (milieux agressifs) peut être un problème grave. En règle générale, un type de revêtement anticorrosion doit être appliqué et contrôlé à intervalles réguliers.

xiii. Le béton

Le béton a été largement accepté ces dernières années. L'étanchéité aux gaz requise nécessite une construction soignée et l'utilisation de revêtements, de doublures et / ou de bandes d'étanchéité étanches aux gaz afin de prévenir les fuites de gaz. Les fissures de contrainte au niveau des articulations du haut et des côtés sont les plus courantes. Le principal avantage dans l'utilisation du béton réside dans la durée de vie pratiquement illimitée et la construction relativement peu coûteuse. Cela est particulièrement vrai pour les grands digesteurs dans les pays industrialisés.

1.7 Comparaison entre les digesteurs

<i>Type de digesteur</i>	<i>Difficulté De Construction</i>	<i>Type De Substrat</i>	<i>Rendement et efficacité</i>
<i>1. Digesteur lit de boues expansées</i>	<i>Difficile</i>	<i>Liquide</i>	<i>Fort</i>
<i>2. Lagune couverte</i>	<i>Facile</i>	<i>Liquide</i>	<i>Moyen</i>
<i>3. Digesteur à lit fixe et à lit fluidisé</i>	<i>Moyen</i>	<i>Liquide</i>	<i>Moyen</i>
<i>4. Digesteur à circulation</i>	<i>Facile</i>	<i>Liquide /solide</i>	<i>Faible</i>
<i>5. digesteur mixe complet</i>	<i>Facile</i>	<i>Liquide/Solide</i>	<i>Moyen</i>

Tableau 2: comparaison entre les différents types de digesteurs

1.8 Valorisation du biogaz

Le biogaz peut être utilisé selon plusieurs modes de valorisation. On distingue trois filières :

- *Energie thermique
- *Energie électrique
- *Biocarburant

xiv. Valorisation thermique

La chaleur de combustion du biogaz peut servir pour la production d'eau chaude, de vapeur à moyenne ou haute pression, ou bien dans des fours de procédés.

La pression nécessaire pour l'alimentation des appareils au gaz est généralement faible : 20 à 100 mbar.

D'une manière générale, les valorisations thermiques nécessitent des débouchés de proximité : il peut s'agir de consommateurs externes au site de production (industries, réseau de chaleur...) ou d'usages internes. Sur les stations d'épuration, une partie du biogaz produit est en général utilisé pour maintenir le digesteur à la température de fermentation (37 ou 55 °C,

mésophile ou thermophile). Cette consommation interne du procédé représente environ 15 à 30% de la production.

xv. Valorisation électrique (avec ou sans cogénération)

Le biogaz peut alimenter un moteur à gaz (ou une turbine), qui produit de l'électricité. Lorsque l'électricité est produite seule, celle-ci est le plus souvent exportée via le réseau public.

La cogénération produit de l'électricité et de la chaleur. La chaleur peut être utilisée pour le chauffage des digesteurs et le reste peut servir à tout autre usages : séchage du digestat, séchage de foin, production d'eau chaude, alimentation d'un chauffage domestique.

Dans le cas de la solution " moteur à biogaz ", il nécessitera en principe une désulfuration et une déshydratation, dont les performances dépendront des spécifications des motoristes.

Dans le cas de la solution turbine à vapeur, on peut se contenter d'un traitement par simple filtre dévésiculeur à l'entrée du compresseur, de façon à enlever les particules en suspension dans le biogaz. La chaudière sera munie de tubes de fumée dont le matériau pourra résister aux fumées de biogaz, éventuellement à forte teneur en dioxyde de soufre, chlorures ou fluorures.

xvi. Le biogaz carburant

Assez répandue en Suède, le biométhane carburant est la version renouvelable du GNV (Gaz Naturel pour Véhicules).

Si le bioGNV et le GNV (GNC* + GNL*), tous deux constitués en majorité de méthane, apparaissent actuellement comme la solution la plus écologique pour les transports, le biogaz peut être transformé en biométhane pour alimenter un réseau de distribution de gaz naturel ou des véhicules.

En effet, le biogaz, une fois épuré de son CO₂, de son eau et de son hydrogène sulfuré H₂S est quasiment identique au méthane comprimé ou Gaz Naturel pour Véhicule (GNV). L'autonomie est réduite mais les polluants atmosphériques rejetés sont faibles avec un bruit limité, ce qui en fait un carburant idéal pour les transports urbains. ; son intérêt est à la fois économique et environnemental, compte tenu de la qualité des rejets des moteurs à gaz.

1.9 Propriétés du biogaz

Le biogaz est principalement constitué de méthane combustible et de gaz carbonique inerte. D'autres gaz peuvent venir s'ajouter de façon minoritaire dans la composition du biogaz : hydrogène, sulfure d'hydrogène (H₂S).

La teneur de ces gaz dépend étroitement du déchet traité et du degré d'avancement de la méthanisation.

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de l'unité de quantité de combustible.

Le PCI est le pouvoir calorifique inférieur lorsque l'eau produite par cette combustion reste à l'état de vapeur. Le PCI du méthane à 0°C à pression atmosphérique est de 9,94 kWh/m³. Pour le biogaz, le PCI sera proportionnel à sa teneur en méthane (par exemple, pour un biogaz contenant 70% de méthane, le PCI sera de $9,94 \times 0,7 = 6,96$ kWh/m³). (FREDERIC, s.d.)

- ❖ Méthane (CH₄) : Proportion (50% - 80 %)
- ❖ Dioxyde de carbone (CO₂) : Proportion (20% - 50%)
- ❖ Hydrogène sulfuré (H₂S) : Proportion (0% - 0,5%)

1.10. Conditions de valorisation du biogaz

La saturation en eau du biogaz ainsi que la présence de CO₂ et de H₂S éventuel sont susceptibles de rendre le biogaz corrosif. Le transport du biogaz s'effectue ainsi généralement par des canalisations en polyéthylène haute densité ou en inox 316.

En amont de sa valorisation, le biogaz doit a minima inclure une étape de condensation de la vapeur d'eau. La désulfuration du biogaz par ajout oxydation (chimique ou biologique) est également une étape courante d'épuration.

Pour des valorisations plus poussées de type biocarburant ou injection dans un réseau de distribution du gaz, une épuration plus importante (élimination du CO₂ par décarbonatation par exemple) est nécessaire afin de rendre la composition du gaz conforme et proche de celle du gaz naturel.

2 Problématique

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressés à une ferme sise à EL AFFROUN :

- ✓ D'une Capacité De Plus De 100 Vaches Laitières,
- ✓ Une Administration A 2 Etages,
- ✓ Une Salle De Traite,
- ✓ Une Petite Usine De Fabrication De Lait,
- ✓ Ainsi Qu'un Terrain Agricole.

Ladite ferme rencontre un certain nombre de problèmes à savoir :

- ✓ Une forte demande en gaz, ressource dont elle est privée de par sa localisation, la poussant à recourir à l'électricité,
- ✓ Un besoin de diminution des nuisances olfactives compte-tenu du voisinage.

Afin de répondre aux problématiques rencontrées par le fermier, nous nous sommes d'abord demandé quel serait la technologie pouvant éventuellement résoudre les deux problématiques du fermier avec une seule solution ?

Notre hypothèse principale étant l'élaboration d'une unité de méthanisation permettant de répondre aux besoins de production énergétique gazière tout en valorisant les déchets organiques des vaches, réduisant de facto, les nuisances olfactives.

S'il s'avère que la mise en place d'un digesteur s'avère le meilleur moyen de résoudre les problématiques du fermier, quel type de digesteur serait le plus à-même de donner les meilleures performances, et comment réussir son déploiement ?

C'est ce à quoi nous tenterons d'apporter des éléments de réponse tout au long du présent travail de recherche.

3 L'interface

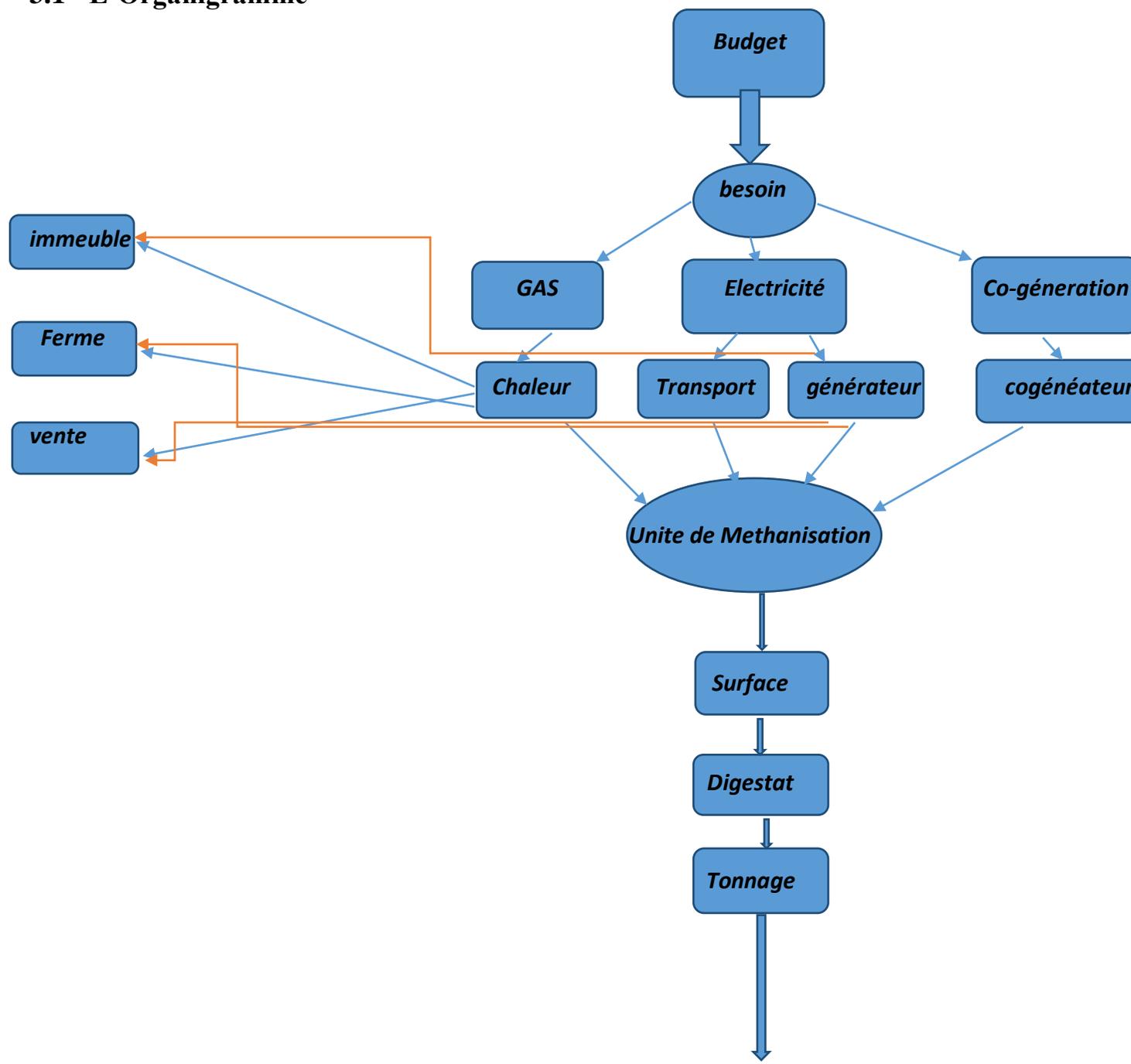
Pour des raisons Technico-Economique, on a opté pour la réalisation d'un logiciel ainsi qu'une application web pour faciliter l'étude de la faisabilité et l'estimation approximative d'une unité de méthanisation. C'est un outil d'aide à la décision. Il permettra :

- ✓ L'évaluation des besoins et attentes du fermier
- ✓ Choix technique de l'installation de génération d'énergie en tenant compte de plusieurs paramètres dont le budget du fermier
- ✓ Calculer la facture du projet

On retrouve le mode d'emploi du logiciel ASF TOOLS et l'application web ASF digital dans ce qui suit :

NB : les numéros pour le logiciel (1. 2. 3. etc) les lettres pour l'application web (A. B.C..etc)

3.1 L'Organigramme



Echantillon

	<i>Matière sèche</i>	<i>M.V /M.S</i>	<i>Nm³CH₄/M.V</i>	<i>%CH₄</i>
<i>Lisier</i>				
<i>Fumier</i>				
<i>Déchet de poulet</i>				
<i>Déchet vert</i>				
<i>Déchet de fruit</i>				
<i>Déchet de céréale</i>				
<i>Autre</i>				
<i>Total</i>				

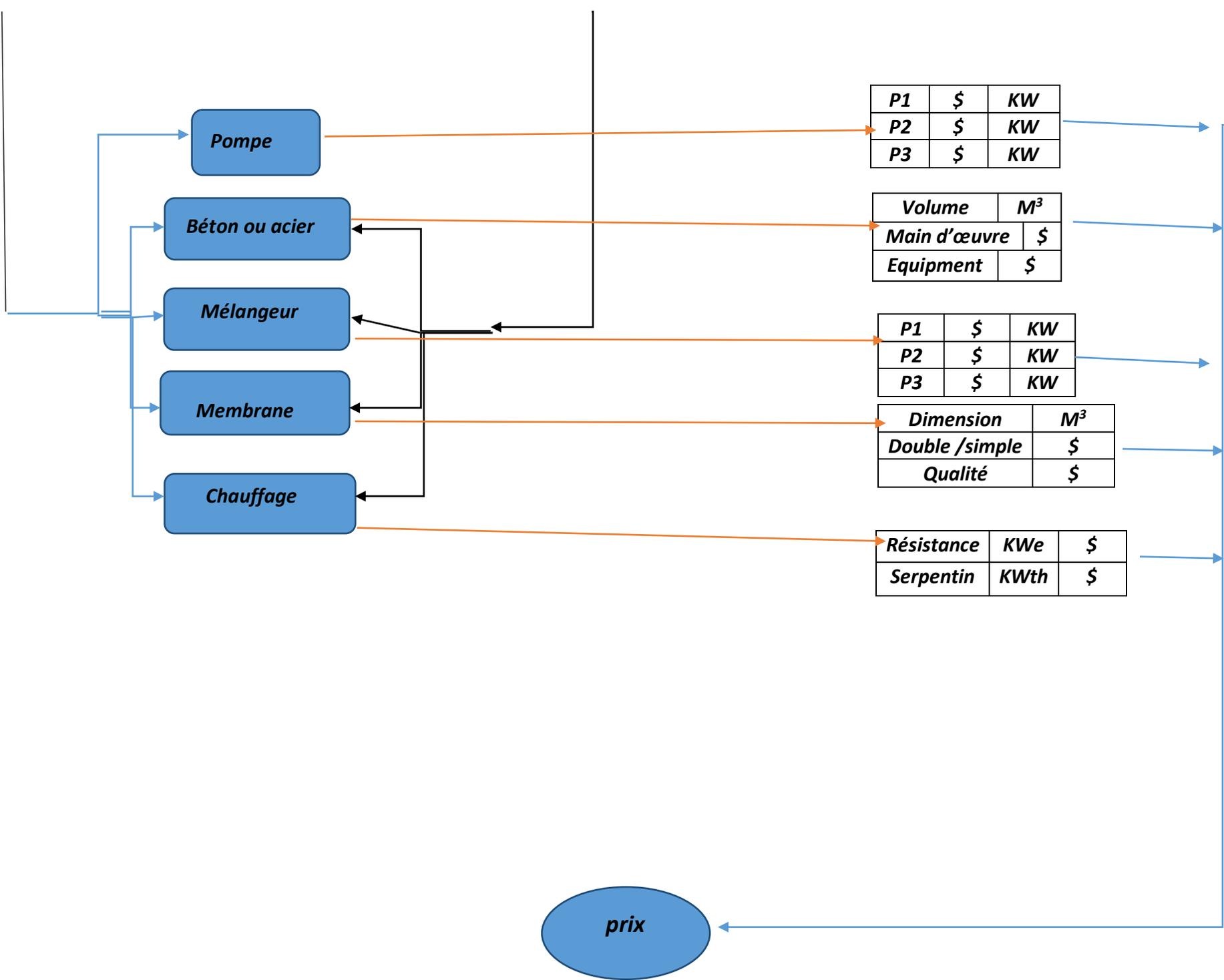
Digester
If M.S < 15

Voie humide

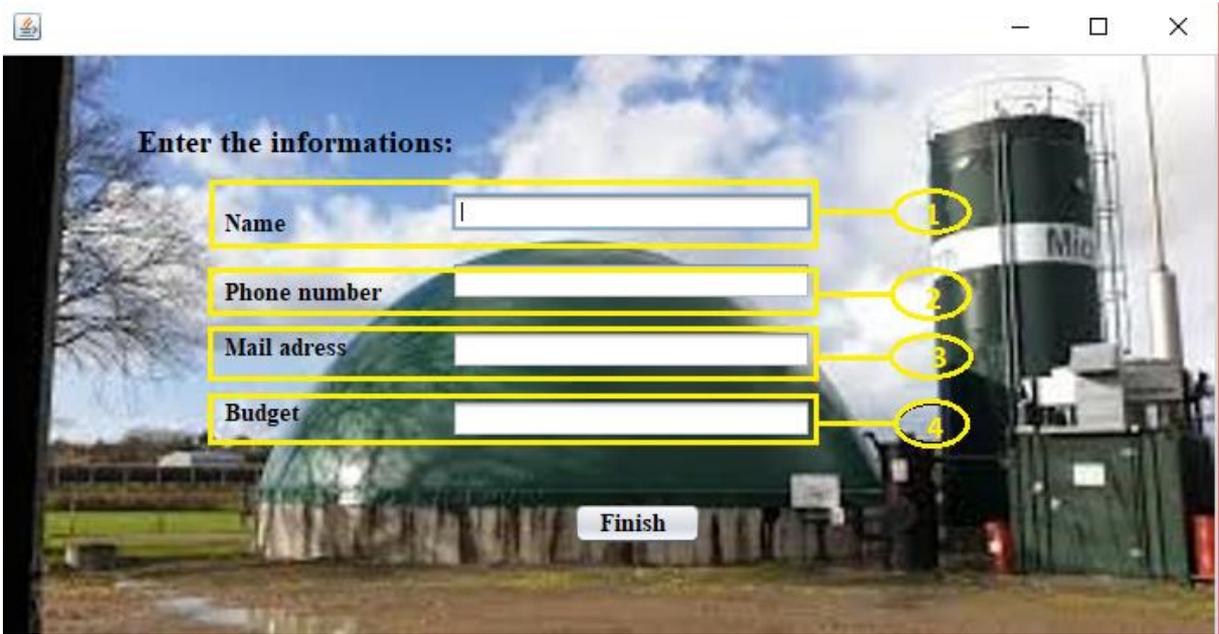
voie sèche

Digester mixte complet

digesteur à circulation

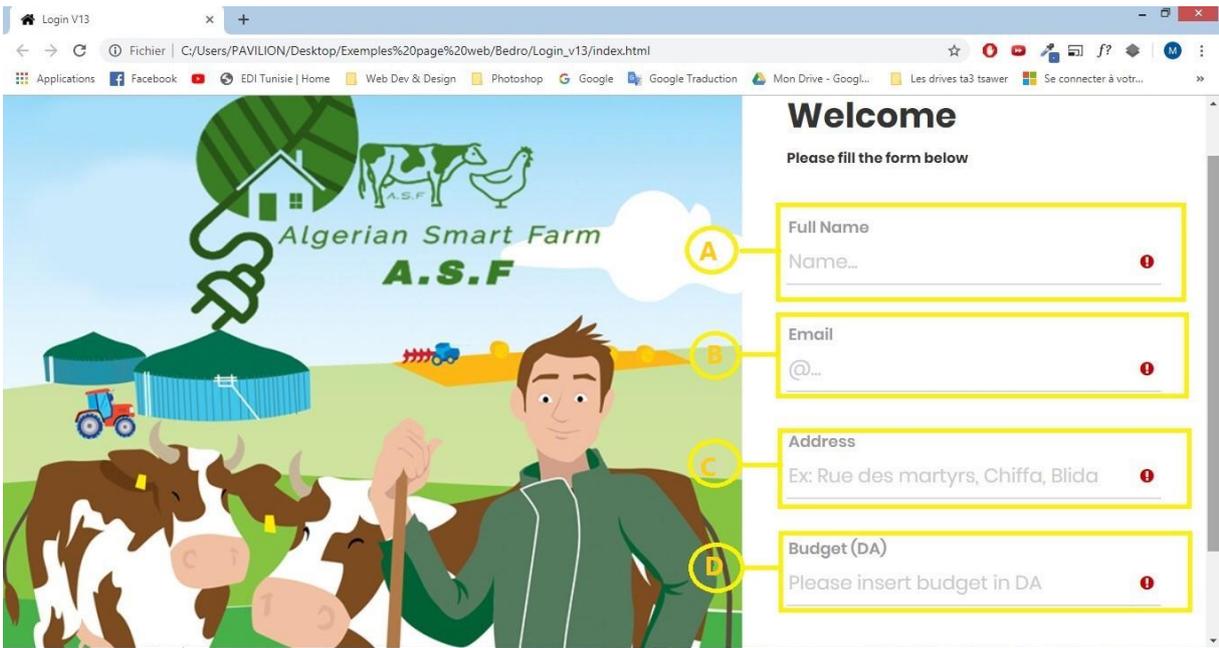


3.2 L'interface



The screenshot shows a web-based registration form titled "Enter the informations:". The form is overlaid on a background image of a farm with a large green silo. The form contains four input fields, each highlighted with a yellow box and a corresponding number in a yellow circle: 1. Name, 2. Phone number, 3. Mail address, and 4. Budget. Below the input fields is a "Finish" button.

Figure 11: Fenêtre N° 01 du logiciel ASF TOOLS



The screenshot shows a web browser window displaying the login page of the ASF digital application. The page features a colorful illustration of a farmer with cows and a tractor. The text "Algerian Smart Farm A.S.F." is visible. On the right side, there is a "Welcome" section with the instruction "Please fill the form below". The form contains four input fields, each highlighted with a yellow box and a corresponding letter in a yellow circle: A. Full Name (Name...), B. Email (@...), C. Address (Ex: Rue des martyrs, Chiffa, Blida), and D. Budget (DA) (Please insert budget in DA). Each input field has a red exclamation mark icon indicating a required field.

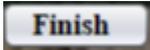
Figure 12: Fenêtre N°01' de l'application web ASF digital

Cette première fenêtre consiste à collecter les informations concernant le **CLIENT**

Cette première fenêtre est constituée de quatre cases à remplir obligatoirement :

1. &A. Name : le client est prié d'introduire le nom complet pour l'identification.

2. **&B.** Phone Number : le client est prié d'ajouter son numéro de téléphone pour faciliter le contact.
3. **&C.** Adress : le client est prié de remplir l'adresse de sa future installation de l'unité de méthanisation, pour le déplacement des ingénieurs.
4. **&D.** Budget : il est nécessaire d'introduire le montant disponible du client pour son installation, à fin d'étudier la faisabilité de la réalisation du projet.

➤ Une fois les informations introduites on clique sur le bouton  Pour passer à la deuxième fenêtre.

The screenshot shows a software window with a title bar containing three tabs: 'Gaz', 'Electricity', and 'Co-generation'. The 'Electricity' tab is selected. Below the tabs is a blue banner with the text 'Please check your needs'. The main content area contains two sections: 'Heat:' with three checkboxes labeled 'Building', 'Farm', and 'Sale'; and 'Transport:' with one checkbox labeled 'Gaz vehicule'. A 'Validate' button is located to the right of the 'Heat:' section. At the bottom of the form is a button labeled 'Click to pass to the next step'. Numbered callouts (5-10) highlight various elements: 5 points to the window icon, 6 to the 'Electricity' tab, 7 to the 'Co-generation' tab, 8 to the 'Heat:' section, 9 to the 'Transport:' section, and 10 to the 'Click to pass to the next step' button.

Figure 13:Fenêtre N°02 du ASF

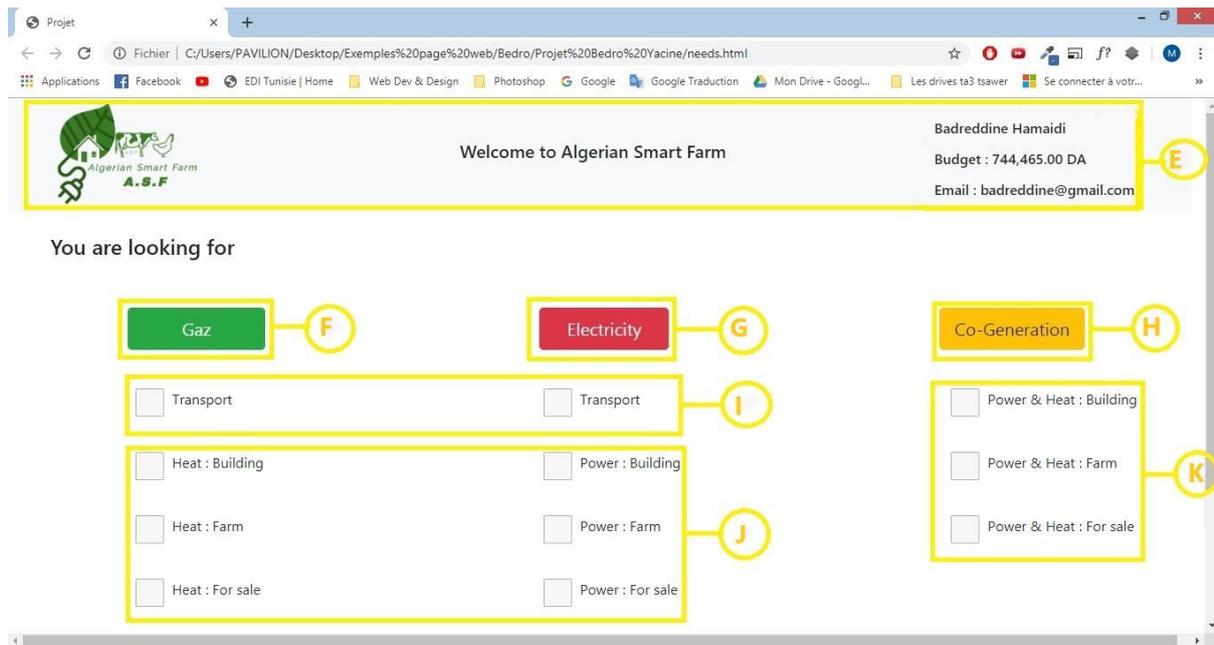


Figure 14: Fenêtre N°02' de l'application web

Cette deuxième fenêtre concerne les besoins énergétiques du client est constituée de trois parties :

5. **&F.** Gaz : on clique sur le bouton Si le client a besoin d'une unité de méthanisation uniquement pour avoir du gaz.

6. **&G.** Electricity : on clique sur le bouton si le client a besoin de l'électricité.

7. **&H.** Co-generation : On clique sur le bouton besoin de l'électricité ainsi que du chauffage.

8. **J.& K.** Heat : dans cette partie, le client indiquera l'utilisation du chauffage, pour avoir une étude déperdition thermique en plus. Si c'est pour une maison, une administration ou un immeuble, on coche la cellule **Building** Heat : Building Si c'est pour une ferme on coche, **Farm**

Heat : Farm si c'est pour la vendre on coche aussi **Sale** Heat : For sale

9. **&I**.Transport : le client pourra utiliser le gaz come GNV pour ces véhicule dans ce cas on coche la cellule, **Gaz vehicle** Transport ou l'électricité pour recharger les batteries de ces véhicules si marchent en électricité dans ce cas on coche la cellule. **Electric vehicle**

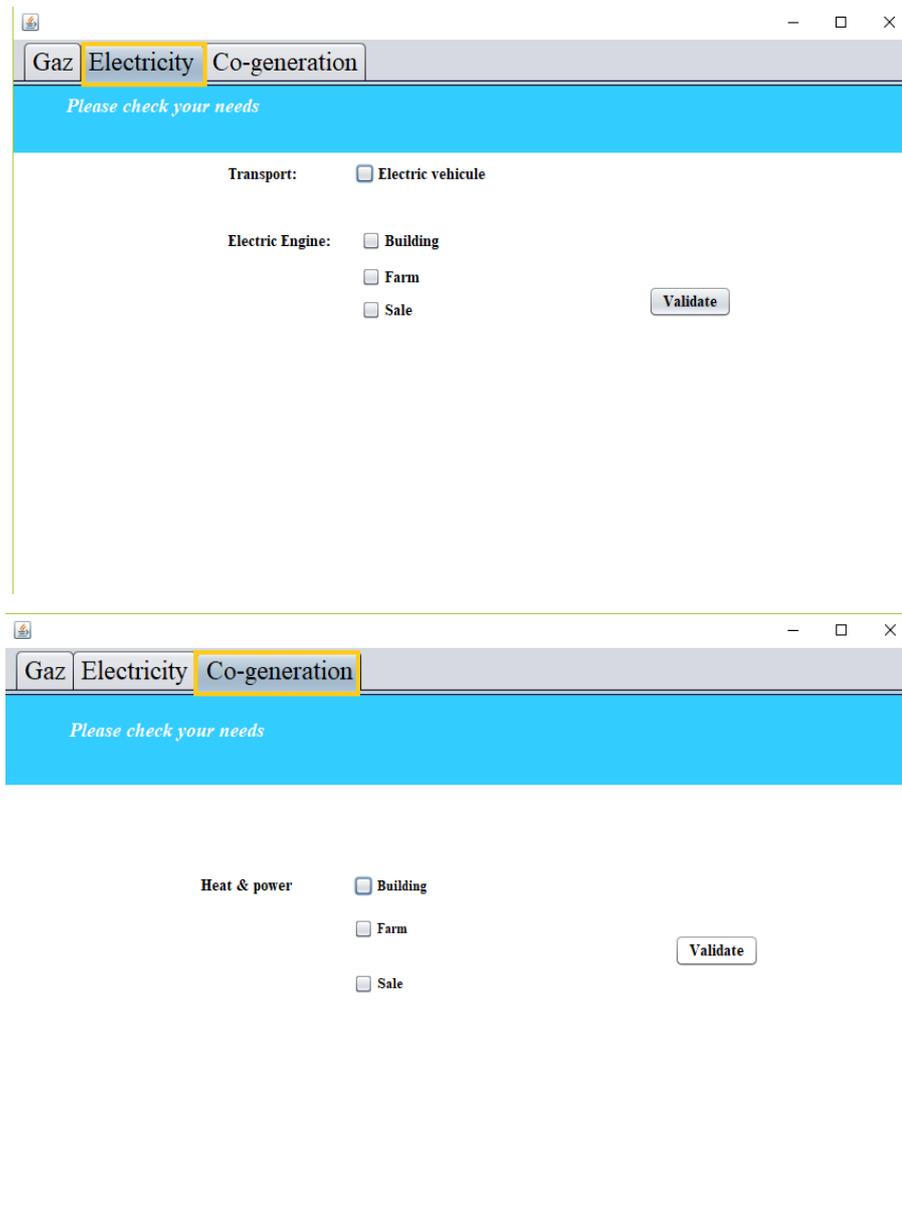


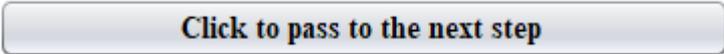
Figure 15: fenêtre n°02 de l'ASF Tools

10. PS : on a les mêmes besoins pour la parties Gaz et Electricity, une fois choisi, l'application reconnaitra le chemin suivi.

Une fois terminer on clique sur le bouton



11. Unit Of Methanisation : une fois les étapes précédentes terminées une clique sur le bouton



Pour aller dans les détails de cette installation dans la fenêtre N° 03.

Volume (13)

Enter your pit's height (m): 10 (14)

Enter your pit's surface (m²): 40 (15)

Pit's volume (m³): 400.0 (16) Validate

Digestate (17)

Tonnage (18)

Enter the volume of waste (m³ /day): 10 (19)

Waste's volume (m³): 300.0 (20) Validate

Please fill the information below

	Dry matter %	V.M/D.M	Nm3 CH4/V.M	% CH4
Wet manure	12	78		
Dry manure	5			
Chicken manure	9			
Green waste	0			
Fruit waste	0			
Cereal waste	0			
Other	0			
Total	8.66666...			

(21) Calculate

Next

Figure 16: Fenêtre N°3 du ASF

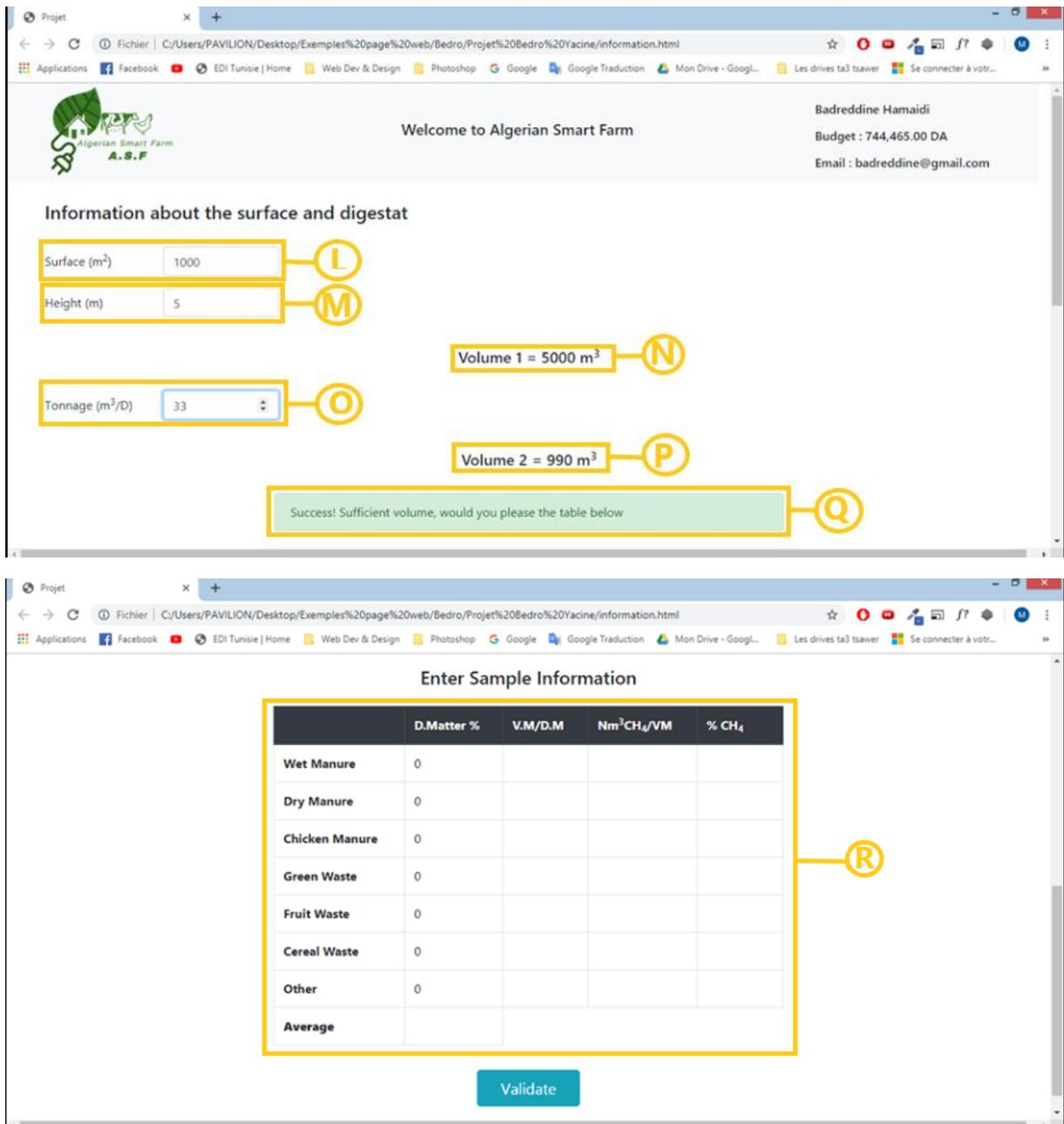


Figure 17: Fenêtre N°03' de l'application web

Une fois affichée, il nous permet d'ajouter les données concernant le volume, le tonnage, ainsi que la qualité et le type de déchet.

13. VOLUME : cette partie contient 3 cases :

14. M. Enter your pit's height : on introduit la profondeur maximale du digesteur en(m)

15.& I. Enter your pit's surface : on introduit la surface maximale destiné à la construction du digesteur.

16.&N. Pit's volume : dans cette partie le logiciel fait le calcul du volume à partir des données précédentes ($V_1 = \text{la surface} \times \text{la profondeur}$), et affiche le volume en m^3 .

Puis on clique sur le bouton pour passer à l'étape prochaine.

17.. Digestat : dans cette partie on introduit le tonnage du digestat ainsi que le type et la qualité, on commence d'abord par :

18. &O. TONNAGE : dans cette étape nous avons une case à remplir :

$$\text{Volume du déchet (m}^3\text{/J)} \times 30\text{J} = \text{Volume total2 (m}^3\text{)}$$

19.&O. : Enter the weight of waste : dans cette case on introduit la quantité de déchet journalière en m^3 . On clique sur le bouton  , juste après l'application calculera le volume nécessaire du digesteur pour avoir un temps de séjour d'au moins 30 jours, en suivant la formule suivante :

Une fois calculé, l'application comparera le volume obtenu dans cette étape avec le volume de l'étape précédente :

Si : $V_2 > V_1$ error : espace insuffisant

Sinon Validé,

Aussi notre application vous offre la possibilité de connaître le type et qualité de déchet via des analyses puis en remplissant le tableau comme suis :

21.&R .

La colonne à gauche contient le type de déchet :

Wet manure
Dry manure
Chicken manure
Green waste
Fruit waste
Cereal waste
Other

- Wet manure : **Lisier**
- Dry manure : **Fumier**
- Chicken manure : **déchets de poulet**
- Green waste : **les déchets vert (tonte, feuille d'arbre... etc)**
- Fruit waste : **les déchets de fruits**
- Other : **autre**

On ce qui concerne la première ligne :

Dry matter	V.M/D.M	Nm³ CH₄/V.M	% CH₄
-------------------	----------------	------------------------------------------	-------------------------

- Dry matter : la matière sèche, cette case est remplie une fois les analyses prêtes (2 h maximum) résultat en % .
- V.M/D.M : volatile matter/ Dry matter >> matière volatile/ matière sèche, cette case est remplie une fois les analyse prêtes.

- $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{V.M}$: connaissant la quantité du méthane produite à fin d'avoir une idée sur la qualité de déchets.
- $\% \text{CH}_4$ / pourcentage du CH_4 par rapport au CO_2 et H_2S

Une fois le tableau rempli on aura un total de toutes les colonnes, en cliquant sur le bouton



L'application compare le total de la matière sèche (moyenne), si elle dépasse les 15% on aura une fenêtre consacrée au digesteur marchant par voie sèche, sinon on aura une fenêtre consacrée au digesteur marchant par voie humide.

Liquid process
Complete Mix Digester

Pump:

- Pump1: Depth: 2m, Power: 5.5KW, Price: 4000€
- Pump2: Depth: 3m, Power: 11KW, Price: 6400€
- Pump3: Depth: 4m, Power: 18KW, Price: 7600€

Blender:

- Blender1: Depth: 4m, Power: 4KW, Price: 7100€
- Blender2: Depth: 6m, Power: 7.5KW, Price: 8681€
- Blender3: Depth: 8m, Power: 18KW, Price: 11750€

Concrete or steel:

- Concrete m² 26
- Steel m² 26

Membrane

- m 27

Heat

- Resistance 28
- Water heater

co-generaator

- 29

Electrical engine

- 30

Figure 18: FenêtreN°04 de l'ASF Tools

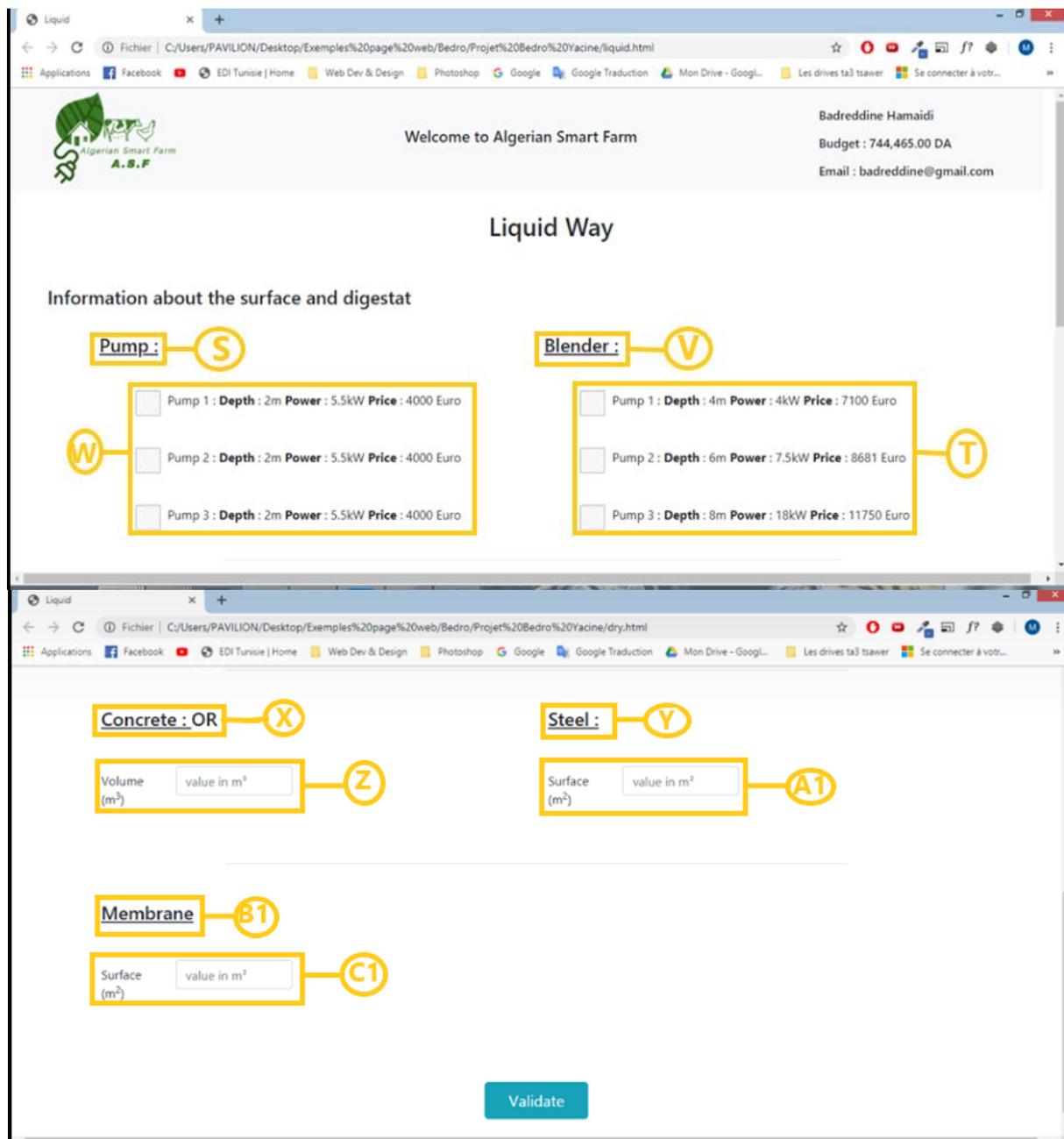


Figure 19: FenêtreN°04' de l'application web ASF digital

23 .liquid process : voie humide, complete mix digester (type de digesteur)

24.& G. Pump : le client doit choisir entre ces trois types de pompes par rapport à la puissance, la profondeur ainsi que le prix. (faible, moyen, fort).

25.& T. BLENDER : Mixeur ou agitateur : le client doit choisir entre ces trois types de mixeurs par rapport à la puissance, la profondeur ainsi que le prix.

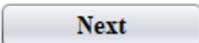
26.& X. concreet or steel : béton ou acier : le client doit choisir entre le béton ou l'acier pour la structure du digesteur.

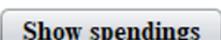
27.& B1. Membrane : on introduit la surface approximative de la membrane à fin d'estimer le prix.

28.Heat : on choisit le type de chauffage pour le digesteur ; soit par résistance électrique soit par chaudière

29 .co-générateur : si le client désire une Co génératrice il est prié d'introduire la puissance souhaitée.

30.Electricalengine : générateur d'électricité : : si le client désire un générateur il est prié d'introduire la puissance souhaitée.

On clique sur le bouton   pour valider les choix.

On clique ensuite sur le bouton  pour avoir une facture pro-forma

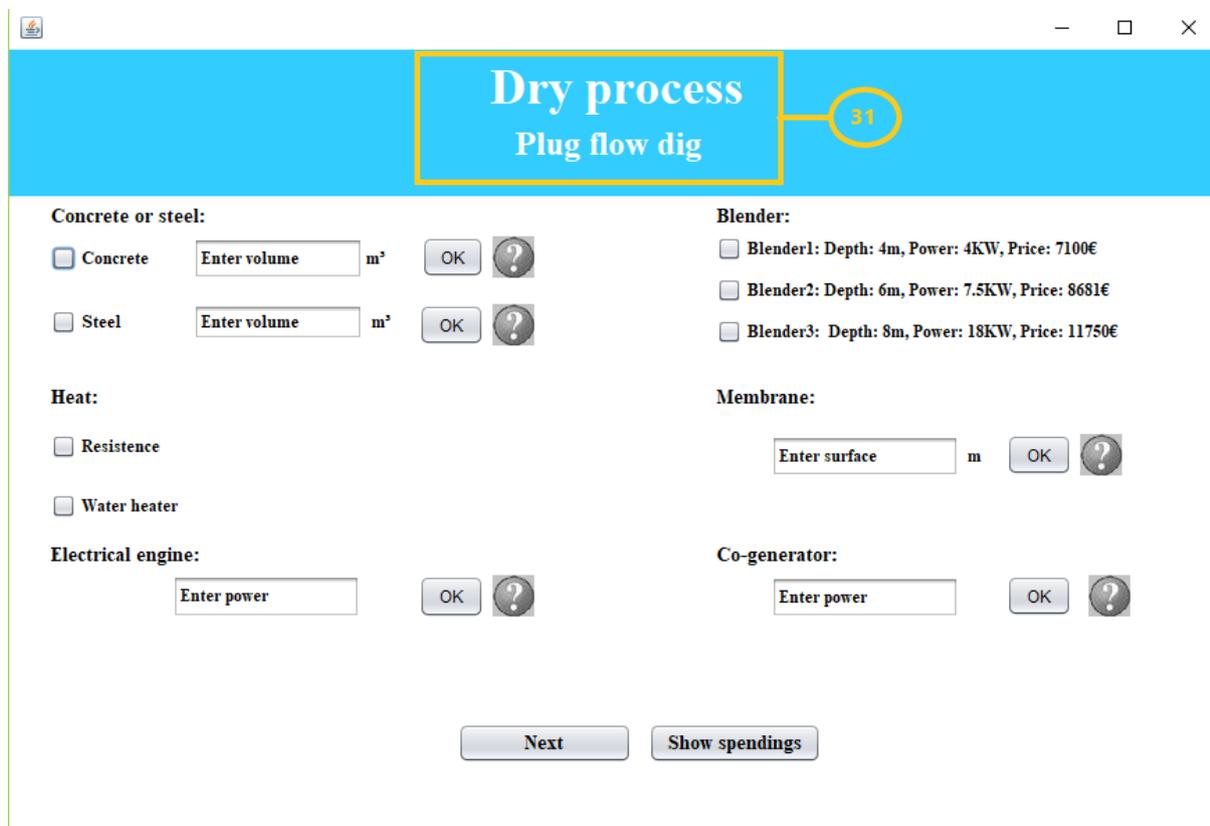


Figure 20: FenêtreN°05 de l'ASF Tools

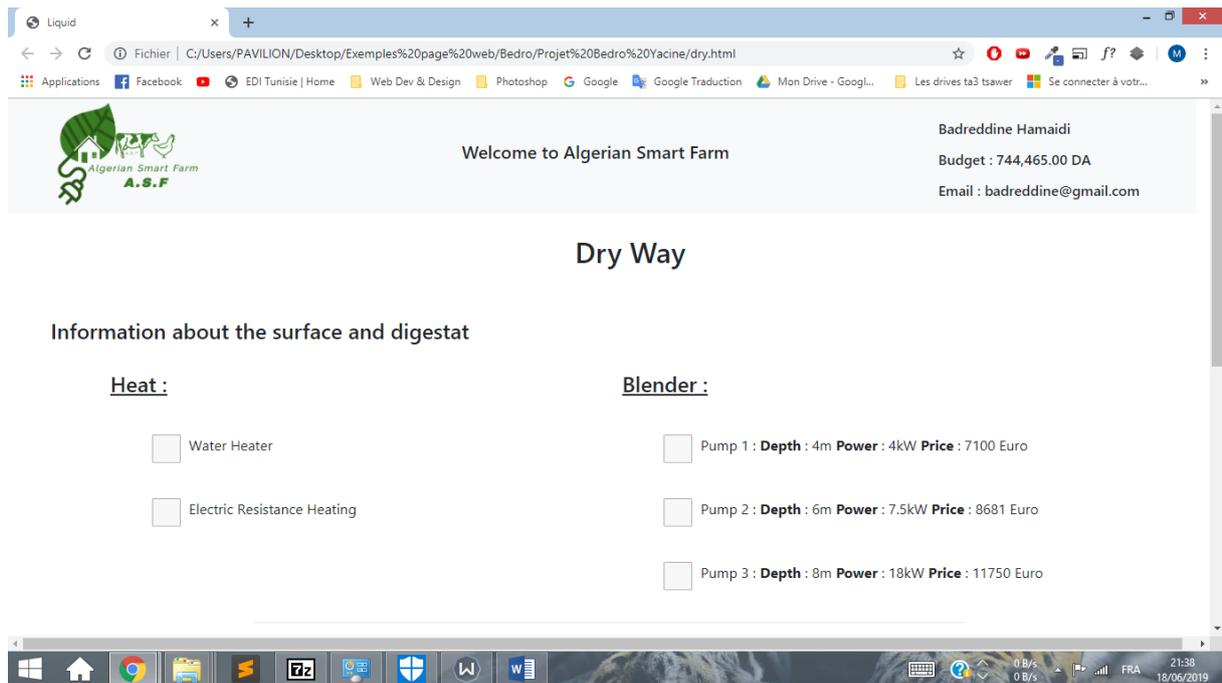


Figure 21: FenêtreN°05' de l'application web ASF Digital

DRY PROCESS : voie sèche, on suit les mêmes procédures pour l'étape précédente.

Facture	
Liquid way spending:	57000.0€
Concerete volume price:	10000.0€
Steel volume price:	0.0€
Membrane surface price:	1000.0€
Electrical engine price:	10000.0€
Co generator engine price:	13000.0€
Dry process spending :	0.0€
Concerete volume price:	0.0€
Steel volume price:	0.0€
Membrane surface price:	0.0€
Electrical engine price:	0.0€
Co generator engine price:	0.0€
Need total price:	6000.0€
Total price in DA:	8442000.0DA
Total price in € :	63000.0€
	<input type="button" value="Show spendings"/>

Figure 22: fenêtre N°6 du ASF Tools

La facture affiche les choix ainsi que le montant total en euro et en DA .

Logo of ASR (Algerian Smart Farm) and A.S.F. in the top left corner.

Home

Welcome to Algerian Smart Farm

Subsidie Hensaid
Budget: 744.465.00 DA
Email: badreddine@gmail.com

Success
Sufficient budget

Proforma Invoice

The material you have chosen :

- Pump 1** : Depth : 4m Power : 4kW Price : 7100 Euro
- Blender 1** : Depth : 4m Power : 4kW Price : 7100 Euro
- Construction Material** : Concrete
- Membrane** : 5000
- Heating Method** : Water Heating
- Electrical Engine** : MG-250 6251W 84%

Total (Euro) : 1 000 2,00 Euro
Total (DA) : 1 000 000,00 DA

Figure 23: fenêtre N°6' de l'application web ASF Digital

4 Partie calcul

Pour le cas de notre fermier nous optant pour un digesteur de type « plug flow digester » et cela par rapport à la forme de la surface disponible (rectangulaire), le volume de notre digesteur est 250 m³, avec 10m de long, 5m de largeur et 5m de profondeur. Voir figure

La ferme produit moyennement 25m³ de lisier journalier.

4.1 Tonnage :

On prend un échantillon de 1 litre de lisier, on le pèse sur une balance électronique, et cela donne une masse de 1050g. Les calculs effectués sont les suivants :

xvii. Calcul de masse volumique

$$V_m = \frac{m}{v}$$

1) Conversion du g au kg

$$1050g = 1,05Kg$$

$$V_m = \frac{1,050Kg}{0,001m^3}$$

$$V_m = 1050 \text{ Kg/m}^3$$

xviii. Tonnage journalier :

La ferme produit 25 m³ de lisier par jour :

Conversion en kg/jour

$$25 \times 1050 = 26250 \frac{kg}{jour}$$

xix. Tonnage annuel :

$$26250 \times 365J = 9581250kg = 9581,250 \text{ TONNES/AN}$$

4.2 Qualité de déchet et valorisation en biogaz :

Suivant les analyses faites par le centre de développement des énergies renouvelables (CDER) sur un échantillon prélevé de la pré-fosse de la ferme après mixage, on a obtenu les résultats suivants :

mB	%MS/MB	%MO/MS	m ³ CH ₄ /tMO	% CH ₄
100 g	3,5	78	200	60%

Tableau 3: les caractéristiques du déchet

4.3 CALCUL DE QUANTITE DE BIOGAZ PRODUITE PAR AN :

i. *Calcul de matière sèche annuelle*

$$9581,250 \text{ tonnes} \times 3,5\% = 335,34375 \text{ tonnes de MS}$$

ii. *Calcul de matière organique annuelle :*

$$335,34375 \times 78\% = 261,568 \text{ tonnes de MO}$$

iii. *Estimation de quantité de biogaz annuelle*

$$1 \text{ tMO} \rightarrow 200 \text{ m}^3 \text{CH}_4$$

$$261,568 \rightarrow Q_a$$

$$Q_a = 261,568 \times 200$$

$$Q_a = 52313,625 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{AN}$$

iv. *Estimation de débit de biogaz par heure*

$$Q_h = 6 \text{ m}^3/\text{h}$$

v. *Estimation de débit de méthane par heure ch₄/h*

$$Q_{\text{CH}_4/\text{h}} \times 60\% = 3,6 \text{ m}^3/\text{h}$$

4.4 PROPRIETES DU BIO GAZ

Le biogaz est principalement constitué de méthane combustible et de gaz carbonique inerte. D'autres gaz peuvent venir s'ajouter de façon minoritaire dans la composition du biogaz : hydrogène, sulfure d'hydrogène (H₂S). La teneur de ces gaz dépend étroitement du déchet traité et du degré d'avancement de la méthanisation.

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de l'unité de quantité de combustible. Le PCI est le pouvoir calorifique inférieur lorsque l'eau produite par cette combustion reste à l'état de vapeur. Le PCI du méthane à 0°C à pression atmosphérique est de 9,94 kWh/m³. Pour le biogaz, le PCI sera proportionnel à sa teneur en méthane (par exemple, pour un biogaz contenant 70% de méthane, le PCI sera de 9,94 x 0,7 = 6,96 kWh/m³). (FREDERIC, s.d.)

i. *Calcul de l'énergie pouvant être produite par le biogaz en un an*

$$\text{PCI} = 9,94 \times 0,6$$

$$\text{PCI} = 5,96 \text{ kWh/m}^3$$

Pour notre cas nous avons :

$$E = 5,96 \text{ kWh/m}^3 \times 6 \text{ m}^3/\text{h} = 35 \text{ kWh}$$

Pour une année

$$E_{\text{tot/an}} = 3\ 066\ 00 \text{ kWh}$$

ii. *Estimation de l'énergie valorisable produite en un an*

On admet 5% de pertes d'énergie afin d'être sûr que le moteur soit plutôt sur-alimenté que sous-alimenté (Couturier, Berger, & Héraul, 2001)). L'énergie valorisable par le moteur est donc la suivante :

$$E_{\text{valo}} = E_{\text{tot/an}} \times 0,95 = 3\ 066\ 00 \times 0,95 = 2\ 912\ 70 \text{ kWh}$$

iii. Calcul de l'énergie fournie par le biogaz en une heure et choix du moteur

$$E_{t=1h} = \frac{\text{Evalo}}{(24 \times 365)} = \frac{291270}{24 \times 365} = 33.25 \text{ kWh}$$

Quantité de déchet (tonnes/AN)	9581,250
Taux de matière sèche (%)	3,5
% MO/MS (%)	78
m ³ CH ₄ /tMO	200
% CH ₄	60
Quantité de biogaz (m ³ CH ₄ /AN)	52313 ,625
Débit de biogaz sortie de méthaniseur (m ³ /h)	6
Quantité de méthane (m ³ /AN)	31536
Débit de méthane sortie du méthaniseur (m ³ /h)	3,6
PCI du biogaz (kWh/m ³)	5,96
Energie fournie par le biogaz (kW/h)	33.25
Energie fournie par le biogaz (kW/an)	291270

Tableau 4: tableau récapitulatif des résultats trouvés

Un moteur est conçu pour fonctionner entre 50% et 100% de sa charge nominale, avec un rendement optimal autour de 75%. On recherche donc un moteur d'une puissance d'environ 47kW pour être proche de cet optimum (Lukaszczyk, 2013). Ainsi, un moteur de 10Kw possède une plage de charge acceptable de 5 à 10 KW, avec un rendement optimal qui se situe à 7,5 KW.

4.5 Le choix de Co-générateur

Le constructeur **Cogengreen** propose toute une gamme de moteur. Nous proposons de choisir le modèle « ecoGEN16AGc », dont la puissance est de 51 kW. Nous aurons ainsi une charge de 65%. Le constructeur indique pour ce moteur un rendement thermique de 71,5 %, un rendement électrique de 31,4 % (rendement total 103,4 %). De cela découle la puissance électrique : 16 kW_{el} et la puissance thermique : 36,5 kW_{th}

4.6 Production d'électricité et de chaleur :

Electricité :

$$E_{el}=E_{valo} \times 0.314 = 291270 \times 0,314= 91,45878MWh_{el}$$

Chaleur :

$$E_{th}=E_{valo} \times 0.715 = 291270 \times 0,715=208,25805MWh_{th}$$

<i>Caractéristique du moteur</i>	Type de moteur	ecoGEN16AGc
	Puissance	51KW
	Puissance électrique	16 KWe
	Puissance thermique	36.5KWth
	Rendement total	103,4%
	Rendement électrique	31.4%
	Rendement thermique	71.5%
<i>Production</i>	Electricité	91,45878MWh _{el}
	Chaleur	208,25805MWh _{th}

Tableau 5: Tableau montrant les caractéristiques de Co-générateur

ecoGEN16AGc



UNITE de COGENERATION a CONDENSATION

Combustible	Gaz naturel, propane parallèle au réseau BT
Fonctionnement	16kW
Puissance électrique	36,5 kW (si T _i retour <40 °C)
Puissance thermique	51,0 kW (suivt. ISO 3064-1)
Consommation	103,4 %
Rendement global	31,4 %
Rendement électrique	3X400 VAC
Tension	0,93
Cos φ	125/150 mg/Nm3 (à 5% O2)
Niveau d'émissions (NOx/CO)	56 dB/A à 1 mètre
Niveau sonore	max 90°C
Température sortie	max 70°C
Température retour	

MOTEUR	
Marque	Kubota K18
Config. cylindres	En ligne
Nombre de cylindres	3
Cycle	4 temps gaz
Cylindrée	1,8 ltr
Régime nominal	1500 t/min
Puissance nominale	20,5 kW

ALTERNATEUR	
Type	Asynchrone
Refroidissement	Par eau
Puissance	16 kW
Tension	400 V (triphase)
Fréquence	50 Hz
Courant nominal	24 A
Enroulement	Triangle

DIMENSIONS, POIDS ET CONNEXIONS HYDRAULIQUES	
Longueur	1270 mm
Largeur	820 mm
Hauteur	980 mm
Poids	740 kg
Connexion sortie	R 1"
Connexion retour	R 1"
Echappement	DN100
Connexion gaz	R 1/2"

Figure 24: Les caractéristiques du cogénérateur ecoGEN16AGc

4.7 Consommation :

i. Consommation d'électricité :

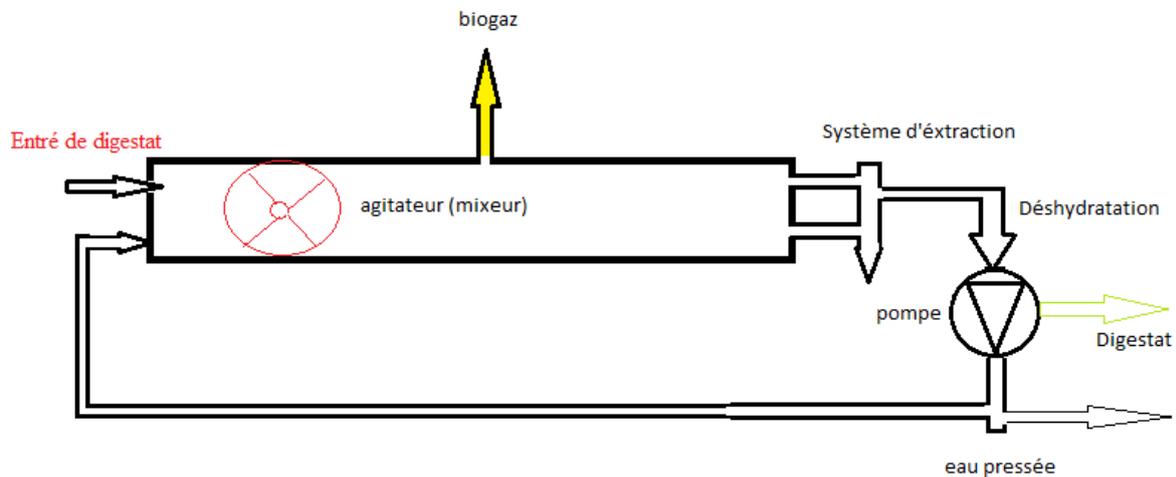


Figure 25: « Digesteur utilisé digesteur à circulation « plug flow digester''

1. Pompe	5.5KW	1.75h/jour
2. Mixeur	4KW	8h/jour
3. Entrée de digestat (racleur)	2Kw	1h/jour

ii. *Energie électrique totale consommée par le digesteur en une année :*

$$E_{\text{tot.dig}} = [(5.5 \times 1.75) + (4 \times 8) + (2 \times 1)] \times 365 = 15,923 \text{ MWhél}$$

iii. *Energie électrique consommée par la ferme en une année :*

$$E_{\text{ferme}} = 31 \text{ MWhél}$$

iv. *Energie électrique pouvant-être vendue :*

$$E_{\text{el.restante}} = E_{\text{el}} - (E_{\text{tot.dig}} + E_{\text{ferme}}) = 91,4587 - (15,923 + 31) = 44,535 \text{ MWhél}$$

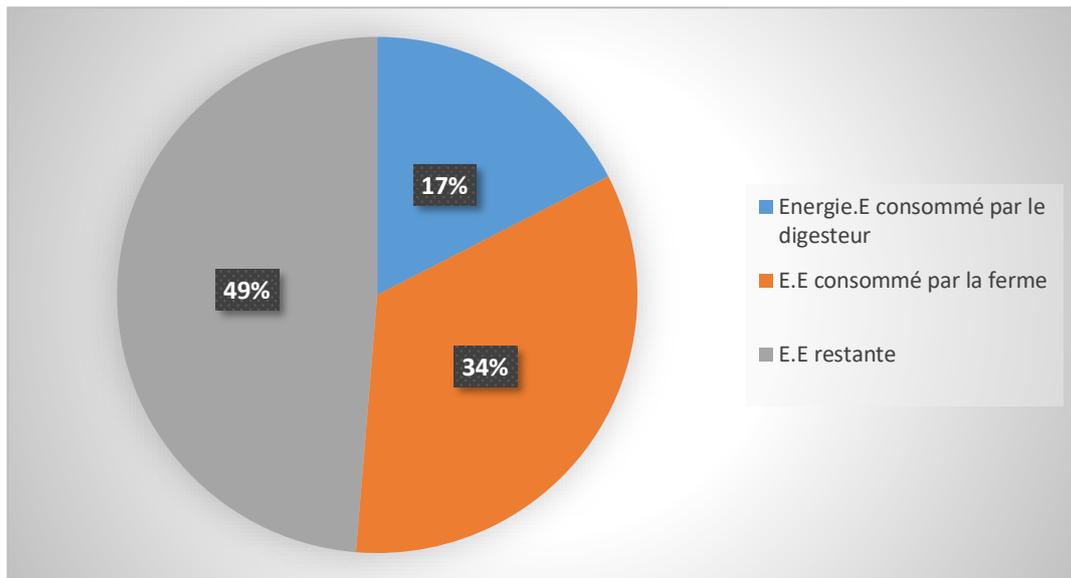


Figure 26: Répartition de l'énergie électrique produite par l'unité de méthanisation

v. *Estimation de chaleur requise :*

Nous avons deux sources en besoin de chaleur :

1. Les déperditions thermiques surfaciques (mur extérieur, sol, toit)
2. Chaleur pour amener les matières premières (les effluents) à la température du digesteur.

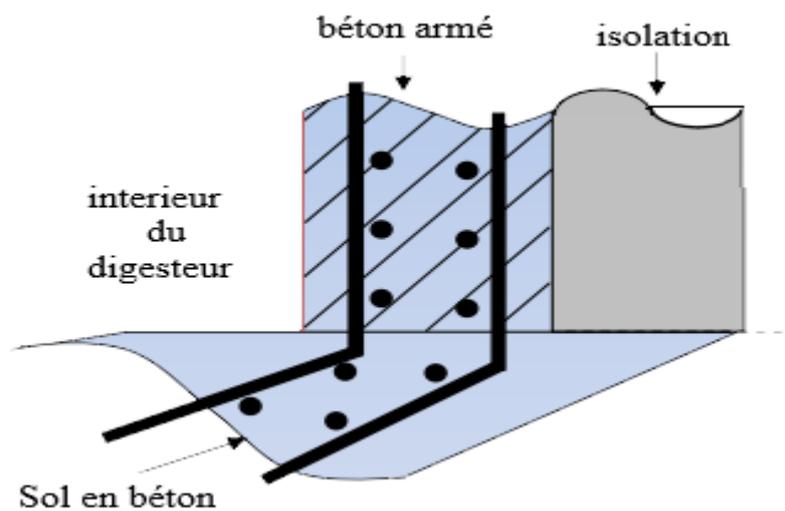


Figure 27: schéma montrant la structure surfacique du digesteur

vi. *Pertes thermiques*

- $H = UA\Delta T$ (kW) Où
- U = coefficient global de transfert de chaleur, $W m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$
- A = surface d'échange, m^2
- ΔT = différence de température entre le milieu intérieur (digesteur) et le milieu extérieur, $^\circ C$

Structure	Coefficient d'échange ($Wm^2. \text{ } ^\circ C$)
Mur en béton avec 300mm d'épaisseur bien isolé.	0.6 - 0.8
Sol en béton avec 300mm d'épaisseur.	1,7
Couverture flottante avec 25mm d'épaisseur bien isolé.	0.9 - 1.0

Tableau 6: Structure et son coefficient d'échange

- ❖ $H_M = 0.8 W m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1} \times (150 m^2) \times (50 - 20 \text{ } ^\circ C) = 3,6KW$
- ❖ $H_S = 1,7 W m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1} \times (50 m^2) \times (50 - 12 \text{ } ^\circ C) = 3,2KW$
- ❖ $H_C = 1 W m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1} \times (70 m^2) \times (50 - 20 \text{ } ^\circ C) = 2,1kW$ (70m: membrane flottante)

PERTES THERMIQUE TOTAL:

$$H_{total} = H_M + H_S + H_C = 3,6 KW + 3.2 KW + 2,1 KW = 8,9KW$$

vii. *Quantité de chaleur consommée par le digestat :*

- ✓ $Q = Cm\Delta T$ où :
- ✓ C = chaleur spécifique de digestat ($Wh / kg / \text{ } ^\circ C$)
- ✓ m = masse ajoutée (kg)
- ✓ ΔT = différence de température ($^\circ C$)

Le digesteur peut contenir un volume de 250m³ marchant à une température de 50°C (thermophile), avec un temps de rétention de 20 jour. Et assimilant le lisier à l'eau ($V_m = 1050kg/m^3$).

Donc :

- ✓ Masse ajoutée (m) = $250 / 20 = 12.5 m^3 \text{ day}^{-1} = 13125kg$
- ✓ Chaleur spécifique (C) = $1,1625 Wh / kg / \text{ } ^\circ C$
- ✓ Température de digestat = $28 \text{ } ^\circ C$
- ✓ Chaleur consommée = $1,1625 \times 13125 \times (50 - 28) = 335,67 KWh$

Dépense thermique annuelle	77,964MWth
Quantité de chaleur consommée par le digestat/an	121,353375MWth
Quantité de chaleur thermique restante / an	8.68MWth

Tableau 7: répartition de l'énergie thermique annuelles

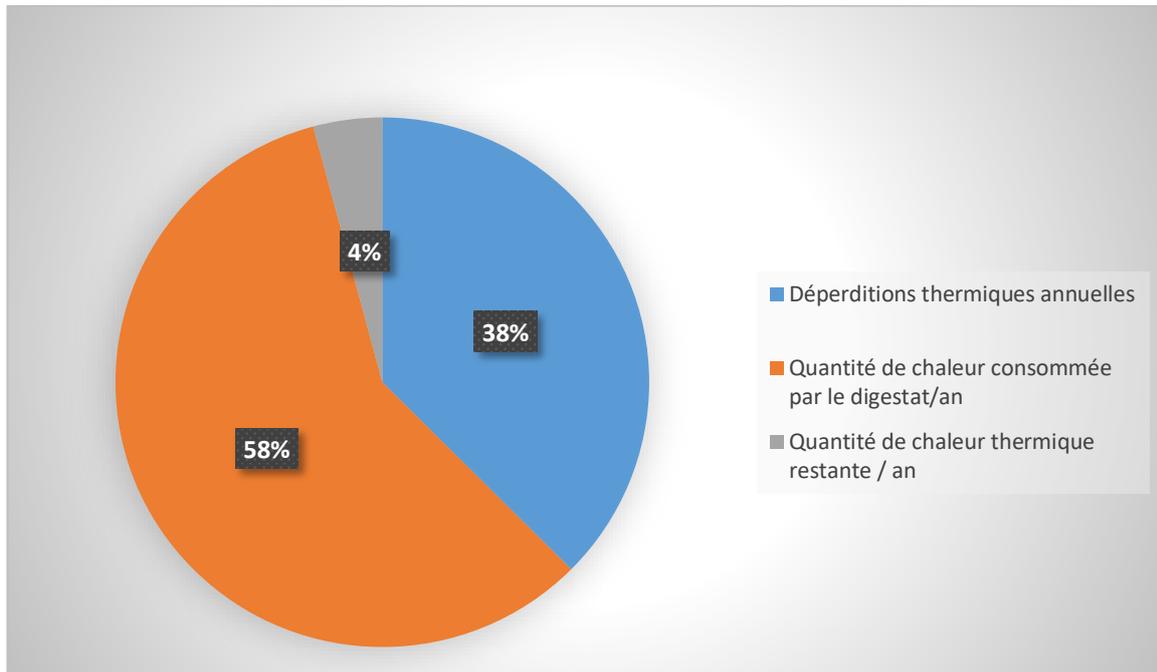


Figure 28: Répartition de l'énergie thermique annuelles

4.8 Commentaire :

On constate que la consommation d'énergie thermique annuelles par le digesteur et le digestat est importante, 38% et 58% de suite, alors que l'énergie thermique annuelle restante ne fait 4% de l'énergie thermique totale.

De ce fait, on suggère à notre client d'utiliser l'énergie électrique restante (49% ou 44,535MWhél) pour le chauffage de l'administration, ainsi que pour les usages de l'usine laitière.

Sinon, il pourra augmenter la taille de son digesteur, tout en achetant les déchets du voisinage, ou en leurs propose d'échanger leurs déchets contre un réseau de gaz !

4.9 Suggestions :

viii. Suggestion N°01 :

Tonnage	Quantité de lisier annuelle tonnes/an	31240
	Quantité de lisier journalière tonnes/jour	85,6
	Volume du digesteur m ³	1700
	Quantité de biométhane m ³ /an	170 574
	Type de digesteur	Digesteur à circulation
Les caractéristiques Du Cogénérateur	Type du cogénérateur	ecoGEN-50SG
	Puissance KW	147
	Puissance électrique kW _{el}	50
	Puissance thermique kW _{th}	84
	Rendement électrique %	34
	Rendement thermique %	57
Production Annuelle	Electricité MWh _{el}	345,65
	Chaleur MW _{th}	579,5

Tableau 8: suggestion pour 345 MWh_{el} et 580MW_{th} annuel

NB. On utilise pratiquement la même pompe et le même mélangeur.

ix. Suggestion 02 : pour une grande production

Tonnage	Quantité de lisier annuelle tonnes/an	123 923
	Quantité de lisier journalière tonnes/jour	323
	Volume du digesteur m ³	6470
	Quantité de biométhane m ³ /an	646 623
	Type de digesteur	Digesteur mix complet
Les caractéristiques Du Cogénérateur	Type du cogénérateur	ecoGEN-113SG
	Puissance KW	328
	Puissance électrique kW _{el}	113
	Puissance thermique kW _{th}	187
	Rendement électrique %	34.5
	Rendement thermique %	57
Production Annuelle	Electricité MWh _{el}	1321.7
	Chaleur MW _{th}	2183.7

Tableau 9: suggestion pour 1321.7MWh_{el} et 2183.7MW_{th} annuel

Commentaire :

Dans les grandes unités de méthanisations à grande puissance, Si l'on utilise de l'énergie thermique, la production et la digestion des déchets agricoles nécessitent 10,2 % de l'énergie produite. (Ministry of agriculture, Food, and Rural affairs , 2016)

Les digesteurs de ferme peuvent produire efficacement de l'énergie électrique et de l'énergie thermique à partir de matières organiques que la ferme génère où qu'elle reçoit. Toutefois, seuls des calculs permettent de déterminer s'il est rentable sur le plan économique de produire cette énergie.

4.10 Conclusion

L'étude a porté sur la conversion énergétique par biomasse et production du biogaz par processus de méthanisation anaérobie des déchets agricoles, ainsi que le dimensionnement d'unité de méthanisation dont le choix et le dimensionnement du digesteur est préliminaire, aussi que la qualité des déchets.

Pour cela un système d'aide à la décision fut conçu sous la forme d'un programme présenté en interface graphique. Cet outil est très facile à l'utilisation. Nous avons opté par le présenter aussi en application web, cela permettra à l'énergéticien de l'utiliser à partir de n'importe quel ordinateur, il suffit juste d'avoir une connexion internet et le mot de passe nécessaire.

Les résultats ont montré que le volume du biogaz produit dépend des paramètres physico-chimiques et la concentration de la matière organique initiale. Le choix du digesteur à circulation était par rapport à la forme de la surface rectangulaire, faire marcher le digesteur dans des conditions thermophiles pour diminuer le temps de rétention de lisier et augmenter la production en 20 jours.

Les calculs thermiques à partir du bilan énergétique comprennent :

- ✓ L'énergie consommée pour assurer la température de digestion de lisier,
- ✓ Les pertes de chaleur vers le milieu extérieur,
- ✓ L'énergie nette produite.

Une valeur maximale a été obtenue pour l'énergie électrique nette produite en une année de 44,54 MWh ce qui fait 49% de l'énergie électrique totale produite en une année avec un volume de biogaz produit 6 m³/h pour une température de 50°C à l'intérieur du digesteur.

On constate que la ferme est non seulement autonome en énergie électrique mais le fermier pourra même vendre de l'électricité à Sonelgaz.

Une valeur maximale a été obtenue pour l'énergie thermique nette produite en une année de 8.7 MWth ce qui fait 4% de l'énergie thermique totale produite en une année.

On constate que la ferme est aussi autonome en énergie thermique, mais on ne pourra pas faire un business avec.

Pour augmenter la production d'énergie nette annuelle on propose de bien isoler le sol ainsi que la surface latérale du digesteur.

La biotechnologie reste une solution recommandée en Algérie, dont il faut s'investir dès maintenant, vu les que les températures moyennes annuelles (20 à 35°C) joue un grand facteur dans la digestion

anaérobie, aussi la quantité importante de déchet agricole annuelle (lisier, fumier, déchet de poulet...etc) nécessitent un traitement, une valorisation énergétique, afin de protéger le peuple des maladies récemment réapparues (cholera, Hepatite...etc).

5 Références

- Hanif, A. (2013 , Mai). *Evaluation of a trickle flow leach bed reactor for anaerobic digestion of high solids cattle manure*. . Récupéré sur Researchgate:
https://www.researchgate.net/publication/325206264_Evaluation_of_a_trickle_flow_leach_bed_reactor_for_anaerobic_digestion_of_high_solids_cattle_manure
- Krich, K., Augenstein, D., Batmale, J., Benemann, J., Rutledge , B., & Salour , D. (2005). *Biomethane from Dairy Waste*. California.
- Waste Treatment by Dry Digestion. (s.d.). STRABAG. Récupéré sur enermac: <http://enermac.com/Strabab-SEHL.htm>
- Abbassi-Guendouz, A., Brockmann, D., Trably, E., Dumas, C., Delgenès, J., Steyer, & Escudié. (2012). Total solids content drives high solid anaerobic digestion via mass transfer limitation. *Bioresource*, 111, pp. 55-61.
- agstar. (2011, December). Anaerobic Digester system basics. *Recovering Value from waste* .
- Amrouche, L., & Igoud, S. (2005, JUIN 12). Bulletin des Energies renouvelables. *Pourquoi s'intéresse au Biogaz?(N07)* , pp. 14-15.
- Barakat, A. d. (2013). Dry fractionation process as an important step in current and future lignocellulose biorefineries: A review. *Bioresource Technology*, pp. 362-373.
- Bernet, N. B. (2008). Caractérisation de la mise en oeuvre de la méthanisation. in. *La Méthanisation,(Ed.) Lavoisier*, pp., pp. 87-113.
- Biogaz world . (2019). *PAQUES – BIOPAQ®UASB*. Retrieved from Biogaz world :
<https://www.biogasworld.com/product/anaerobic-digestion/paques-biopaquasb/>
- Bouallagui, H. H. (2004). Effect of temperature on the performance of an anaerobic tubular reactor treating fruit and vegetable waste. *Process Biochemistry*,, pp. 2143-2148.
- Cecchi, F. P. (1993). Digesting The Organic Fraction Of Municipal Solid Waste: Moving From Mesophilic (37°C) To Thermophilic (55°C) Conditions. *Waste management & recherche* , pp. 403-414.
- Chen, Y. C. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*, pp. 4044-4064.
- Chugh, S. C. (1998). Effect of recirculated leachate volume on MSW degradation. *Waste Management and Research*, pp. 564-573.
- Couturier , C., Berger, S., & Héraul, L. (2001). *La digestion anaérobie des boues urbaine*. Toulouse: solagro.
- de Baere, L. D. (1984). Influence of high NaCl and NH4Cl salt levels on methanogenic associations. *Water Research*, pp. 543-548.
- EneriaCat. (2019). *Gamme BIOGAZ-MG*. Récupéré sur EneriaCat : [:http://www.eneria.fr/wp-content/uploads/2012/09/Gamme-GE-Biogaz-MG_FR_STdC.pdf](http://www.eneria.fr/wp-content/uploads/2012/09/Gamme-GE-Biogaz-MG_FR_STdC.pdf)
- FREDERIC, S. (s.d.). *Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement, INRA*. Récupéré sur [methanisation.info](http://www.methanisation.info/valorisation.html): <http://www.methanisation.info/valorisation.html>
- Garcia, J.-L. P. (2000). Taxonomic, Phylogenetic, and Ecological Diversity of. *Anaerobe*, pp. 205-226.

- GODON, J.-J. (2008). Aspects biochimiques et microbiologiques de la méthanisation. Dans R. Moletta, *La méthanisation* (pp. 61-85). Paris : Lavoisier .
- Gujer, W., & Zehnder, A. J. (1983, AUGUST 1). Conversion Processes in Anaerobic Digestion. *Water science & technology*, 15, pp. 8-9.
- Hanaki, K. H. (1994). Protection of methanogenic bacteria from low pH and toxic materials by immobilization using polyvinyl alcohol. *Water Research*, pp. 877-885.
- Harada, H. U. (1994). Interaction between sulfate-reducing bacteria and methane producing bacteria in UASB reactors fed with low strength wastes containing different levels of sulfate. *Water Research*, pp. 355-367.
- Hills, D. (1979). Effects of carbon: Nitrogen ratio on anaerobic digestion of dairy manure. *Agricultural Wastes*, pp. 267-278.
- Jha, A. L. (2011). Research advances in dry anaerobic digestion process of solid. *African Journal of Biotechnology*, pp. 14242-14253.
- Kothari, R. P. (2014). Different aspects of dry anaerobic. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 174-195.
- Lay, J. L. (1997). Analysis of environmental factors affecting methane production from high-solids organic waste. *Water Science and Technology*, pp. 493-500.
- Lukaszczuk, M. (2013). *Déterminer la charge d'un moteur électrique est primordial pour l'efficacité énergétique*. Récupéré sur PEI-France: <https://www.pei-france.com/article/determiner-la-charge-dun-moteur-electrique-est-primordial-pour-lefficacite-energetique>
- M, s. (2013). Les procédés de digestion anaérobie pour la production du Biogaz. *CDER*.
- McMahon, K., Zheng, D., Stams, A., Mackie, R., & Raskin, L. (2004, SEPTEMBER 30). Microbial population dynamics during start-up and overload conditions of anaerobic digesters treating municipal solid waste and sewage sludge. *Biotechnology and bioengineering*, pp. 823-834.
- Ministry of agriculture, Food, and Rural affairs . (2016). *Energy Yields from a Farm-Based Anaerobic Digestion System*. Récupéré sur Ontario: <http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/enyields.htm>
- Moletta, R., & Verstraete, W. (2008). La Méthanisation dans la problématique énergétique environnementale. Dans M. René, *La méthanisation* (pp. 3-8). PARIS: Lavoisier.
- Naskeo Environnement. (2015 , JANVIER 1). *La méthanisation* . Récupéré sur Naskeo environnement : <http://naskeo.com/la-methanisation/>
- Nie, Y. L. (2007). Acetate production by acidification-homoacetogenesis two-phase coupling process: Effect of initial pH. *Shengwu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Biotechnology*, pp. 686-691.
- paques . (s.d.). *BIOPAQ®UASB*. Récupéré sur Paques Leading in biological: https://fr.paques.nl/produits/featured/biopaq/biopaquasb?fbclid=IwAR3M1eYR8ATim_Mp4H4UgDk8-iRXAh-fqw7y_g_2ZC16ZRIH_-Z8EbPHke4
- Pohland, F. K. (1975). Sanitary landfill stabilization with leachate recycle and residual treatment. *AIChE Symposium Series*, p. 145.
- Pommier, S. C. (2007). A logistic model for the prediction of the influence of water on the solid waste methanization in landfills. *Biotechnology and Bioengineering*, pp. 473-482.

- S. G. Pavlostathis, E. G.-G. (1991, OCTOBER 1). Kinetics of Anaerobic Treatment. *water science & technology*, 24, pp. 35-59. doi:<https://doi.org/10.2166/wst.1991.0217>
- Sharma, S. M. (1988). Effect of particle size on biogas generation from biomass residues. *Biomass*, pp. 251-263.
- Shi, J. W. (2013). Reactor performance and microbial community dynamics during solid-state anaerobic digestion of corn stover at mesophilic and thermophilic conditions. *Bioresource Technology*, pp. 574-581.
- Shimizu, T. . (1993, May 1). Anaerobic waste-activated sludge digestion-a bioconversion mechanism and kinetic model. *Biotechnol Bioeng*, 41, pp. 1082-1091. doi:10.1002/bit.260411111
- Silva, G. R. (2011). Successive centrifugal grinding and sieving of wheat straw. *Powder Technology*, pp. 266-270.
- Viswa , R., Mattsson, M., & Karlsson, N. (2013, april 22). Wetland biomass - suitable for biogas production? *Master thesis in applied environmental science* . Halmstad, Sweden .
- Wang, X. L. (2014). Effects of temperature and Carbon-Nitrogen (C/N) ratio on the performance of anaerobic co-digestion of dairy manure, chicken manure and rice straw: Focusing on ammonia inhibition. *PLoS ONE*, p. 5.
- Ward, A. H. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural. *resources. Bioresource Technology*, pp. 7928-7940.
- Weiland. (2010). Biogas production: Current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, pp. 849-860.
- Wellinger. (1999). *Process design of agricultural digesters*. Nova Energie GmgH.
- Wittmann, C. Z. (1995). Growth inhibition by ammonia and use of a pH-controlled feeding strategy for the effective cultivation of *Mycobacterium chlorophenolicum*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, pp. 519-525.
- Xu, F. S. (2013). Comparison of different liquid anaerobic digestion effluents as inocula and nitrogen sources for solid-state batch anaerobic digestion of corn stover. *Waste Management*, pp. 26-32.
- Yang, L. X. (2015). Challenges and strategies for solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 824-834.