



REPOBLIKAN'IMADAGASIKARA
Fitiavana – Tanindrazana – Fandrosoana

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO



INSTITUT D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR D'ANTSIRABE
VAKINANKARATRA

MENTION : GENIE CIVIL

Parcours : MATERIAUX MINERAUX

« Mémoire de fin d'étude en vue de l'Obtention du Diplôme d'Ingénieur en
Matériaux Minéraux »

**VALORISATION A DIVERS FINS DE LA DRECHE :
DECHET D'ORGE DE LA SOCIETE STAR
D'ANTSIRABE**

Présenté par : Monsieur TODINIAINA Lantonirina Bezara

Soutenu le : 03 Mars 2023

MEMBRES DU JURY :

Président : Docteur RANARIVELO Michel, Maître des Conférences

Directeur de mémoire : Professeur RAVONINJATOVO Achille Olivier,

Examineurs : Professeur RASOANAIVO Jean Luc,

Professeur RATSIMBAZAFY Hery Mikaela

Docteur KOERA Rasoloniaina Antoine, Maître des Conférences

Année universitaire : 2021-2022



REPOBLIKAN'IMADAGASIKARA
Fitiavana – Tanindrazana – Fandrosoana

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO



INSTITUT D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR D'ANTSIRABE
VAKINANKARATRA

MENTION : GENIE CIVIL

Parcours : MATERIAUX MINERAUX

« Mémoire de fin d'étude en vue de l'Obtention du Diplôme d'Ingénieur en
Matériaux Minéraux »

**VALORISATION A DIVERS FINS DE LA DRECHE :
DECHET D'ORGE DE LA SOCIETE STAR
D'ANTSIRABE**

Présenté par : Monsieur TODINIAINA Lantonirina Bezara

Soutenu le : 03 Mars 2023

MEMBRES DU JURY :

Président : Docteur RANARIVELO Michel, Maître des Conférences

Directeur de mémoire : Professeur RAVONINJATOVO Achille Olivier,

Examineurs : Professeur RASOANAIVO Jean Luc,

Professeur RATSIMBAZAFY Hery Mikaela

Docteur KOERA Rasoloniaina Antoine , Maître des Conférences

Année universitaire : 2021-2022

TENY FISAORANA

Eto ampiandohana dia tsy hay ny tsy hisaotra an'Ilay Andriamanitra lehibe izay nanome

hery sy fahasalamana ary tsilon-tsaina nahafahana nanatanteraka izao asa izao.

Manaraka izany dia tolorana fisaorana manokana koa :

- ❖ Andriamatoa ANTSONANTENAINARIVONY Ononamandimby Lehiben'ny Sekoly Ambony IES-AV ny amin'ny fandraisiny ahy ho isan'ny mpandrato fianarana ambony tety nandrita izay fotoana izay;
- ❖ Andriamatoa RANDRIAMIHAJA Samimananindrina Jean Aimé mpitantana ny departemanta « genie civil »
- ❖ Andriamatoa RAVONINJATOVO Achille Olivier tamin'ny fanampiana sy ny fanomezana torohevitra nahazoana namoaka izao sangan'asa izao. ;
- ❖ Andriamatoa RANDRIAMBOLOLONA Sabin tamin'ny fanampiana tao amin'ny laboratoira;

Ireo mpitsara amin'ny fotoana natokan'izy ireo mba hanatsarana ny asa :

- ❖ Andriamatoa RANARIVELO Michel,
- ❖ Andriamatoa RASOANAIVO Jean Luc,
- ❖ Andriamatoa KOERA Rasoloniaina Antoine

Misaotra ireo mpampianatra sy mpanabe rehetra ihany koa nikolokolo sy nampita fahalalana ahafahana miatrika ny ho avy;

Tsy hay ihany koa ny tsy hisaotra ny Orinasa STAR Antsirabe ; taminy fanomezana ny lanjan'ny drêche mivoaka isan'andro izay nomen'i Mr ANDRIADO FANIAINA ; Agent de Société FEED INPUT compagnie prestataire de déchet à la fabrication de bière.

Farany kanefa tsy ambanin-javatra dia misaotra manokana an'ireo Fianakaviana ny amin'ny fanohanana Ary tsy adino ihany koa ireo tapaka sy namana izay ankasitrahana manokana tamin'ny fanampiana rehetra eny fa na izay bitika sy madinika aza.

REMERCIEMENTS

En préambule, je tiens à remercier Dieu pour m'avoir donné la force, la sagesse et la Connaissance pour l'aboutissement de ce mémoire.

Ensuite, je tiens aussi à adresser mes remerciements aux personnes responsables suivantes :

- ❖ Monsieur ANTSONANTENAINARIVONY Ononamandimby, le Directeur de l'Institut d'Enseignement Supérieur d'Antsirabe Vakinankaratra ;
- ❖ Monsieur RANDRIAMIHAJA Samimananindrina Jean Aimé, Chef de Mention Génie Civil de l'Institut d'Enseignement Supérieur d'Antsirabe Vakinankaratra ;
- ❖ Monsieur RAVONINJATOVO Achille Olivier ; Professeur, notre directeur de mémoire, pour avoir donné leurs temps et leurs connaissances lors de l'encadrement ;
- ❖ Monsieur RANDRIAMBOLOLONA Sabin, Maître conférence, Responsable du laboratoire de CNRIT.

Les membres du jury qui ont pris part à l'examen de ce mémoire,

- ❖ Monsieur RANARIVELO Michel, Maître conférence.
- ❖ Monsieur RASOANAIVO Jean Luc, Professeur.
- ❖ Monsieur KOERA Rasoloniaina Antoine, Maître conférence.

Je remercie également tout le corps enseignant pour les savoir-faire et savoir-être qu'ils m'ont passés tout le long de mes études ;

A travers son agent de Société FEED INPUT compagnie prestataire de déchet à la fabrication de bière ; Monsieur ANDRIADO FANIAINA, un grand remerciement à la Société STAR pour les données sur la production de déchets d'orge.

Enfin, je voudrais remercier les membres de la famille pour leur soutien. Ainsi qu'aux amis qui ont fait part de leur aide de près ou de loin.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

PREMIERE PARTIE ETAT DE CONNAISSANCES

CHAPITRE I ENJEUX ET SITUATION ENERGETIQUE MONDIALE

CHAPITRE II POLITIQUE ENERGETIQUE A MADAGASCAR

CHAPITRE III ZONE D’ETUDE : SOCIETE STAR ET LA CU ANTSIRABE I

CHAPITRE IV METHANISATION

CHAPITRE V BIOGAZ

CHAPITRE VI DRECHES DE BRASSERIE

DEUXIEME PARTIE MATERIELS ET METHODES

CHAPITRE VII MATERIELS ET METHODES

TROISIEME PARTIE RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE VIII RESULTATS DES ESSAIS DE LABORATOIRE
ET DISCUSSION

QUATRIEME PARTIE ETUDE DE PREFAISABILITE ECONOMIQUE ET DE
RENTABILITE FINANCIERE

CHAPITRE XI ETUDE DE PREFAISABILITE ECONOMIQUE ET DE
RENTABILITE FINANCIERE

LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

AIE	Agence internationale de l'énergie
ADER	Agence de Développement de l'Electrification Rurale
ADF	Acid Detergent Fiber
BP	Compagnie britannique du secteur pétrolier
EnR	Energies renouvelables
Ppm	Parties par million
NPE	Nouvelle Politique de l'Energie
pH	Potentiel d'Hydrogène
NDF	Neutral Detergent Fiber ;
PND	Plan National de Développement
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur
OMH	Office Malgache des Hydrocarbures
MALTO	Malts et orge
STAR	Société Tananarivienne d'Articles Réfrigérés
TRH	Temps de Rétention Hydraulique
TRI	Taux de rentabilité Interne
VAN	Valeur Nette Actualisée
IP	Indice de profitabilité

UNITE

Ar	Ariary
Cm	Centimètre
g	Gramme
GWh	GigaWattheure
ha	Hectares
Hz	Hertz
kcal	Kilocalorie
kg	Kilogramme
kW	Kilowatt
kWh/Nm ³	KiloWatt-heure/ newton mètre cube
kWh	Kilowattheure

L	Litre
m ³	Mètre cube
Mt	Mégatonne
Ar	Ariary
TJ	Terajoules
V	Volt
°C	Degré Celsius
EJ	Exajoules

SYMBOLE CHIMIQUE

CH ₃ COO	Acétate
CH ₃ COOH	Acide acétatique
CH ₄	Méthane
CO ₂	Dioxyde de carbone
H ₂	Hydrogène
H ₂ O	Molécule d'eau
H ₂ S	Sulfure d'hydrogène
HCO ₃ ⁻	Hydrogénocarbonate ou bicarbonate
NaCl	Chlorure de Sodium
NaOH	Hydroxyde de sodium
NH ₃	Ammoniac

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Principe de la biomasse comme source d'énergie	7
Figure 2 : Les étapes de la digestion anaérobie	17
Figure 3 : Bactéries du genre Méthobactérium	21
Figure 4 : Effet de la température sur le taux de croissance des bactéries [10]	24
Figure 5 : Equivalence quantitative du biogaz	27
Figure 6 : Digesteur continu de type chinois.....	29
Figure 7 : Le digesteur discontinu de type isman-ducellier	29
Figure 8 : Schéma représentatif du processus d'obtention des drêches de brasserie	31
Figure 9 : Les différentes voies d'utilisation des drêches de brasserie	33
Figure 10 : Schéma de dispositif du digesteur de laboratoire du CNRIT	39
Figure 11 : Plan schématique de digesteur	42
Figure 12 : Cotes des digesteurs vue latérale.	43
Figure 13 : Cotation des digesteurs vus de dessus.....	44
Figure 14 : la cotation de la cheminée.....	45
Figure 15 : Schéma de principe de l'installation	46
Figure 16 : Evolution de la production journalière en biogaz.....	50
Figure 17 : Courbe de production cumulée en biogaz	51

LISTE DES PHOTOS

Photo1 : digesteur (Source Auteur (19/10/22)).....	36
Photo 2 : Gazomètre (Source : Auteur (19/10/22))	37
Photo 3: Bac d'immersion contenant des digesteurs Source (Auteur (19/10/22))	37
Photo 4 : Bac de récupération (Source auteur (19/10/22)).....	38
Photo 5 : Dispositif expérimental installé Source (Auteur (19/10/22))	38
Photo 6 : Balance de précision (source Auteur (19/10/22)).....	39
Photo 7 : Flamme du biogaz en dessus du gazomètre Source (Auteur [25.10.22])	52

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 :Consommation énergétiques des années 2005	5
Tableau 2: temps de génération de différents micro-organismes.....	19
Tableau 3 : Plage de la température	23
Tableau 4 : Aperçu de la composition moyenne du biogaz.	26
Tableau 5 : Composition chimique des drêches de brasserie rapportée par la bibliographie ..	32
Tableau 6 : La composition des différents types de drêche	36
Tableau 7: Formulation des substrats à fermenter pour le digesteur de 5 litre.	40
Tableau 8 : Quantité de matière première disponible par jour	41
Tableau 9 : Cotes des digesteur vu latérale	44
Tableau 10: Cotes des digesteur vu supérieur.....	44
Tableau 11 : Liste des matériaux de construction	47
Tableau 12 : Proportion de chargement des digesteurs.....	48
Tableau 13: Equivalence énergétique du biogaz obtenu	52
Tableau 14: Évaluation de la production de biogaz à grande échelle	53
Tableau 15 : Bilan énergétique Annuel.....	54
Tableau 16 : Fiche Technique du Générateur électrique.....	55
Tableau 17 : Production prévisionnelle en Energie électrique	55
Tableau 18 : Fiche technique de projet	57
Tableau 19: Investissements financiers du projet	65
Tableau 20 : Charges d'exploitation de production de biogaz.....	66
Tableau 21 : Détails du chiffre d'affaire de production de biogaz	66
Tableau 22 : Compte d'exploitation de production de biogaz	67
Tableau 23 : Indicateurs de rentabilité en fin de la 1 ^{ère} année.....	68
Tableau 24: Investissement de conversion énergétique	68
Tableau 25 : Compte d'exploitation de la conversion énergétique.....	69
Tableau 26: Indicateurs de rentabilité en fin de la 3 ^{ème} année	69

INTRODUCTION

Le biogaz est une des formes d'énergie renouvelable exploitée depuis plusieurs décennies et qui est employé comme produit de remplacement pour les combustibles fossiles. Ce biogaz est le résultat d'un processus de dégradation des matières organiques dans un milieu privé d'oxygène. Cette dégradation est influencée par plusieurs facteurs tels que : le pH, la température, la teneur en eau, etc. La température au sein du digesteur est une des principales conditions au bon fonctionnement de la méthanisation. Les recherches ont amené à découvrir plusieurs types d'énergies nouvelles comme les énergies renouvelables, parmi lesquelles l'énergie verte, qui est basée sur la valorisation des matières organiques en énergie biomasse.

Techniquement, la production de biomasse énergie est effectuée par conversion énergétique de la biomasse. En 2004, Tchouate énonça qu'il existe actuellement trois principales catégories de procédés de conversion. La conversion thermochimique, la trituration ou extraction mécanique et la conversion biochimique. C'est cette dernière, c'est-à-dire la conversion biochimique, qui fera l'objet de l'étude menée et développée dans le présent document. La production de biogaz par méthanisation ou fermentation méthanique de la drêche dans des bioréacteurs appelés digesteurs à biogaz ou biodigesteurs, en vue de produire de l'énergie électrique par la suite à travers l'usage d'un générateur électrique. Une des raisons ayant suscité cette idée de vouloir transformer ce type de déchet en le valorisant en biogaz et en fertilisants est son caractéristique, véhiculant une forte odeur assez désagréable. Il serait ainsi impropre de diffuser directement ces déchets dans l'environnement. Ce travail se propose alors d'entreprendre la recherche sur la « VALORISATION A DIVERS FINS DE LA DRECHE : DECHET D'ORGE DE LA SOCIETE STAR D'ANTSIRABE » pour en extraire une nouvelle source d'énergie par la méthode de méthanisation. L'industrie de la bière est l'une des industries qui génère des quantités relativement importantes de sous-produits et de déchets : les drêches de brasserie, le houblon et les levures sont les plus communs. Ces drêches sont facilement recyclées et réutilisées comparées à d'autres résidus qui nécessitent de faire appel à d'autres procédés de transformation. En raison de leur taux d'humidité élevée (80%) et de leur teneur en sucres fermentescibles, les drêches de brasserie se détériorent très facilement à cause de la croissance de bactéries. Des questions se posent entre autres :

- Les bactéries issues de la dégradation des drêches ont –elles les mêmes comportements que celles de la fermentation anaérobie ?
- Quelle est la technologie appropriée pour valoriser à des fins agros énergétiques de ces déchets d'orge ?

- A part l'éradication des odeurs émises par le stockage à ciel ouvert de ces drèches, y-a-t-il d'autres avantages attendus par leur valorisation ?

Ce travail de recherches essaie d'apporter des éclaircissements sur ces questions posées à travers les quatre grandes parties de ce document. La première partie du travail informe essentiellement sur l'état de connaissances, dont le contenu développe respectivement les enjeux et la situation énergétique mondiale, la politique énergétique à Madagascar, la zone d'étude, les diverses informations relatives au processus de méthanisation, au biogaz, aux bioréacteurs, et enfin la généralité sur les drèches. La deuxième partie détaille les Matériels utilisés et les Méthodes adoptées pour la concrétisation de ce travail. La troisième partie relate les résultats et les discussions correspondantes. Enfin, la quatrième et dernière partie du document présente l'étude de préfaisabilité technico économique et de rentabilité financière du projet.

PARTIE I

ETAT DE CONNAISSANCES

CHAPITRE I : ENJEUX ET SITUATION ENERGETIQUE MONDIALE[W]

I.1 Ressources et consommation énergétiques mondiales

Les réserves mondiales prouvées d'énergie fossile pouvaient être estimées en 2020, selon l'agence fédérale allemande pour les sciences de la terre et les matières premières, à 40 517 exajoules, dont 55% de charbon, 25% de pétrole et 19% de gaz naturel.

Ces réserves assurent 83ans de production au rythme actuel ; cette durée est très variable selon le types d'énergie 56ans pour le pétrole, 54ans pour le gaz naturel, 139ans pour le charbon.

La production mondiale d'énergie commercialisée était en 2021, selon **BP « compagnie britannique du secteur pétrolier »**, de 595 EJ, en progression de 14,3% depuis 2021.Elle se répartissait en 31,0% de pétrole, 26,9% de charbon ; 24,4% de gaz naturel ; 4,3% de nucléaire et 13,5% d'énergie renouvelables (hydroélectricité : 6.8% ; éolien solaire ; biomasse ; géothermie ; agro carburants : 6 ;7%).

I.2. Consommation énergétique mondiale

Depuis la révolution industrielle, la consommation d'énergie n'a cessé d'augmenter. La consommation finale énergétique mondiale a progressé de 115 % en 46 ans, de 1973 à 2019 ; elle s'élevait en 2019, selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), à 418 EJ, dont 19,7 % sous forme d'électricité ; depuis 1990, elle a progressé un peu plus vite que la population, mais sa répartition par source d'énergie n'a guère évolué : la part des énergies fossiles a reculé de 1,3 points, mais leur domination reste massive : 81,4 % ; la part des énergies renouvelables (EnR) n'a progressé que de 1,3 points, passant de 15,0 % en 1990 à 16,3 % en 2019, car le recul de la part de la biomasse compense en partie la progression des autres EnR. La répartition par secteur de cette consommation était : industrie 29 %, transports 29 %, résidentiel 21 %, tertiaire 8 %, agriculture et pêche 2 %, usages non énergétiques (chimie, etc.) 9 %. La part de l'électricité dans la consommation finale d'énergie progresse rapidement : 13,3 % en 1990, 19,7 % en 2019 ; cette progression est particulièrement rapide dans les pays émergents.

I.3. Emissions de dioxyde de carbone (CO₂)

Au niveau mondial, les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) dues à l'énergie en 2019 sont estimées par l'AIE à 33 622 Mt, en progression de 117 % depuis 1973, dont 44,0 % produites par le charbon, 33,7 % par le pétrole et 21,6 % par le gaz naturel ; par secteur en 2017, 37 % étaient issues de l'industrie, 25 % des transports, 16 % du secteur résidentiel et 10 % du secteur tertiaire. Les émissions de CO₂ par habitant en 2019 sont estimées à 4,39 tonnes dans

le monde, 14,44 tonnes aux États-Unis, 7,75 tonnes en Allemagne, 4,36 tonnes en France, 7,07 tonnes en Chine, 1,69 tonnes en Inde et 0,97 tonnes en Afrique. Selon BP, les émissions mondiales de CO₂ ont baissé de 6,5 % en 2020, puis remonté de 5,9 % en 2021.

I.4. Classement des énergies primaires

I.4.1. Energie fossile [30]

Les combustibles fossiles conventionnels représentent la quasi-totalité de la consommation actuelle d'énergies fossiles : le tableau ci-dessous montre les consommations énergétiques en 2005.

Tableau 1 : Consommations énergétiques en 2005

Energie fossile	Energie consommée (en %)
Pétrole	35
Charbon	25
Gaz naturel	20

Le lignite : principalement consommé en Allemagne

Energie nucléaire : uranium

Les énergies renouvelables (parfois abrégées EnR) sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain.

La part des énergies renouvelables dans la consommation finale mondiale d'énergie était estimée en 2018 à 17,9 %, dont 6,9 % de biomasse traditionnelle (bois, déchets agricoles, etc.) et 11,0 % d'énergies renouvelables « modernes » : 4,3 % de chaleur produite par les énergies renouvelables thermiques (biomasse, géothermie, solaire), 3,6 % d'hydroélectricité, 2,1 % pour les autres renouvelables électriques (éolien, solaire, géothermie, biomasse, biogaz) et 1 % pour les biocarburants ; leur part dans la production d'électricité était estimée en 2018 à 26,4 %.

Les énergies renouvelables sont également appelées énergies durables. On peut dire que les énergies durables sont des énergies qui ne se tarissent pas dans le temps ; que leur capacité de régénération, avec ou sans intervention humaine, sont largement supérieures à leur consommation. [31]

Elles se subdivisent en 4 catégories :

- Energie solaire
- Energie hydraulique
- Energie éolienne
- Biomasse ou bioénergie

I.4.2. Energie solaire

I.4.2.1. Thermique

La thermique consiste à utiliser des capteurs solaires convertissant directement le rayonnement solaire en chaleur. Cette dernière est récupérée par un fluide caloporteur (eau glycolée ou air), qui s'échauffe en circulant dans un absorbeur placé sous vitrage. Cette technique permet de produire de l'eau chaude pour le sanitaire ou le chauffage

I.4.2.2. Photovoltaïque :

C'est la conversion de la lumière en électricité. La lumière solaire peut directement être transformée en électricité par des panneaux photovoltaïques, sans pièces tournantes et sans bruit.

I.4.2.3. Energie hydraulique

En captant l'eau à travers une conduite et en l'injectant vers une turbine couplée à un générateur électrique, on produit de l'électricité.

La production d'électricité à partir de l'hydraulique est extrêmement efficace et peu coûteuse dans un pays qui a un relief montagneux.

I.4.2.4. Energie éolienne

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, qui est le plus souvent transformée en énergie électrique. Les éoliennes produisant de l'électricité sont appelées aérogénérateurs, tandis que les éoliennes qui pompent directement de l'eau sont parfois dénommées éoliennes de pompage, dont un type particulier est l'éolienne Bollée.

I.4.2.5. Biomasse ou Bioénergie :

La biomasse, et plus spécifiquement la matière végétale, sont dérivées de la photosynthèse, notamment les sucres et l'amidon synthétisés après l'entrée du CO_2 dans le cycle de Calvin - Benson. Outre le rôle des plantes dans l'alimentation, la biomasse est importante dans les programmes énergétiques destinés à remplacer les énergies fossiles. La figure ci-dessous illustre le principe de la bioénergie.

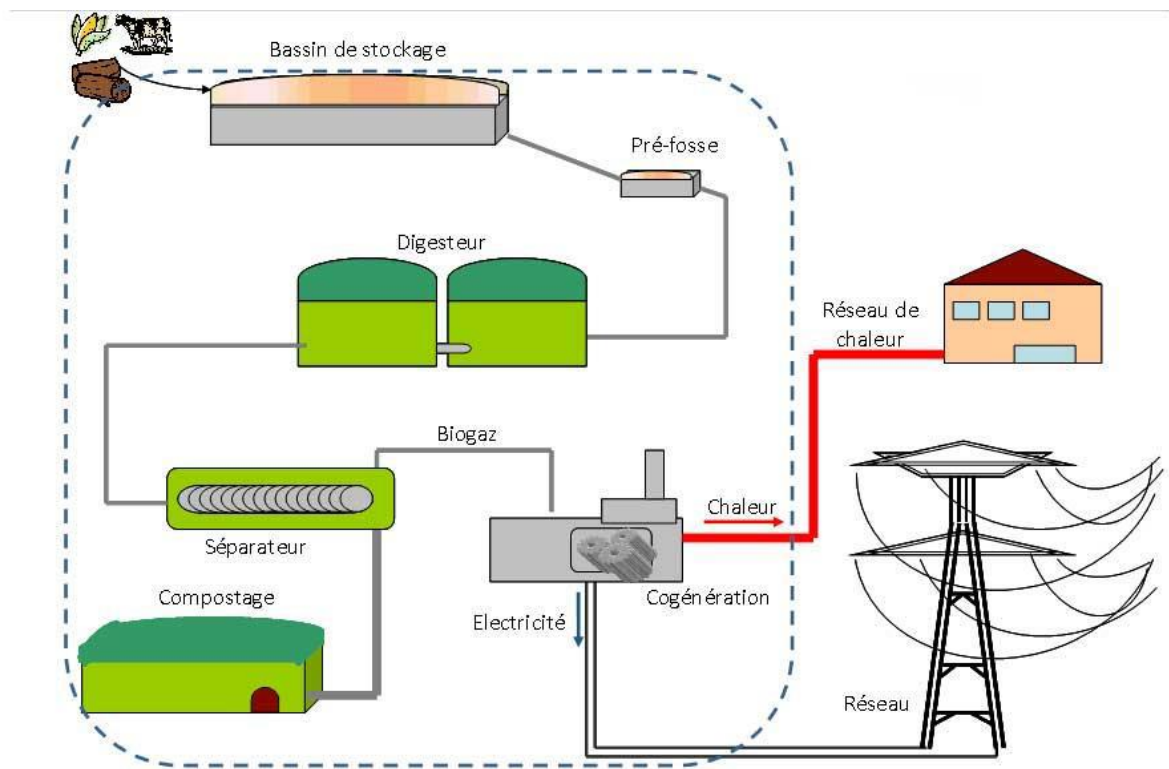


Figure 1 : Principe de la biomasse comme source d'énergie

SOURCE : AIE « Agence internationale de l'énergie »

CHAPITRE II : POLITIQUE ENERGETIQUE A MADAGASCAR

II. Nouvelle Politique de l'Energie (NPE) 2015-2030. [32]

La (NPE) s'inscrit dans le cadre du Plan National de Développement (PND) 2015-2019. L'utilisation du bois de chauffe et du charbon de bois représente depuis toujours plus de 90% de l'énergie consommée et le bois utilisé est en grande majorité issu d'une exploitation illicite et destructive des ressources forestières. Ce phénomène à croissance rapide est l'une des principales causes de déforestation et dégradation des forêts naturelles dont la couverture est passée de 9,4 millions d'ha en 2005 à 9,2 millions d'ha en 2010, soit une réduction de presque 40 000 ha par an.

La dépendance croissante aux produits pétroliers a eu pour effet de rendre particulièrement vulnérable le système de production d'énergie électrique malagasy. Ainsi, la facture pétrolière de la JIRAMA a coûté près de 150 millions USD en 2014, soit une augmentation de plus de 100% par rapport à celle de 2009.

Depuis les années 2000, le secteur de l'Energie n'a pas été épargné par les effets fragilisant des différentes crises politiques qu'a traversées le pays. Le Gouvernement souhaite à présent, à travers la présente Nouvelle Politique de l'Energie (NPE), redynamiser le secteur pour ainsi permettre un progrès rapide, « palpable » et continu sur les domaines économiques, sociaux et environnementaux.

II.1. Vision de la Nouvelle Politique de l'Energie

La NPE recommande une combinaison d'approche technologique et de méthodes préservant et développant les ressources naturelles énergétiques du pays.,

La réglementation de l'exploitation du bois de chauffe et d'Energie ainsi que la production de charbon devront être régulées telles que définies par la Politique Nationale Forestière de 1997 (en cours de révision) règlementant l'exploitation forestière et la fabrication du charbon de bois.

Pour l'énergie moderne (électricité et éclairage) l'objectif est de fournir un accès durable à 70% des ménages à l'horizon 2030. Pour le développement des types de centrales, la NPE estime que la production d'électricité proviendra à 75% de l'hydroélectricité, 5% de l'éolien, et 5% du solaire, soit 85% de sources d'énergie propres, le restant, 15%, étant de la thermique en complément et en appui aux énergies renouvelables, à l'horizon 2030.

II.2. Aperçu général du contexte de gouvernance du secteur énergétique

La régulation et la gestion du secteur sont assurées par plusieurs entités sous contrôle gouvernemental :

II.2.1. Ministère en charge de l'Energie et des Hydrocarbures

Est l'acteur principal du secteur énergétique. Il est aussi l'autorité responsable de l'octroi des autorisations et concessions pour l'exploitation des installations de transport, de distribution et de production d'énergie électrique.

II.2.2. Agence de Développement de l'Electrification Rurale (ADER),

Etablissement public à caractère administratif, chargée de promouvoir et d'encourager la soumission de projets en matière d'électrification rurale.

II.2.3. Office Malgache des Hydrocarbures (OMH),

Etablissement public à caractère industriel et commercial, est chargé d'établir les normes du secteur, et de collecter les données pour les statistiques et les doléances des consommateurs.

II.2.3. JIRAMA,

Société anonyme détenue entièrement par l'Etat Malagasy. La société est sous tutelle conjointe des Ministères chargés de l'Eau, des Finances et du Budget, et du Ministère en charge de l'Energie.

II.2.4. Ministère en charge de l'Environnement et des Forêts

Œuvre pour le respect de l'environnement et la protection des forêts pour leur valorisation de manière durable et efficace.

II.2.5. Ministère en charge de l'Eau

S'occupe de la conception, de la gestion et de la mise en œuvre de la politique en matière d'eau potable et d'assainissement et à l'utilisation de la ressource eau dans les aménagements hydroélectriques.

II.3. Politiques énergétiques sous-sectorielles

II.3. 1. Biomasse

Reboisement et, gestion forestière

La NPE appuie les efforts soutenant à la protection des ressources forestières et au reboisement de 35 000 à 40 000 ha par an afin de sécuriser l'approvisionnement en bois-énergie.

La délimitation territoriale des zones d'exploitation de bois-énergie sera établie, assortie de la mise en place d'un système de suivi et de la professionnalisation de la filière. Pour la biomasse autre que le bois-énergie, une stratégie nationale ambitieuse sera définie et les procédures administratives simplifiées.

L'amélioration des techniques et de l'efficacité énergétique dans les domaines de l'exploitation et de la transformation du bois visera à mieux valoriser la matière première « bois » par la réduction des pertes liées à l'exploitation et à la carbonisation.

II.3. 2. Electricité

L'atteinte de l'objectif d'accès à l'électricité ou à une forme d'éclairage moderne par 70% de la population impliquerait une production électrique de 7 900 GWh à l'horizon 2030 par rapport aux 1 500GWh produits actuellement.

II.3. 3. Hydrocarbures

Les actions envisagées seront harmonisées avec celles développées dans la Politique Nationale Minière et Pétrolière 2014.

L'utilisation d'hydrocarbures produits localement, notamment l'huile lourde, à des fins de production d'électricité permettra de réduire la facture d'importation et d'augmenter les compétences locales. Des études devront permettre d'identifier les types d'hydrocarbures ayant le meilleur potentiel pour la production d'électricité.

II.4. Politiques énergétiques

II.4.1. Energies renouvelables

Les potentialités énergétiques et directives politiques pour la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables ainsi que de la filière biomasse sont décrits dans les sections sous-sectorielles de la NPE.

L'établissement d'une cartographie nationale complète des ressources hydroélectriques assorties d'un plan d'investissement facilitera l'exploitation des ressources hydroélectriques de manière optimale.

Des ressources énergétiques océaniques et géothermiques représenteront également un potentiel à explorer, et des études devront être conduites sur les énergies innovantes à travers des financements disponibles pour les technologies d'atténuations climatiques.

II.4.2. Electrification Rurale

L'électrification Rurale recouvre l'ensemble des zones rurales ou périurbaines du territoire de la République de Madagascar sur lesquelles aucune installation n'est implantée.

Chapitre III : ZONE D'ETUDE : SOCIETE STAR ET LA COMMUNE URBAINE D'ANTSIRABE I

La zone d'étude comprend : la société Star et la commune urbaine d'Antsirabe I

III.1. Commune urbaine d'Antsirabe I

III.1.1. Généralité sur le région d'Antsirabe

Antsirabe est une ville des hautes terres de Madagascar, chef-lieu de la région vakinankaratra, dans le centre de l'île. C'est la troisième plus grande ville de Madagascar avec une aire urbaine estimée en 2014 à 257 163 habitants. [33]

III.1.2. Secteur économique [34]

L'économie de la zone est essentiellement basée sur l'agriculture et l'élevage, des activités considérables

Antsirabe, une ville qui a eu le statut de commune urbaine en 1921 est encore marquée par l'agriculture et l'élevage. Les activités primaires dominent dans la commune. Le mode de culture pratiqué dans la Commune est une culture irriguée associée à la culture pluviale. On trouve dans la ville de nombreux types de culture dans la commune urbaine d'Antsirabe vu qu'elle est réputée pour être le berceau des fruits et légumes, on trouve :

Les cultures vivrières telles que la riziculture, la culture du blé, culture de l'orge.

Les cultures de contre saisons c'est-à-dire le manioc, haricot, soja, maïs....

En effet, les produits agricoles offrent aux entreprises industrielles des matières premières nécessaires.

III.1.3. Ville industrielle et touristique

Le secteur industriel et touristique est très présent et dynamique dans la commune urbaine d'Antsirabe. Et ces secteurs font la renommée de la ville. Elle dispose de grandes industries et possède différents potentiels touristiques qu'on ne trouve qu'à Antsirabe.

III.1.4. Grande ville industrielle malagasy

Antsirabe fait partie des grandes villes industrielles de Madagascar. Parmi les nombreuses usines et industries qui sont installées dans la ville, la majorité d'entre eux se trouvent dans le Sud. Et plusieurs d'entre eux ont aussi eu des statuts nationaux et internationaux et jouent le rôle de pourvoyeur d'emploi. La tradition industrielle d'Antsirabe (et de ses environs) est privilégiée par sa situation de carrefour et l'existence simultanée de la route nationale 7 et 34.

Les industries agroalimentaires dont les plus connues sont la STAR, SOCOLAIT, VISYGASY, le Fokontany Tsivatriniakamo, à proximité surtout de l'usine STAR et MALTO ; l'existence de ces industries est la raison pour laquelle il y a mouvement des populations dans la commune. Ils font appel à de différentes populations actives,

III.1.5. Essor des activités commerciales et transports

L'activité commerciale et le transport jouent un grand rôle pour le développement économique de la commune urbaine d'Antsirabe. Pourtant, elle est dominée par les activités informelles comme toutes les villes à Madagascar.

III.1.6. Climatologique dans la région d'Antsirabe

Appartenant aux Haute Terres Centrales Malagasy, la zone d'étude est soumise à l'influence du climat tropical d'altitude marqué par l'alternance de deux saisons bien distinctes, avec 1429mm et 138 jours de pluie par an en moyenne [35]

Un climat, grâce à son altitude (1500m) et sa position par rapport à l'équateur, la commune urbaine d'Antsirabe, notre zone d'étude, et comme tous les districts d'ailleurs, jouit d'un climat particulièrement froid pendant la période d'hiver surtout les mois de juillet et Août.

Mais cette condition climatique de la région offre pour elle une opportunité dans la production de l'orge, matière première de base de la brasserie STAR.

III.2. Société STAR

III.2.1. Historique de la brasserie

L'histoire de la brasserie STAR commence en 1947, l'année où la brasserie d'Antsirabe a été créée par la société ROCHEFORTAISE qui a été animée par Henri LELIEVRE. En 1953, un groupe de promoteurs indépendants sous l'impulsion de M. Miguel EYMARD avait acquis la licence d'embouteillage COCA-COLA (la franchise). Ces promoteurs se rapprochèrent de la société ROCHEFORTAISE, groupe industriel des structures propres à faciliter le développement de cette nouvelle activité.

Ainsi, la brasserie STAR MADAGASCAR a été fondée le 18 septembre 1958. Elle était constituée uniquement de deux usines dont : le département boisson de la société Rochefortaise de produits alimentaires qui avait été créé entre 1947 et 1951 à Antsirabe, la première usine brassicole industrielle que Madagascar ait connue.

III.2.2. Evolution de production

Depuis l'année 2004, la production en litres de la brasserie STAR ne cesse d'augmenter. La production de bière de la brasserie STAR augmente avec un rythme considérable. En effet, La croissance moyenne de la production de cette société est de l'ordre de 4 271 240 litres par

an. En plus, de 2004 à 2009, on constate une augmentation de 38,77% (21 356 200 litres). Alors la production de drêche s'augmente aussi.

III.3. Société MALTO, premier fournisseur des matières premières à la brasserie STAR [36]

III.3.1. Présentation de la société MALTO

La société « Malts et Orge », connue sous le nom MALTO est une société anonyme, filiale de la brasserie STAR, s'est installée à Madagascar au début des années 1980 dont sa mission est de produire du Malt à partir de l'orge pour la fabrication de bières. Elle se situe au point kilométrique 1,8 le long de la route nationale n° 34, en face de la brasserie STAR. Son siège général se trouve à Andranomahery, Antananarivo.

La durée de la Société est fixée à 99 ans à compter du jour de sa constitution définitive. MALTO comprend :

- Une ferme semencière pour la sélection, la maintenance et la multiplication des variétés d'orges ;
- Un service vulgarisation en milieu rural chargé de l'encadrement, des fournitures d'intrants, du suivi technique, de la recherche et développement, de la collecte des récoltes.

La ferme semencière était installée, pour la culture d'orge, dans les zones suivantes :

DEMI-SAISON :

Antanifotsy. Batoho. Ihazolava

CONTRE-SAISON :

Ambositra ; Antsirabe ; Betafo ; Mandritsara ; Manandona ; Tritriva ; Vinaninkarena

III.3.2. Domaines d'activité de la société, et structure organisationnelle

III.3.2.1. Activités

MALTO, dans le cadre de sa participation à la promotion de la culture de l'orge, prend en charge la gestion et l'exploitation de la ferme semencière.

La pré-vulgarisation était commencée en 1985 sur les hauts plateaux tandis que la vulgarisation était commencée effectivement en 1986 dans le secteur de Batoho et Ihazolava. C'était la phase d'accès avec le développement en milieu paysan.

III.3.2.2. Objectifs

Compte tenu de la nouveauté relative de la culture d'Orge, les premiers efforts des promoteurs de MALTO sont de :

- Constituer et de mettre à jour une banque de variétés d'Orge,
- Vulgariser la culture d'Orge.

Par ailleurs, comme toutes les sociétés, MALTO a pour objectifs d'atteindre un meilleur résultat en satisfaisant ses clients.

Elle vise :

- Une meilleure sélection des semences ;
- Une amélioration des rendements ;
- Une extension des surfaces cultivées.

III.3.2.3. Principales zones de production d'orge

Pour assurer l'autonomie en matières premières de la brasserie, la société MALTO a effectué des essais de culture dans différentes régions de Madagascar mais seules trois régions peuvent répondre aux exigences de cette plante surtout sur le cadre climatique et pédologique. Ces régions sont la Haute Matsiatra, Amoron' i Mania et Vakinankaratra.

MALTO et STAR sont deux entreprises inséparables dont la matière première pour la fabrication de la bière est l'orge cultivée par les agriculteurs ; et l'expérimentation se porte sur l'utilisation du coproduit de la fabrication de la bière à savoir le drèche de brasserie pour produire du biogaz en laboratoire.

CHAPITRE IV : LA METHANISATION

IV.1.1 Histoire de la méthanisation [1]

La découverte de la méthanisation remonte à 1776 lorsque A. VOLTA durant une de ses promenades observa que du gaz se libérait d'un marais. Après avoir étudié ce phénomène et fait plusieurs expériences il mit en évidence que le "gaz des marais" était inflammable. Un peu plus tard (1787), A.L. LAVOISIER lui donne le nom de "gas hidrogenium carbonatrum" mais le terme de "méthane" fut proposé en 1865 et confirmé en 1892 par un congrès international de nomenclature chimique. Pendant ce temps, la présence de ce gaz est mise en évidence dans d'autres milieux (dont le fumier) et son origine est attribuée à l'activité microbienne. Celles-ci se développent dans des milieux anaérobies naturels. Le gaz des marais qui contient une forte proportion de méthane provient de la décomposition des déchets organiques végétaux des marécages. Cette décomposition se déroule également dans les lacs et des rizières. Les sols des zones humides tels que les forêts tropicales, la toundra et les tourbières participent aussi à la production du méthane atmosphérique. Enfin, les processus de digestion des animaux libèrent du méthane. Les ruminants et les termites sont la source d'une quantité importante de ce gaz. Les phénomènes anaérobies qui se déroulent dans les sédiments marins sont responsables d'une partie du méthane dissous dans l'eau de mer.

Au début du 20ème siècle, la première installation produisant du méthane voit le jour à Exeter en Grande-Bretagne, elle permet l'éclairage des rues de la ville. Les développements modernes de la méthanisation sont issus des travaux d'IMHOFF sur les boues urbaines et de DUCCELLIER sur les rejets d'élevages.

IV.1.2 Définition [2]

La méthanisation (encore appelée digestion anaérobie) est une technologie basée sur la dégradation par des micro-organismes de la matière organique, en conditions contrôlées et en l'absence d'oxygène (réaction en milieu anaérobique, contrairement au compostage qui est une réaction aérobie).

Cette dégradation aboutit à la production :

- D'un produit humide riche en matière organique partiellement stabilisée appelé digestat. Il est généralement envisagé le retour au sol du digestat après éventuellement une phase de maturation par compostage ;
- De biogaz, mélange gazeux saturé en eau à la sortie du digesteur et composé d'environ 50 % à 70 % de méthane (CH_4), de 20 % à 50 % de gaz carbonique (CO_2) et de quelques gaz traces (NH_3 , N_2 , H_2S). Le biogaz a un Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) de 5 à 7 kWh/Nm³. Cette énergie renouvelable peut être utilisée sous différentes formes : combustion pour la

production d'électricité et de chaleur, production d'un carburant, ou injection dans le réseau de gaz naturel après épuration.

IV.1.3 Avantages

La méthanisation de déchets organiques présente de nombreux avantages, notamment :

- Une double valorisation de la matière organique et de l'énergie ; c'est l'intérêt spécifique à la méthanisation par rapport aux autres filières,
- Une diminution de la quantité de déchets organiques à traiter par d'autres filières,
- Une diminution des émissions de gaz à effet de serre par substitution à l'usage d'énergies fossiles ou d'engrais chimiques,
- Un traitement possible des déchets organiques gras ou très humides, non compostables en l'état, sur les grandes unités, une limitation des émissions d'odeurs a priori du fait de digesteur hermétique et de bâtiment clos équipé de traitement d'air performant.

IV.1.4 Procédé de digestion anaérobie (Ou processus de la méthanisation) [3]

Cette étape est le métabolisme prédominant dans les décharges parce que la pénétration d'oxygène dans la masse de déchets est très faible surtout après leur recouvrement. On peut distinguer quatre phases dans la dégradation anaérobie : l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse qui sont présentées sur la Figure 2 :

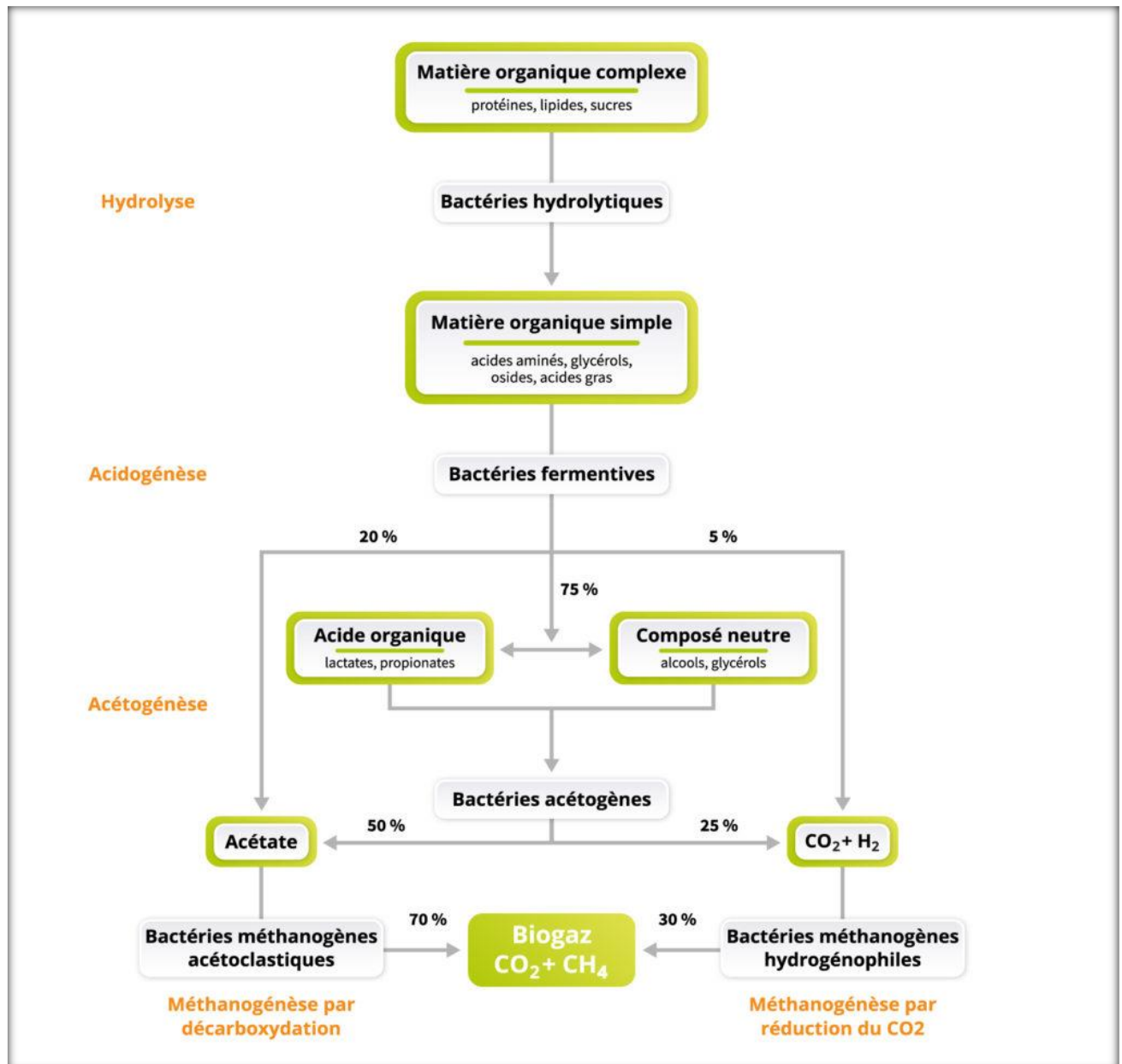


Figure 2 : Les étapes de la digestion anaérobie

IV.1.4.1 Hydrolyse

Les macromolécules organiques (polysaccharides, protéines, composés lipidiques) sont hydrolysées en éléments plus simples, tels que sucres simples, acides aminés, acides gras à courtes chaînes, glycérol.

IV.1.4.2 Acidogénèse

Les substrats issus de la phase d'hydrolyse sont transformés par les bactéries en acides gras volatils, alcools, ammoniac, gaz carbonique et hydrogène. Il est caractérisé par une diminution du pH entre 4,5 à 6,3.

IV.1.4.3 Acétogénèse

Les acides gras volatils (autres que l'acide acétique) sont transformés par les bactéries réductrices acétogènes en acétate, hydrogène et gaz carbonique.

IV.1.4.4 Méthanogénèse

Les substrats issus de la phase d'hydrolyse sont réduits par les bactéries en méthane et dioxyde de carbone.

IV.1.5. Bactéries de la méthanisation [4]

La dégradation de la matière organique en méthane repose sur une interaction stable et complexe de différents groupes de bactéries. Ces dernières sont réparties en quatre groupes trophiques bien distincts.

Les microorganismes du groupe I : Ce sont des bactéries hydrolytiques, qui réalisent l'hydrolyse des lipides, des protéines et des glucides (principalement la cellulose), et les transforment en molécules simples (sucres, acides aminés).

Les microorganismes du groupe II : Ce sont des bactéries fermentaires acidogènes produisant du H₂ et de l'acétate à partir des molécules simples ou de certains acides gras.

Les microorganismes du groupe III : Ce sont les bactéries homoacétogènes. Elles interviennent dans l'acétogénèse, catabolisent les composés monocarbonés (H₂ / CO₂; HCOOH) ou hydrolysent des composés multicarbonés en acide acétique.

Les microorganismes du groupe IV : Il s'agit des bactéries méthanogènes. Elles métabolisent l'acétate ou des composés monocarbonés (formiate ; H₂ / CO₂), en méthane.

IV.1.5.1. Bactéries hydrolytiques et fermentatives [5]

L'étape d'hydrolyse est réalisée par plusieurs groupes d'eubactéries anaérobies strictes et facultatives dont la nature dépend de la composition qualitative et quantitative de l'alimentation. Les principales espèces appartiennent aux genres *Clostridium*, *Bacillus*, *Ruminococcus*, *Enterobacteroides*, *Propionibacterium* et *Butivibrio*. Les micro-organismes acidogènes ont des temps de génération beaucoup plus court que les méthanogènes.

Tableau 2: Temps de génération de différents micro-organismes

Micro-organismes	Temps de génération (en jours)
Micro-organismes	
<i>Bactérioides</i>	>1
<i>Clostridies</i>	1,5
Bactéries acétogènes	3,5
Bactéries méthanogènes	
<i>Methanosarcina</i>	5 à 15
<i>Methanococcus</i>	Environ 10

IV.1.5.2. Bactéries des acidogènes

Les microorganismes responsables de l'acidogénèse sont les bactéries fermentaires et les facteurs qui influencent assez considérablement l'étape d'acidogénèse sont : le pH et la température.

IV.1.5.3. Bactéries acétogènes

Les bactéries acétogénèse constituent la 2^{ème} étape de la méthanisation :
Au cours de cette étape, l'oxydation des substrats (surtout les acides propionique et butyrique et l'éthanol) est couplée à la formation d'hydrogène, de dioxyde de carbone et d'acétate. Elle représente l'activité de trois groupes de bactéries :

- Les homoacétogènes des genres *Clostridium*, *Acetobacterium*, *Sporomusa*, *Acetogenium*,
- Les syntrophes des genres *Syntrophobacter*, *Syntrophomonas*, *Syntrophus*...
- Les sulfato-réductrices des genres *Desulfovibrio*, *Desulfobacter*, *Desulfotomaculum*,

Desulfomonas...

On distingue 2 groupes de bactéries qui participent à cette étape :

Les premières sont les bactéries productrices obligées d'hydrogène qui produisent de l'acétate, de l'hydrogène et du gaz carbonique à partir des produits de l'acidogénèse.

Leur fonctionnement est défavorable d'un point de vue thermodynamique (consommation d'énergie) avec une pression d'hydrogène trop importante. Ainsi l'accumulation d'hydrogène peut conduire à l'arrêt de l'acétogénèse, ce qui implique que ce groupe de bactérie doit être associé à un groupe consommateur d'hydrogène.

Voici les réactions chimiques mises en jeu lors de la dégradation :

- De l'éthanol: $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{COO}^- + 2\text{H}_2 + \text{H}^+$
- Du propionate: $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{COO}^- + 3\text{H}_2 + \text{CO}_2$
- Du butyrate: $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2\text{CH}_3\text{COO}^- + 2\text{H}_2 + \text{H}^+$

Les secondes produisent principalement de l'acétate à partir de l'hydrogène et du dioxyde de carbone comme le montre la réaction chimique suivante.



IV.1.5.4. Bactéries méthanogènes

Les bactéries actives de cette dernière étape sont réunies dans un groupe qui leur est propre, celui des Archae. Elles possèdent, en effet, des caractéristiques spécifiques par rapports aux eubactéries et aux eucaryotes, notamment en ce qui concerne leurs coenzymes. Les Archae constituent un des trois statuts de règne primaire, avec les eubactéries et les eucaryotes.

Deux familles principales de bactéries méthanogènes existent :

La première population comprend les méthanogènes hydrogénophiles qui produisent du méthane à partir d'hydrogène :

- Dioxyde de carbone : $4\text{H}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$
- Formate : $\text{HCOO}^- + \text{H}^+ + 3\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

La deuxième population comprend les méthanogènes acétoclastes qui produisent le méthane à partir d'acide acétique, de méthanol et de méthylamine. On rencontre principalement deux types de bactéries méthanogènes acétoclastes dans les digesteurs anaérobies, les premières utilisent uniquement l'acétate pour produire le méthane alors que les secondes peuvent utiliser l'acétate, le dioxyde de carbone, l'hydrogène, le méthanol, et les méthylamines comme substrat pour produire le méthane.

La réaction suivante montre la conversion de l'acétate en méthane et en dioxyde de carbone :

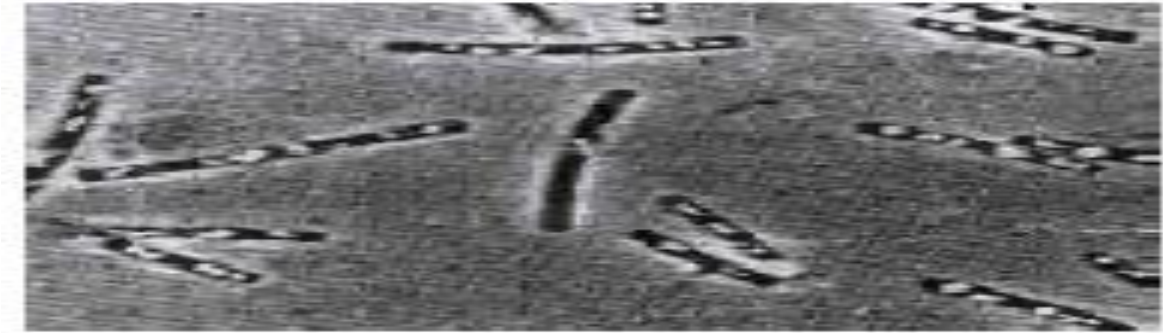


Figure 3 :Bactéries du genre Méthobactérium

Source : <http://biogaz.free.fr/index.html>

IV.1.5.5. Bactéries sulfato-réductrices

Cependant, en marge de la digestion anaérobie, conduisant à la production de méthane, il existe une autre population de bactérie présente dans les digesteurs anaérobies. Cette population bactérienne réduit différents types de molécules sulfatées, le sulfate (SO_4^{2-}), le sulfite (SO_3^-), et le thiosulfate en sulfure (S_2^-). Cette population bactérienne sulfato-réductrice intervient au stade terminal de la dégradation anaérobie, tout comme les éthanogènes. L'acide sulfurique (H_2S) produit par cette réaction possède un effet inhibiteur sur les méthanogènes, soit de manière directe, soit en faisant précipiter les métaux essentiels nécessaires à la méthanogénèse.

Deux comportements de bactéries sulfato-réductrices peuvent être identifiés :

Le premier groupe utilise le lactate afin d'oxyder en acétate et en dioxyde de carbone. Ce groupe peut en outre utiliser certains produits de la première étape de fermentation tels que l'éthanol, le fumarate, le malate, le pyruvate....

Le deuxième groupe utilise l'acétate, des acides gras à longues chaînes, certains composés aromatiques qu'il oxyde entièrement jusqu'à l'obtention de dioxyde de carbone.

IV.1.6. Facteurs physico-chimiques [6]

Comme tout micro-organisme, la population bactérienne qui constitue le consortium méthanogène exige des conditions particulières pour sa croissance. Les principaux facteurs physico-chimiques qui affectent le procédé de digestion anaérobie sont le pH, la température et le potentiel d'oxydoréduction

IV.1.6.1. pH

Le pH optimum de la digestion anaérobie se situe autour de la neutralité. Il est le résultat du pH optimum de chaque population bactérienne : celui des bactéries acidifiantes se situe entre 5,5 et 6, les acétogènes préfèrent un pH proche de la neutralité tandis que les méthanogènes ont une activité maximale dans une gamme de pH comprise entre 6 et 8. Toutefois, la méthanisation peut se produire dans des milieux légèrement acides ou alcalins.

IV.1.6.2. Température

L'activité du consortium méthanogène est étroitement liée à 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.

La majorité des espèces bactériennes a été isolée dans des environnements mésophiles, mais tous les groupes trophiques des étapes de digestion anaérobie possèdent des espèces thermophiles utilisant les mêmes voies métaboliques que les bactéries mésophiles avec des performances analogues. Il reste possible de travailler à des températures différentes des optima avec des performances plus faibles.

IV.1.6.3. Potentiel d'oxydoréduction

Ce paramètre représente l'état de réduction du système, il affecte l'activité des bactéries Méthanogènes. Ces bactéries exigent en effet, outre l'absence d'oxygène, un potentiel d'oxydoréduction inférieur à 330 mV pour initier leur croissance.

IV.1.7. Résultats de la digestion [7]

La méthanisation a pour principal résultat la production d'un combustible gazeux, source énergétique appelé méthane (CH₄), et d'autres types de gaz accompagnant sa production. L'ensemble de tous ces gaz forme le biogaz.

Parallèlement, il y a également production de résidus organiques solides appelés digestats qui sont riches en éléments fertilisants, les rendant intéressants pour l'agriculture. En effet, les digestats ont des effets positifs sur la qualité aussi bien chimique et microbienne des propriétés du sol.

CHAPITRE V. LE BIOGAZ [8]

C'est un gaz issu du processus de dégradation biologique de matières organiques en l'absence d'oxygène, il contient, majoritairement, du méthane(CH_4) et du dioxyde de carbone (CO_2). Il est produit dans les installations de stockage des déchets ou encore dans les méthaniseurs ou biodigesteurs.

V.2.1. PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DE PRODUCTION DE BIOGAZ

V.2.2. Température [9]

La durée de fermentation et la condition de vie de la bactérie dépendent de la température. Celle-ci influence donc la quantité de biogaz produite chaque jour. La fermentation anaérobie peut avoir lieu à l'intérieur de trois plages de température correspondant à trois régimes de fonctionnement de l'unité de méthanisation.

Tableau 3 : Plage de la température

Type	Température [°C]	Durée de fermentation en [j]
Bactérie Psychrophile	10 à 20	70 à 80
Bactérie Mésophile	20 à 40	40 à 50
Bactérie Thermophile	50 à 74	15 à 20

La zone thermophile est caractérisée par :

- Une forte production en biogaz et une destruction des pathogènes (plus la température est élevée plus la durée de fermentation diminue et le gaz produit est important)
- Un excès d'énergie pour le chauffage
- Une fragilité du système : les bactéries sont sensibles au changement de température

Pour garder une variation stable des micro-organismes dans le réacteur, il faut réguler la température.

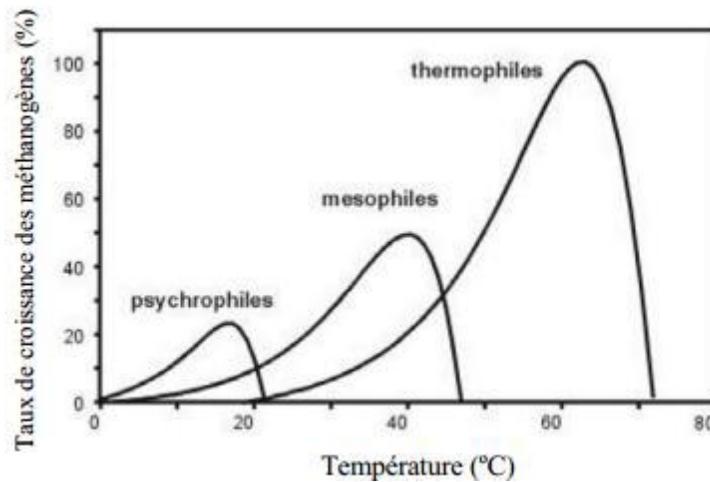


Figure 4 : Effet de la température sur le taux de croissance des bactéries [10]

V.2.3. Le rapport carbone/azote(C/N)

Il est couramment admis qu'un rapport C/N/P de 100/5/1 est optimal pour les processus biologiques. Dans le cas de la méthanisation, il est possible de produire du biogaz aussi bien avec du fumier (C/N = 30) ; pour les drèche C/N (36/6).

V.2.4. L'humidité [11]

L'eau est indispensable pour toute activité biologique. Sa quantité dépend de la matière à fermenter. Les bactéries de méthane ne peuvent exister et se multiplier qu'à un taux d'humidité de 50 % au minimum. L'humidité au-dessus de 94 à 95 % implique un rendement plus bas de la production de méthane. Pour le cas des produits plus secs (litière de volaille par exemple), une humidification selon le besoin du produit doit être effectuée.

V.2.5. L'absence d'air ou anaérobiose [5]

Le deux premiers processus (hydrolyse et acidogenèse) peuvent se dérouler en milieu aérobie, c'est-à-dire en présence d'oxygène, par contre, l'acétogenèse et le méthanogenèse se développent strictement en milieu anaérobie. De plus, les bactéries méthanogènes n'agissent qu'à bas potentiel redox (-300 à -330 mV). D'où la nécessité de bien assurer l'étanchéité du digesteur contre la contamination d'oxydants.

V.2.6. L'agitation

Cette opération consiste à bien mélanger les matières premières avec de l'eau pour obtenir un substrat homogène. Cela a pour but d'éviter la formation d'une croûte surnageant empêchant la sortie du biogaz et d'optimiser la multiplication des contacts entre les substrats à digérer et la flore bactérienne.

V.2.7. Composition chimique du biogaz

Provenant de la fermentation anaérobie de la matière organique, le gaz de décharge est composé principalement du méthane (~55%) et du gaz carbonique (~40%), et est généralement saturé en vapeur d'eau. [12]

Méthane (CH₄) – c'est un gaz inodore et incolore, plus léger que l'air. Il est inflammable : entre 5% et 15% de concentration volumique (v/v) dans l'air le mélange gazeux est explosif. PCI* volumique du méthane = 35,88 MJ/m³, PCI massique = 50,04 MJ/ kg.

Dioxyde de carbone (CO₂) – c'est un gaz inodore et incolore, plus lourd que l'air. Il n'est ni inflammable ni toxique. En revanche, il diminue la teneur en oxygène ce qui peut provoquer l'asphyxie.

Hydrogène sulfuré (H₂S) – c'est un gaz avec une odeur caractéristique dite « d'œuf pourri » (détectable à partir de 0,7 ppm, à partir de 150 ppm il inhibe l'odorat), plus lourd que l'air. Il est inflammable et très toxique. Il provoque nausées, céphalées et vomissements. A haute concentration (>700 ppm) il affecte le système nerveux central et provoque la mort.

Mercaptans (S_xH_y) – ce sont des composés organiques soufrés qui sont très malodorants et souvent toxiques.

Composés organiques volatils (COV : hydrocarbures aliphatiques et aromatiques, composés halogénés) – certains COV sont toxiques, en particulier le benzène qui est cancérigène.

V.2.8. Qualité du biogaz [14]

Le biogaz est essentiellement un mélange de méthane (CH₄) et de dioxyde de carbone (CO₂) auxquels viennent s'ajouter de la vapeur d'eau et divers gaz à l'état de traces.

Le plus important, dans ce mélange gazeux, c'est sa teneur en méthane puisque ce dernier est l'élément combustible du biogaz et que par conséquent il influence directement son pouvoir calorifique. Les possibilités d'influencer la composition du biogaz au moyen d'un contrôle sélectif du processus sont très limitées.

Premièrement et avant tout, la composition du biogaz dépend de la composition des matières introduites.

Par ailleurs, la teneur en méthane dépend de paramètres de fonctionnement tels que la température de digestion, la charge du réacteur et le temps de séjour hydraulique, ainsi que d'éventuelles perturbations du processus et de la méthode de désulfuration biologique utilisée.

Le rendement en méthane possible est essentiellement déterminé par la composition du substrat, En ce qui concerne la qualité du mélange gazeux, la concentration d'hydrogène sulfuré (H₂S) à l'état de traces dans le gaz joue un rôle important. Elle ne doit pas être trop forte, car même en faibles concentrations l'hydrogène sulfuré peut avoir un effet inhibiteur sur le

processus de dégradation. Par ailleurs, les fortes concentrations de (H_2S) dans le biogaz peuvent entraîner des problèmes de corrosion dans une unité de cogénération de chaleur et d'électricité ou dans une chaudière de chauffage.

Tableau 4 : Aperçu de la composition moyenne du biogaz.

Composants	Concentration
Méthane [CH_4]	50 – 75 % volume
Dioxyde de carbone CO_2]	25 – 45 % volume
Eau [H_2O]	2 – 7 %[20 -40°C]
Sulfure d'Hydrogène[H_2S]	< 1 % volume
Azote [N_2]	< 2 % volume
Oxygène [O_2]	< 2 % volume
Hydrogène [H_2]	< 1 % volume

V.2.9. Utilisations et valorisations du biogaz [15]

Le biogaz peut être utilisé comme source d'énergie pour des usages familiaux, agricoles ou même industriels. Il peut être utilisé soit directement comme combustible, soit comme source d'autres types d'énergie, mécanique ou électrique selon les besoins.

V.2.9.1. Cuisson

L'utilisation du biogaz comme combustible pour la cuisson requiert des brûleurs spécialement conçus à cet effet, ou bien des brûleurs fonctionnant au propane et au butane mais adaptés, en jouant sur le diamètre du gicleur et sur l'entrée d'air.

V.2.9.2. Réglage des brûleurs.

Il est très important de noter que la vitesse d'inflammation du biogaz est de moins de 130 centimètres/seconde, de sorte que si on laissait les brûleurs tels quels, les flammes seraient soufflées avant d'avoir pu enflammer le gaz.

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

V.2.9.3. Eclairage

Après la cuisson, l'éclairage vient en second lieu dans l'application du biogaz. Comme dans l'utilisation des brûleurs, l'utilisation des lampes comporte la détermination de la pression

d'alimentation ainsi que la gazométrie des orifices. Les lampes à gaz se divisent en trois catégories :

- à simple courant d'air ; à double courant d'air ;
- à manchon. Exemple « Eclairage $\longrightarrow$ 70 dm³ par manchon/heure »

V.2.9.3. Motorisation [16]

Le biogaz peut servir de carburant pour alimenter un moteur à poste fixe ou mobile (CNRIT, 1990). L'énergie mécanique produite par la combustion du biogaz dans un moteur peut être utilisée directement pour assurer la production d'énergie motrice ou pour faire tourner un générateur pour la production d'électricité.

Le biogaz peut alimenter aussi bien les moteurs à compression (Diesel) qu'à allumage. Ce dernier est modifié, par l'utilisation d'un carburateur à gaz, pour fonctionner au biogaz. L'allumage n'a pas à être modifié autrement que par des ajustements mineurs du cycle.

Exemple : Moteur à essence $\longrightarrow$ 1, 35 à 1, 90. m³ de cylindrée/heure

Moteur diesel $\longrightarrow$ 1,5 à 2 m³ par dm³ de cylindrée/heure

V.2.10. Equivalence et pouvoir énergétique du biogaz [17]

Le biogaz, dont le pouvoir calorifique varie de 6 à 6,5 kWh/m³ peut donc être directement brûlé pour produire de la chaleur (pour la cuisson, le chauffage, l'éclairage, etc.) ou transformer en électricité (avec perte de chaleur) via des générateurs adaptés. 1 m³ de biogaz (qui peut être produit par un biodigester domestique de 4 à 8 m³, selon la technologie, le remplissage quotidien, etc.) équivaut à la consommation d'environ 2 kg de bois ou de résidus agricoles ou 1 kg de charbon. On peut également noter qu'il faut environ 140 L (0,140 m³) de biogaz pour cuire 0,5 kg de riz à l'aide d'un ricecooker (cuisinier de riz).

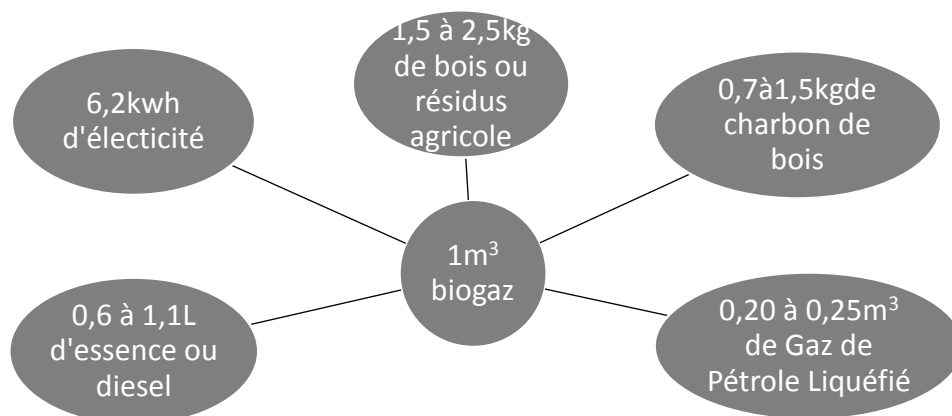


Figure 5 : Equivalence quantitative du biogaz

V.3. Les Bioréacteurs de la méthanisation

Les bioréacteurs utilisés pour la digestion de la matière organique sont appelés des digesteurs.

Ils ont comme caractéristique principale une aptitude à fournir une condition d'anaérobiose à l'enceinte, qui est fondamentale pour le déroulement des réactions.

V.3.1. Définition [18]

Le digesteur, aussi appelé **réacteur à biogaz** ou **méthaniseur** est l'installation où la fermentation va se produire. C'est une enceinte confinée sans aération pour le développement de la flore microbienne. Les matières organiques y subissent une décomposition bactérienne avec émission de gaz. Le gaz se forme et remonte à la surface ; les boues digérées accumulées au fond, appelées digestat, peuvent être vidangées et utilisées comme engrais. C'est pourquoi le digesteur nécessite une attention particulière depuis sa conception et pendant son exploitation.

- La confection des digesteurs peut être obtenue soit par des réservoirs préfabriqués, soit des dômes en brique ou en béton. On peut choisir le digesteur selon trois (3) types différents :
- Les digesteurs semi-continus conventionnels.
- Le digesteur continu de type Chinois
- Le digesteur discontinu d'origine **française** de type ISMAN - DUCCELLIER

V.3.2. Les digesteurs semi-continus :

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

V.3.3. Les digesteurs continus de type Chinois

L'alimentation et la vidange du digesteur se font en permanence avec une quantité entrante équivalente à celle sortante. Ils sont bien adaptés au traitement des déchets liquides. Ce sont les plus fréquents car ce sont aussi les moins exigeants en maintenance.

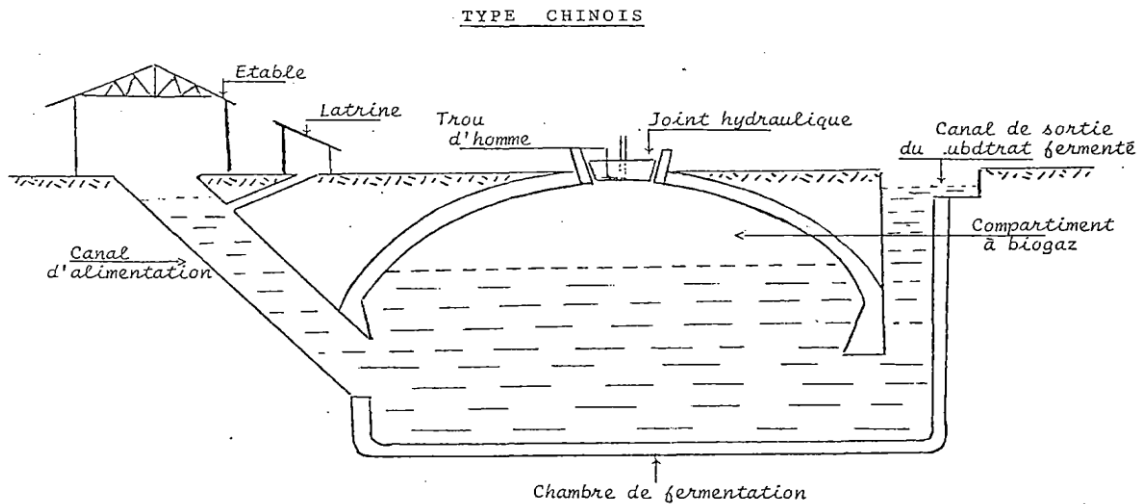


Figure 6 : Digesteur continu de type chinois

V.3.4. Les digesteurs discontinus, dits « batch » :

Les digesteurs sont remplis puis vidés séquentiellement lorsque la production de biogaz chute ou devient nulle. La production de biogaz n'est donc pas régulière. Ces systèmes, rustiques et d'une grande simplicité technique, sont avantageux pour traiter les déchets solides comme les fumiers, les résidus agricoles ou les ordures ménagères.

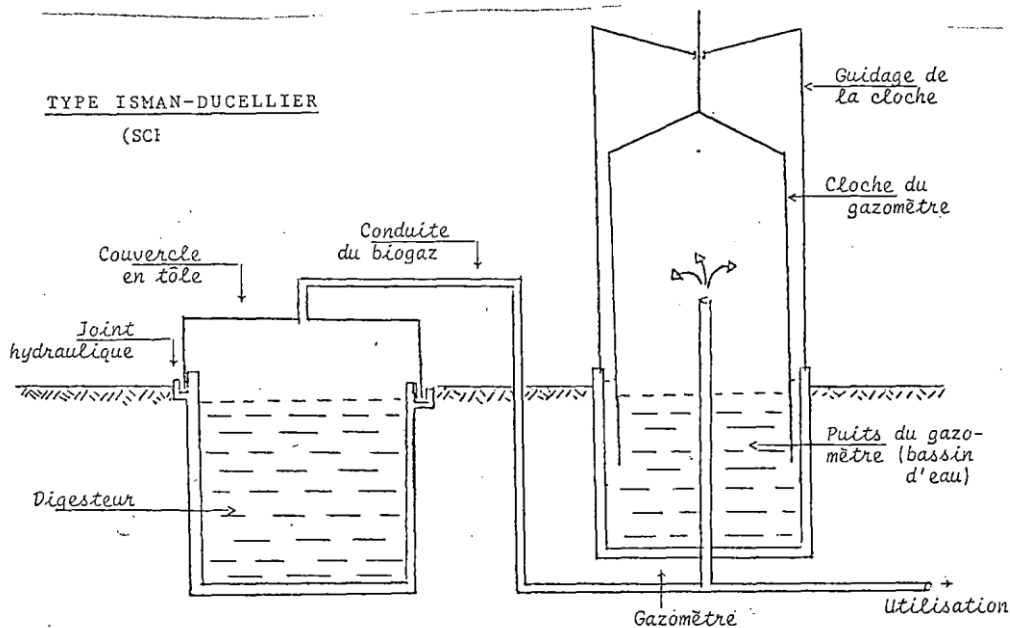


Figure 7 : Le digesteur discontinu de type isman-ducellier

CHAPITRE VI : LES DRECHES DE BRASSERIE

Quasiment toutes les matières organiques fermentescibles peuvent faire l'objet de la digestion anaérobie et produire du méthane. Mais dans le cas de la présente étude, les matières premières à digérer ou substrat sont les drêches de brasserie dans le société star Antsirabe.

VI.4.1. Définition et origine

Les drêches de basserie sont définies, comme étant les résidus séchés de malt d'orge, seuls ou mélangés avec d'autres céréales, résultant de la fabrication du moût ou de la bière et pouvant contenir du houblon séché pulvérisé en quantité n'excédant pas 3%. [19]

L'orge est la céréale la plus importante au monde après le blé, le maïs et le riz. Elle est utilisée principalement comme aliment pour animaux ou comme matière première pour produire de la bière. Le grain d'orge est riche en amidon et en protéines. [20]

VI.4.2. Etapes de production des drêches de brasserie

Pour obtenir les drêches (Figure), l'orge est d'abord maltée, ce processus se décompose en trois grandes étapes : le trempage, la germination et le touraillage. L'objectif du maltage est de produire des enzymes et de préparer l'albumen pour sa dégradation lors du brassage [21]

Tout d'abord les grains d'orge sont nettoyés pour éliminer toutes les impuretés, puis calibrés afin de retirer les grains endommagés et de ne conserver que les grains ayant une taille la plus proche possible de 2,5mm. Les grains d'orge sont par la suite trempés dans des conditions de chaleur et d'humidité permettant leur germination [22]

La germination permet alors au scutellum et à la couche à aleurone de produire les enzymes nécessaires à la modification du grain telles que les β -glucanases, α -amylases, xylanases et les protéases [23] C'est la synthèse de toutes ces enzymes qui permet de transformer l'albumen amylacé afin de le rendre hydrolysable en sucres simples lors du brassage.

Les grains sont finalement soumis au touraillage qui consiste à sécher le grain grâce à de l'air chaud jusqu'à éliminer toute activité de développement embryonnaire et de stabiliser le malt.

Le grain est également dégermé afin d'éliminer les radicules. Durant cette phase, l'humidité du malt passe de 44-45 % à 3-4 %. [24]

Les grains de malt seront par la suite concassés en séparant les enveloppes (appelées par la suite drêches) du reste du grain qui est transformé en farine puis mélangé avec de l'eau et brassé : c'est la phase de l'empâtage. Le mélange est ensuite soumis à des paliers de températures successifs qui permettent l'action des enzymes en fonction de leur température

optimale d'activité. La macération conduit à un liquide (le moût) riche en sucres et en matières azotées assimilables par les levures, c'est ce liquide qui sera transformé en bière.

La phase solide, composée des grains résiduels donnera les drêches de brasserie.

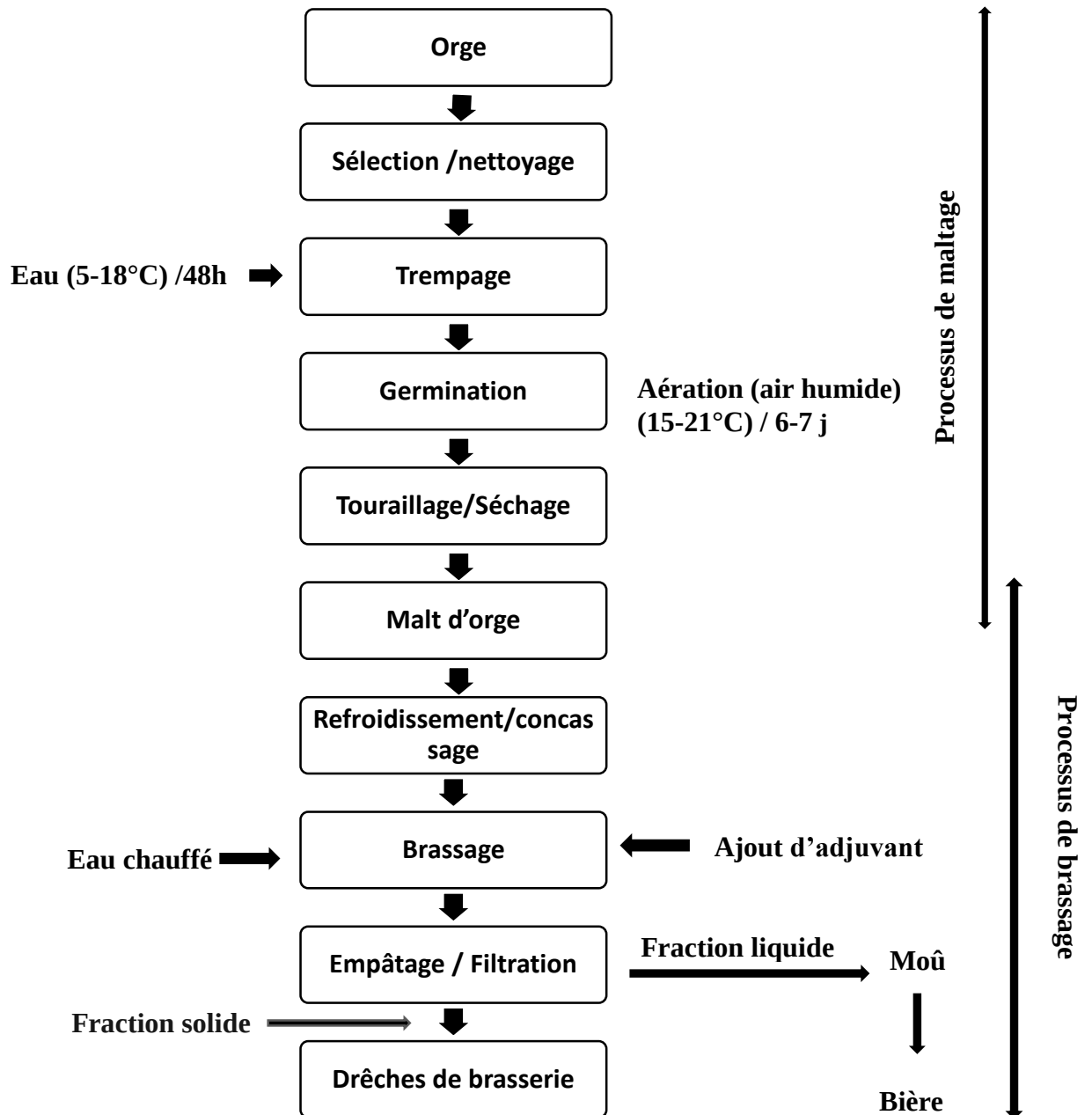


Figure 8 :Schéma représentatif du processus d'obtention des drêches de brasserie

VI.4.3. Composition chimique des drêches de brasserie

Les drêches de brasserie sont de hautes valeurs nutritives [25], et contiennent de la cellulose, des hémicelluloses, de la lignine et une teneur élevée en protéines. Cependant, leur composition chimique (Tableau) est variable en fonction de la variété d'orge, du moment de la récolte, du maltage et du broyage, ainsi que de la qualité et du type d'adjuvants ajoutés dans le processus de brassage (Huige, 1994, Santos *et al.*, 2003 et Westendorf et Wohlt, 2014). [26]

Tableau 5 : Composition chimique des drêches de brasserie rapportée par la bibliographie [27]

Composition% MB	DePeter et al. (2000)		Westendorf et Wohlt (2002)	Mussato et Roberto (2005)	Mussatto et al. (2008)	Thomas et al. (2010)	Wang et al. (2014)
	Drêches séchées	Drêches humide	Drêches humide	Drêches humide	Drêches humide	Drêches humide	Drêches humides
Matière minéral	4,5	4,28	4,5	4,6	4,6	-	-
Protéine	23,6	27,0	28	15,3	-	27,8	29,6
ADF	25,7	18,0	23	27,8	27,8	16,1	23
NDF	51,4	37,3	50	-	-	59,8	47

ADF : Acid Detergent Fiber

NDF : Neutral Detergent Fiber

VI.4.4. Valorisation et utilisation en production [28]

Les drêches de brasserie, coproduit agroindustriel, sont souvent utilisées en alimentation animale. Cependant, elles ont été également introduites dans plusieurs domaines tels que : l'alimentation humaine, la biotechnologie, l'énergie et récemment les recherches se sont orientées vers la possibilité de les exploiter dans la production de biomatériaux.

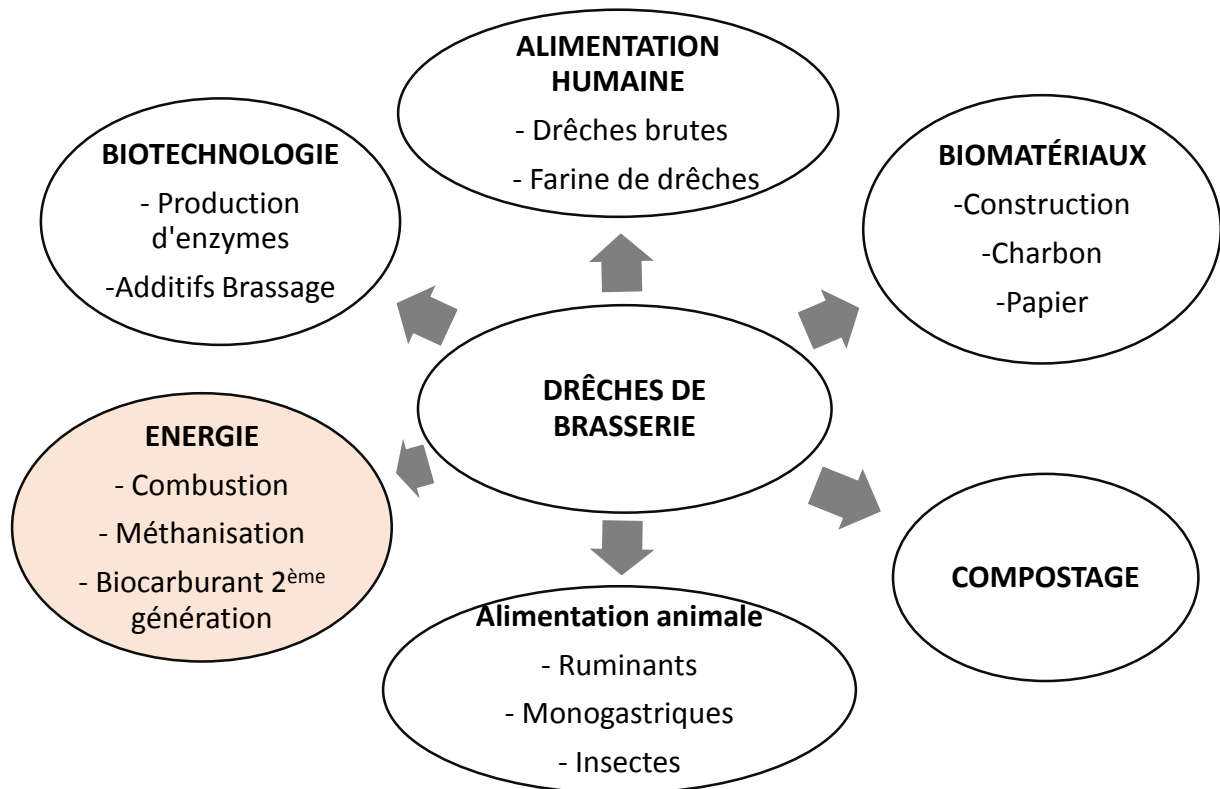


Figure 9 : Les différentes voies d'utilisation des drêches de brasserie

VI. 4.5. Conservation et stockage [29]

En raison de leur taux d'humidité élevée (80%) et de leur teneur en sucres fermentescibles, les drêches de brasserie se détériorent très facilement à cause de la croissance de bactéries, de levures et de champignons ce qui réduit le temps de leur stockage qui ne doit pas dépasser 7 jours. Alors la présence de leur humidité est très importante par ce qu'il facilite le phénomène de méthanisation.

Conclusion partielle

La production de gaz d'origine organique à forte proportion en méthane, dénommé biogaz, à partir de la digestion de la matière organique requiert un processus biochimique appelé méthanisation ou fermentation méthanique. Il s'agit d'une réaction catabolique de dégradation de la matière organique se déroulant en anaérobiose, faisant intervenir l'action d'une population mixte et complexe de microorganisme, essentiellement des bactéries appartenant à la classe des Archaeobactéries. La méthanisation est toujours accompagnée d'une multitude de réactions accessoires qui aboutissent à la formation de nombreux composés de nature différente. C'est ce qui explique la complexité de la composition chimique du biogaz, dont la mise au point d'une technologie de production constitue l'essentiel de la 2ème partie.

DEUXIEME PARTIE

MATERIELS ET METHODES

CHAPITRE VII : MATERIELS

VII.1 Matières premières.

Les essais expérimentaux de méthanisation des drêches d'orge afin de produire du biogaz ont pour objectif d'étudier les caractéristiques de la digestion anaérobie de cette matière organique nouvellement utilisée dans ce domaine, et de déterminer sa potentialité à produire du biogaz.

VII.2. Etude physico chimique de matière première

▪ Taux de matière sèche (M S)

Le tableau 6 illustre la composition des différents types de drêche pour 1 kg de MS.

Tableau 6 : La composition des différents types de drêche .

Type de drêche	MS en %	Matière Azote en %
Brasserie	85	30
Mais	88	28
Blé (riche amidon)	91	31,6
Blé(pauvre amidon)	91	37,6

VII.3. Matériels utilisés pour la production du biogaz

On se réfère aux matériels et instruments nécessaires pour la réalisation des essais de digestion anaérobie de production de biogaz. Ce sont principalement les digesteurs à biogaz, les gazomètres de récupération, les tuyaux de conduite, le bac de récupération et le bac d'immersion.

VII .3.1. Digesteurs

Le type de digesteur utilisé lors de ces essais expérimentaux de digestion anaérobie des drêches est un digesteur en verre en forme de bouteille de capacité 5 litres.



Photo1 : digesteur Source Auteur (19/10/22)

VII.3.2. Gazomètre

Le gazomètre est en polyéthylène transparent, de forme cylindrique avec un diamètre de base 14 cm et de hauteur 30 cm, gradué de haut vers le bas et dressé verticalement. Il est rempli entièrement d'eau en début de fermentation. Le niveau d'eau diminue au fur et mesure que du biogaz se forme à l'intérieur pour se déplacer vers le bac de récupération reliée au gazomètre.



Photo 2 : Gazomètre Source : Auteur (19/10/22)

VII.3.3. Bac d'immersion des digesteurs

Le bac d'immersion est une grande cuve cubique, de capacité d'environ 40 litres, suffisant pour contenir jusqu'à 8 digesteurs de laboratoire et entièrement ouvert à la partie supérieure. Elle est remplie d'eau jusqu'au 2/3 de sa capacité qui est chauffée avec une résistance afin de réguler la température à l'intérieur des digesteurs.



Photo 3: Bac d'immersion contenant des digesteurs Source : Auteur (19/10/22)

VII.3.4. Bac de récupération

Le bac de récupération est une grande cuve de forme cubique, de capacité d'environ 30 litres, et muni d'une ouverture en dessous lui permettant de se connecter aux gazomètres à l'aide de tuyaux. Elle est remplie de 25 litres d'eau salée de concentration en NaCl égale à 24 g/l, son orifice inférieur est connecté à celui du gazomètre grâce à une conduite en tuyau.



Photo 4 : Bac de récupération Source auteur (19/10/22)

VII.3.5. Installation du dispositif expérimental

Les digesteurs immergés dans le bac d'immersion de couleur blanche (en arrière-plan) sont connectés, à l'aide de tuyaux, respectivement un par un aux gazomètres cylindriques (en premier plan) par l'intermédiaire de leurs orifices supérieurs.



Photo 5 : Dispositif expérimental installé Source : Auteur (19/10/22)

Les gazomètres sont aussi connectés, grâce à leurs ouvertures inférieures, au bac de récupération de couleur bleue claire.

VII.3.6. Résistance chauffante

Une résistance chauffante à extrémité en spirale est immergée dans l'eau dans laquelle baignent les digesteurs. Elle assure le chauffage de l'eau et règle ainsi la température à l'intérieur de ces digesteurs. La partie chauffante de la résistance immergée dans l'eau transmet à celle-ci une température de digestion voisine de 35° Celsius.

La Figure 10 illustre le dispositif expérimental au complet.

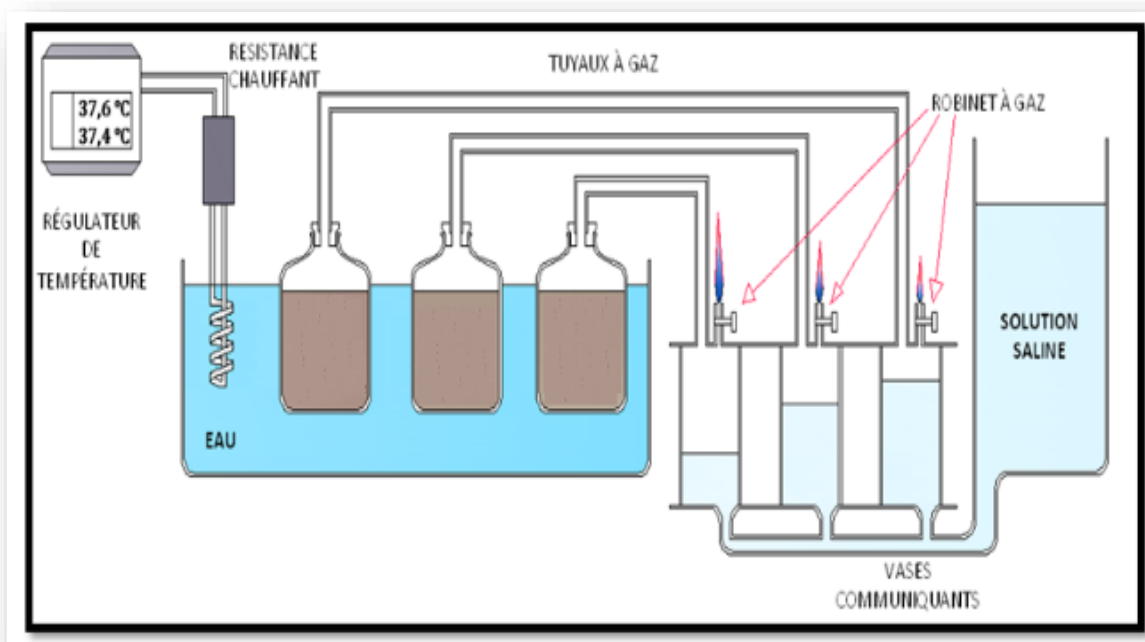


Figure 10 :Schéma de dispositif du digesteur de laboratoire du CNRIT

VII.3.7. Tuyauterie conduite

Il s'agit de tuyauteries en polyéthylène assurant l'acheminement des biogaz produits dans les digesteurs vers les gazomètres.

VII.3.8. Balance

Nous avons utilisé la balance de précision pour peser les matières premières.



Photo 6 : Balance de précision source Auteur (19/10/22)

VII.4. METHODE POUR LA METHANISATION

Les matériels de laboratoire pour la bio méthanisation ou la fermentation a été effectuée au sien du laboratoire du département Energétique du Centre National de Recherches Industrielle et Technologie ou CNRIT.

VII.4.1. Méthodologie pour la fermentation.

Dans ces essais expérimentaux, l'objectif visé est l'optimisation des résultats. Ainsi, deux différentes formulations relatives au rapport quantitatif entre substrat de fermentation, milieu réactionnel et ferment d'ensemencement ont été effectuées afin de déterminer celles fournissant un rendement de production en biogaz optimal.

VII.4.1.1. Formulations

Les connaissances antérieures acquises dans le domaine indiquent que la procédure à adopter est l'introduction de 1500 g de drêches d'orge dans le digesteur et le ferment est 10% de masse du substrat et 2/3 du volume du digesteur est utilisé. En se basant sur le taux d'humidité des drêche (environ 80 %).

Tableau 7: Formulation des substrats à fermenter pour le digesteur de 5 litre.

Formulation	Substrats(g)	Eau (l)
F1(drêche d' orge)	1500	2
F2(ferment)	150	2

VII.4.1.2. Objectifs

L'objectif entrepris lors des essais est la détermination de celle fournissant un meilleur rendement de production et exploitant en optimum les possibilités des réacteurs.

VII.4.2. Manipulation lors de la réalisation des expérimentations.

Il s'agit de la description précise des différentes étapes à suivre et à respecter afin de bien mener les essais relatifs aux opérations de digestion anaérobie de drêches.

VII.4.2.1. Préparation et introduction des substrats

La préparation des substrats consiste : à peser séparément et respectivement, d'abord le substrat proprement dit, c'est-à-dire les drêches, ensuite la bouse de vache qui va servir de ferment ; et à mesurer à l'aide d'un récipient la quantité d'eau à utiliser. On les introduit ensuite tous ensemble dans le réacteur.

VII.4.2.2. Installation et adaptation des matériels

Par ordre chronologique, la mise en place et l'adaptation des matériels sont : la fermeture hermétique par pression du digesteur à l'aide de bouchon en caoutchouc, l'introduction des digesteurs dans le bac d'immersion, et la remise à zéro du compteur des gazomètres. Cette dernière consiste à ouvrir l'orifice supérieur des gazomètres qui crée une variation de pression à l'intérieur et aspire l'eau s'écoulant venant du bac de récupération pour les remplir.

VII.5. Evolution de la digestion anaérobie

Le suivi de l'évolution du processus de fermentation méthanique de production de biogaz a permis d'étudier, suivre et enregistrer quotidiennement la quantité de biogaz produite. En outre, il s'est étendu à la caractérisation des produits finis (biogaz et fertilisants) ainsi qu'à une déduction d'un bilan concernant le processus. Les résultats de la production de biogaz qui sont présentés dans la troisième partie.

VII.5.1. Projet de construction de digesteur et Application en grandeur réelle

Le but de ces expériences de production de biogaz en laboratoire est la perspective d'application future en grandeur réelle de la technologie. C'est ainsi que cette étude de faisabilité contient et entreprend déjà les premières démarches relatives à cette future pratique. L'évolution de la quantité des productions des drêches d'orge dans la société STAR Antsirabe I à valoriser qui conditionne le dimensionnement des installations et la production prévisionnelle est primordiale.

VII.5.2. Etude de la disponibilité de drêche

Le dimensionnement de l'installation de production de biogaz ; en particulier le digesteur dépend particulièrement de la disponibilité en drêche à fermenter, mais aussi des besoins énergétiques à satisfaire et à couvrir. La totalité de matières premières disponible par jour est de 30 000 kg/j ou 30 t/j.

Tableau 8 : Quantité de matière première disponible par jour

Période	Jours (tonne)	Mois(tonne)	Année(tonne)
Mort	30	900	10800
haute	55	1650	19800

Source : auteur (10/09/22)

VII.5. 2. Cloche Gazomètre

La cloche gazométrique ou plus précisément le gazomètre en forme de cloche se situe sur la partie supérieure et aérienne du bioréacteur. Elle est construite à partir de tôle métallique, forgée et dressée afin de lui conférer une forme voisine de celle d'une cloche géante. Le volume du réservoir varie selon la quantité de gaz qu'il contient, la pression étant assurée par une cloche mobile verticalement.

VII.5. 3. Compartiment d'introduction de substrat

Il est formé, d'abord d'un bassin de forme circulaire servant à introduire les substrats, et ensuite se poursuit sur une ouverture inférieure qui conduit à une canalisation débouchant à la chambre de digestion. la canalisation va permettre aux substrats de parvenir à cette dernière.

VII.5. 4. Evacuation des résidus solides

Quasiment en symétrie avec la partie d'introduction des substrats, la partie d'évacuation des résidus solides est également formée de canalisation inclinée obliquement et débouchant vers l'extérieur. Le dénivellement de 30 cm ainsi que la différence de densité entre substrats et résidus solides faciliteront l'évacuation de ces derniers vers l'extérieur.

VII.5.5. Dimensionnement du réacteur.

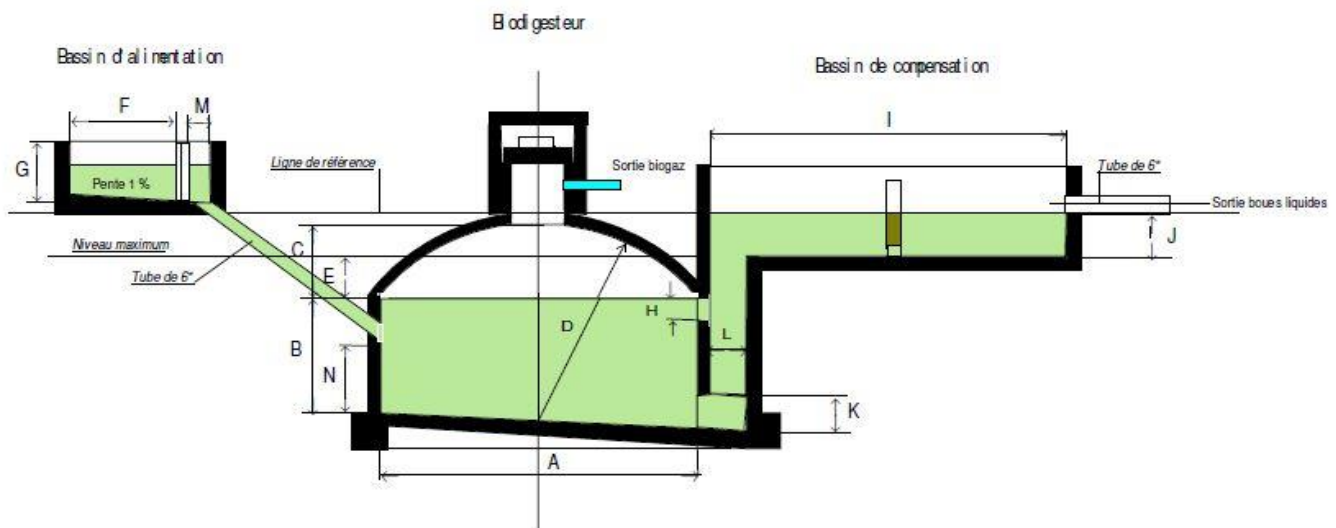


Figure 12 :Cotes des digesteurs vue latérale.

Les tableaux 9 et 10 montrent le dimensionnement de quelques volumes de digesteur

Tableau 9 : Cotations des digesteurs vus latérale

Volume	Volume	Valeurs de la cote								
Digesteur	Bassin	A	B	C	D	E	F	I	J	N
m ³	m ³	m	m	m	m	m	m	m	m	m
4	0,84	2,2	0,8	0,5	1,3	0,3	0	1,6	0,3	0,5
8	0,39	2,8	1,0	0,7	1,7	0,6	0	3,7	0,2	0,5
12	2,22	3	1,1	0,7	1,9	0,4	0	2,3	0,5	0,8
48	10	4,8	1,8	1,2	3,0	0,7	1	4,5	0,6	1,4
70	10	5,7	2,1	1,4	3,5	0,4	2	4,2	0,7	1,7
90	23,17	6,2	2,3	1,5	3,9	0,4	2	4,9	1,2	1,4

Source CIRAD-EMVT BP 427

Figure 13 : Cotations des digesteurs vus de dessus

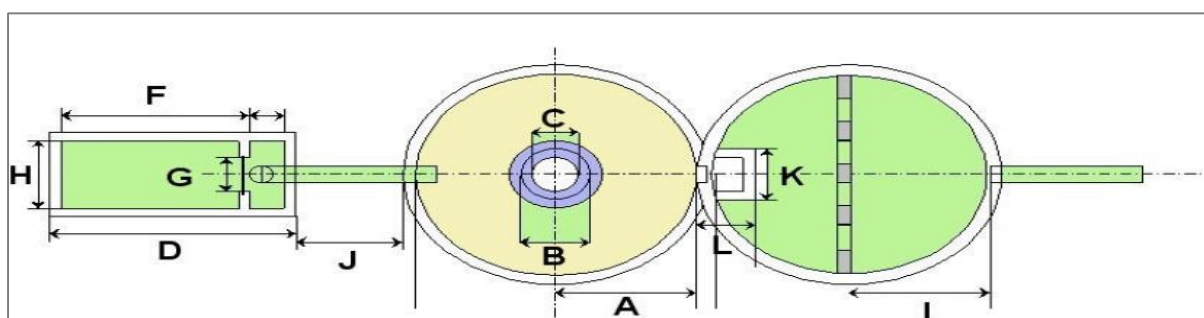


Tableau 10: Cotations des digesteur vus de dessus

Volume	Valeur de cote											
Digesteur	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
m ³	M	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
4	1,1	0,74	0,54	1,35	0,3	0,6	0,3	0,6	0,83	1	0,6	0,6
8	1,42	0,74	0,54	1,35	0,3	0,6	0,3	0,6	1,86	1	0,6	0,6
12	1,5	0,74	0,54	1,65	0,3	0,9	0,3	0,8	1,19	1	0,6	0,6
48	2,44	0,74	0,54	2,25	0,3	1,7	0,5	1,1	2,27	1	0,8	0,8
70	1,86	0,74	0,54	2,25	0,3	2	0,3	1,1	2,13	1	0,8	0,8
90	3,13	0,74	0,54	2,25	0,3	2	0,3	1,1	2,48	1	0,8	0,8

Source : CIRAD-EMVT BP 427

Pour les six digesteurs présentés, la cotation de la cheminée est identique.

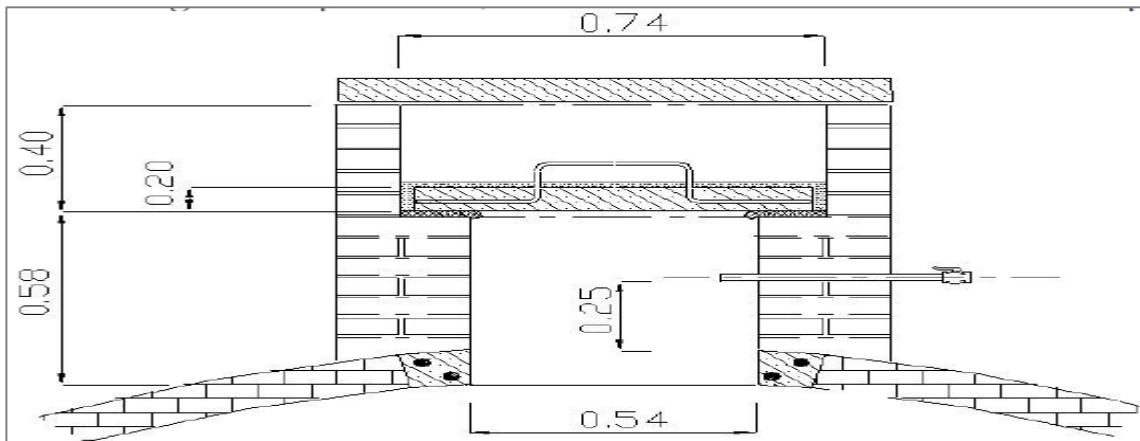


Figure 14 : la cotation de la cheminée

Source : CIRAD-EMVT BP 427

VII.7. Composition des installations de production

Les infrastructures de production de biogaz sont composées généralement : de digesteurs, tuyauteries de conduite en PET, d'un système anti-retour de flamme, d'un réservoir de stockage de gaz.

VII.7. 1. Digesteur

Le digesteur est l'élément principal composant les infrastructures de production de biogaz parce qu'il est siège des réactions biochimiques de méthanisation. Les dimensions du digesteur sont fonction premièrement des disponibilités en substrats et des résultats de production visés.

Les digesteurs sont de type chinois à dôme fixe fonctionnant en continu (voir la figure12). Son volume total est de $10,31\text{m}^3$.

La chambre de digestion est formée cylindrique avec un fond courbé afin de promouvoir et faciliter la circulation des substrats de digestion des résidus solides en résultent. La préservation de la continuité de la production est mise en avant.

VII.7. 2. Tuyauteries en PET

On utilise les tuyaux en polyéthylène de diamètre intérieur 2,5cm pour faire connecter chaque partie des installations, afin d'obtenir un fonctionnement conforme aux normes.

VII.7. 3. Valves anti-retour

Les valves anti- retour sont des dispositifs à installer avec les conduites de gaz afin de prévenir et éviter le retour des gaz, en particulier vers les digesteurs. L'objectif étant d'assurer le bon fonctionnement de l'ensemble des infrastructures et minimiser le risque d'accident dû à

un éventuel retour de flamme par exemple. On en installe sur la conduite de gaz juste après le gazomètre.

VII.7. 4. Robinet tournant

Les robinets tournants sont installés sur les conduites de gaz en tuyauteries. Ils servent à ouvrir et/ou à fermer selon les besoins la circulation des gaz produits par méthanisation.

VII.7. 5. Système d'épuration

L'utilisation du système d'épuration du biogaz est primordiale avant de pouvoir procéder à sa conversion. Il existe diverses possibilités d'épuration selon les choix. Dans le présent cas, on a opté pour la circulation du biogaz brut à travers un réservoir de pétrole qui va fixer le soufre présent dans le biogaz, sous toutes ses formes.

VII.7. 6. Générateur électrique à biogaz / Centrale à biogaz

Il s'agit d'un groupe électrogène carburé au biogaz, c'est-à-dire qu'il génère de l'énergie électrique en consommant du biogaz. Le générateur aspire le biogaz à partir de son réservoir, à savoir le gazomètre en cloche flottante, avec un débit conforme à ses caractéristiques. Le biogaz circule ensuite dans les tuyauteries de conduite, traverse le système d'épuration et arrive dans le générateur. L'utilité d'un tel générateur est primordial pour la production électrique projetée.

Ci-dessous le développement de ses caractéristiques, et le schéma de principe qui donne quelques indications sur le principe de fonctionnement des futures infrastructures.

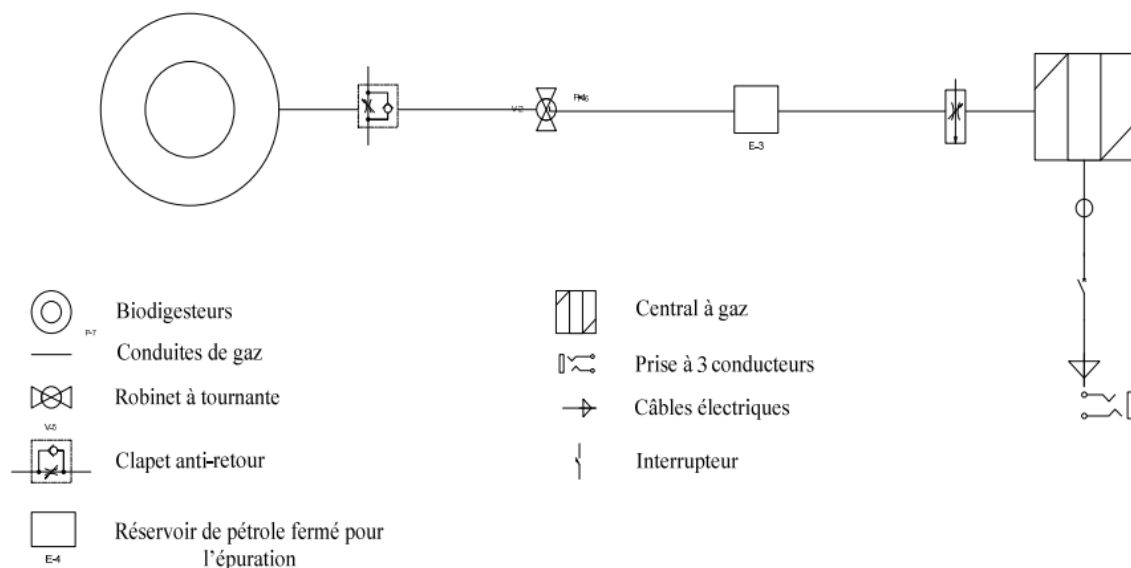


Figure 15 : Schéma de principe de l'installation

VII.8. Construction du digesteur et des installations

Les mise en place de l'unité de production début par le choix du site, l'achat des matériaux utilisé pour aboutir ensuite à leurs installations. La construction entame la concrétisation du projet.

VII.8. 1. Etapes de la construction

La construction des installations de production, en particulier du digesteur, relève plus du domaine du Génie Civil que de la Biotechnologie ou de l'Agronomie. Néanmoins, on peut mentionner quelques étapes importantes dont : l'excavation des fosses, l'élévation des contours en briques cuites, la construction des compartiments d'alimentation et d'évacuation, enfin a mise en place des équipements annexes (tuyauteries et gazomètre).

VII.8. 2. Matériaux utilisés dans la construction.

On va voir dans le tableau si après la liste des matériaux nécessaires ; les caractéristiques des matériaux ainsi que leur quantité respective y sont pareillement détaillés. A noter que la durée de vie moyenne des infrastructures est de 15 ans pour la déduction des amortissements.

Tableau 11 : Liste des matériaux de construction

Désignation	Quantité
Coffrage en bois	22
Fer armatures	10
Enduit d'étanchéité dosé à 400kg/m ³	10 m ²
Fil recuit	2kg
Brique cuites épaisseur 0.11m	Environ 3 300
Valve anti-retour	2
Sikalite	20kg
Tuyau PVC Ø21/25 mm de 10 m	2
Coudes	4
Colles et adhésifs	2
Robinet tournant	2
Ciments Cementis	20sac
Sable	8m ³
Gravier	8 m ³
Buse en béton Ø200mm	5m
Anti-rouille	2kg
Tôle métallique	15m ²

VII.8. 2. 1. Les briques cuites

Elles vont servir de matériaux plus importante de la construction du digesteur. Elles constituent presque l'ensemble des parois de celui-ci c'est pour cela qu'elles sont utilisées en importai augmente quantité qui augmente en fonction de croissement de la dimension du digesteur.

VII.8. 2. 2. Tôle métallique

Les tôles métalliques seront forgées en forme de cloche pour la fabrication du gazomètre flottant.

VII.9. Exploitation prévisionnelle de l'unité de production

Une fois que les installations de production sont opérationnelles et prêtes pour l'emploi, l'étape la plus délicate concernant son exploitation pourra être entamée. Concrètement, il s'agit d'évaluer et prévoir le mode de chargement du digesteur et d'anticiper les résultats futurs de son exploitation en se basant sur les résultats des expérimentations.

VII.9.1. Chargement du digesteur

Le chargement du digesteur est une opération à effectuer avec une grande attention parce qu'il conditionne partiellement la bonne réussite de la fermentation à réaliser.

Le chargement devrait se focaliser vers la mise en place d'une écologie favorable au développement bactérien. Ainsi à l'aide d'un trait de jauge, la hauteur intérieure du réacteur à utiliser correspondant au volume 2/3 utilisé du volume total du réacteur est marquée.

VII.9.2. Chargement du substrat.

Le chargement initial du digesteur du substrat devrait respecter la proportion conforme aux résultats de laboratoire. Le substrat est ensuite judicieusement renouvelé progressivement au fur et à mesure de l'avancement de digestion et de l'évacuation.

VII.9.3. Chargement en milieu réactionnel

Lors de l'introduction de l'eau servant de milieu réactionnel, on en verse exactement jusqu'à la hauteur marquée par un trait afin d'assurer l'exploitation optimale du réacteur.

Tableau 12 : Proportion de chargement des digesteurs

Drêche de brasserie kg	Bouse de bovin en kg	Eau en litre
3 000	300	4125

TROISIEME PARTIE

RESULTATS ET DISCUSSIONS

CHAPITRE VIII. RESULTATS DES ESSAIS DE LABORATOIRE

VIII.1. Production journalière en biogaz

On enregistre une première production de biogaz seulement mois de 24 heure après la fermeture du digesteur. Elle est caractérisée par une forte production d'anhydride carbonique en début de digestion, qui diminue au fur et à mesure que la réaction progresse pour céder la place au gaz méthane.

L'évolution de la production de biogaz en fonction de temps maturation est illustrée par la figure16

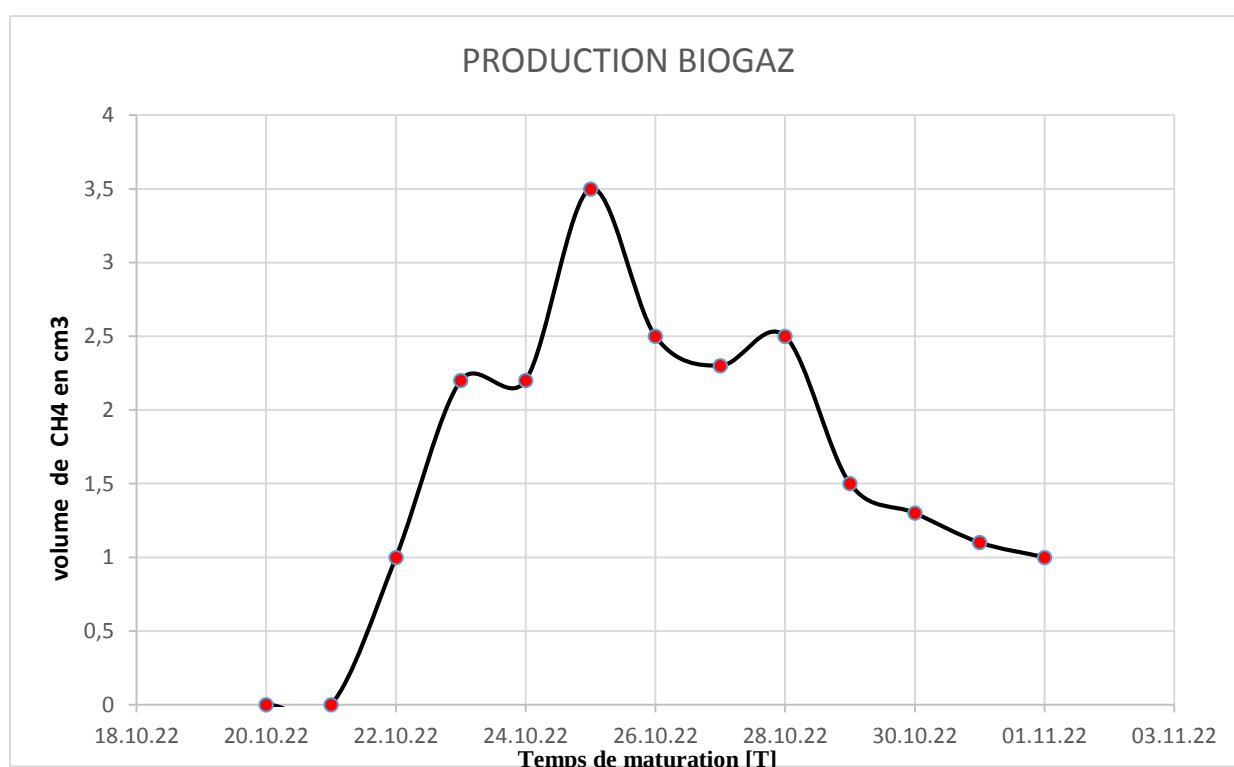


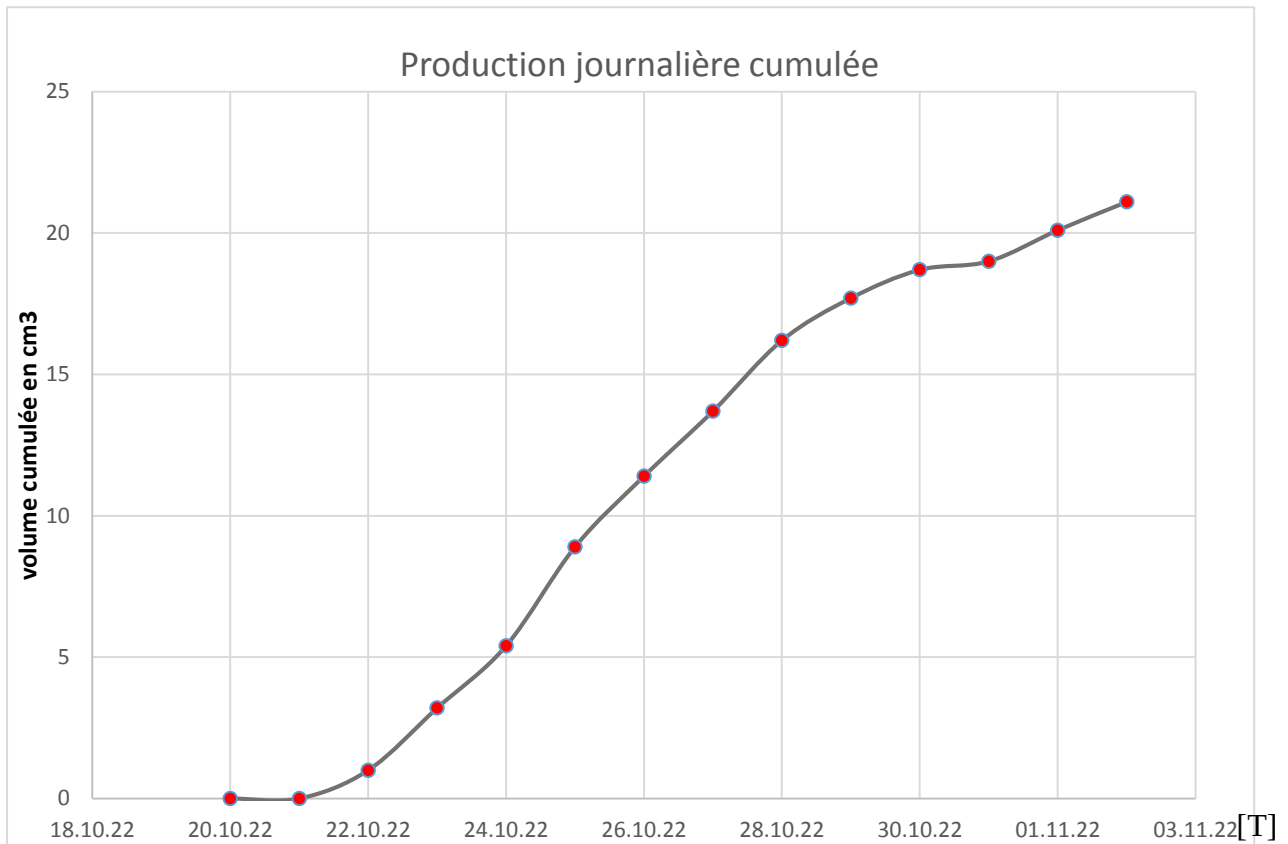
Figure 16 : Evolution de la production journalière en biogaz

Source : auteur [03.11.22]

Comme il est constaté sur cette figure, l'évolution de la production journalière en biogaz est assez irrégulière. L'explication à ce phénomène est que le processus biochimique est sensible et facilement influencé par les variations de paramètres, principalement la température qui modifie régulièrement les activités bactériennes dans les digesteurs.

VIII.2. Production cumulée en biogaz

La production cumulée résulte de la somme des productions journalière, elle est faible en début et augmente progressivement.



[T] : Temps de maturation

Figure 17 : Courbe de production cumulée en biogaz

Source : Auteur [03.11.22]

La production cumulée journalière en biogaz est conforme à la production journalière seule. Elle est d'abord faible au début de la fermentation avec la phase de latence, ensuite la production monte progressivement avec la phase exponentielle. La teneur en méthane s'améliore également au fur et à mesure que la réaction progresse jusqu'à une limite optimum, pour finalement diminuer vers son épuisement.

VIII.2. 1.Tests d'inflammation du biogaz

Le biogaz obtenu s'enflamme bien en présentant une flamme bleue caractéristique représentée par la photo7.



Photo 7 : Flamme du biogaz en dessus du gazomètre Source : Auteur [25.10.22]

VIII.2.2. Potentiel et équivalence énergétique du biogaz obtenu

Le produit obtenu est un biogaz brut non encore purifié. A travers la flamme qu'il présente, sa teneur en méthane est évaluée à environ 60 %.

Tableau 13: Equivalence énergétique du biogaz obtenu

CH4 obtenu	Autre source énergétique	Equivalence
38,496 LITRE DE CH ₄ DE DRECHE BRASSERIE	Charbon de bois	≈ 50,04g
	Charbon	≈ 38,494g
	Gaz naturel	≈ 0,036 L
	Gasoil	≈ 0,026 L
	Ethanol	≈ 0,05L

Source : Auteur Nov.2022

VIII.3. Production Prévisionnelle en biogaz

La production en biogaz prévue lors de l'exploitation du réacteur en 30 jours (un cycle), puis en une année (12 cycles), est récapitulée dans le tableau 14.

Tableau 14: Évaluation de la production de biogaz à grande échelle

Désignation	Résultat de laboratoire	Résultat de l'exploitation en milieu réel
Drêche(kg/cycle)	1,5	3 000
Ferment (10% kg)	0,1	300
Eau (litre)	2	4125
Volume de digesteur (litre)	5	10312,5
Production prévisionnelle de CH ₄	Volume en l	
En un cycle (30jours)	38,496	84 691,2
En un année	461,916	1 016 294,4

Source : Auteur

Ainsi, en milieu réel, la valorisation des drêches d'orge permettra de disposer 84.691 m³/mois de biogaz, soit 1 016,29 m³/an.

▪ Temps de rétention hydraulique (TRH)

Le tableau 14 fournit la caractéristique du digesteur à réaliser le dimensionnement du digesteur sera connu en multipliant le temps de rétention Hydraulique (THR) qui est de 30 jours avec la quantité de matière première disponible chaque jour au niveau de la société STAR Antsirabe qui est de 30 à 55 tonne /jours

VIII.3.1. Production en biogaz

La production totale en biogaz est de 38 litres environ pendant une durée de 30 jours. Ainsi, la production moyenne journalière est de 1,26 litre. Elle est en pratique assez irrégulière à cause de l'influence de certains facteurs : température et activités bactériennes en particulier.

VIII.3.2. Exploitation Prévisionnelle de l'unité de production

Une fois que les installations de production sont opérationnelles et prêtes pour l'emploi, l'étape la plus délicate concernant son exploitation pourra être entamée. Concrètement, il s'agit d'évaluer et prévoir le mode de chargement du réacteur et d'anticiper les résultats futurs de son exploitation en se basant sur les résultats des expérimentations.

VIII.3.3. Bilan Énergétique prévisionnel annuel de l'unité de biogaz

La potentialité énergétique du biogaz produit ainsi que les caractéristiques du processus de digestion des déchets en laboratoire ont permis de déduire le bilan énergétique prévisionnel de l'ensemble des installations, qui est donné dans le tableau 15.

Tableau 15 : Bilan énergétique Annuel

	Quantité m ³	Energie [kcal]
Bilan	1 016,29	5 589 595

Source : Auteur

En tenant compte du pouvoir calorifique inférieur du biogaz PCI (biogaz) = 5500 kcal/m³, l'énergie calorifique prévisionnelle (Kcal) pour le volume annuel de gaz produit est de 5 589 595 kcal].

VIII.3.4. La conversion du biogaz en électricité

La production d'électricité par l'intermédiaire de la transformation de l'énergie du biogaz est certainement l'étape la plus délicate à faire dans la présente étude d'optimisation et de rentabilité, en raison des diverses contraintes techniques et surtout financières qui s'y rattachent.

VIII.3.5. Principe de la conversion énergétique

En théorie, la conversion énergétique de l'énergie du biogaz est une application d'un principe de la thermodynamique qui implique que les diverses formes d'énergies sont interconvertibles.

Théoriquement, un biogaz de 60% de méthane dispose environ une potentialité de production en énergie électrique de 6 kWh / m³. Mais en pratique, il est d'environ 2 kWh / m³ suivant le rendement du générateur, le reste de l'énergie est perdu et dissipé sous forme de chaleur irrécupérable.

VIII.3.6. Matériels de conversion utilisés

Le générateur adéquat pour la production d'énergie électrique dans le présent cas est le Biogaz Generator, disponible chez un fournisseur chinois Henan Chengcheng Import – export Co, qui effectue des ventes en ligne sur internet. Ce générateur produit 2,7 kWh par 1m³ de biogaz consommé.

VIII.3.7. Caractéristiques et fonctionnement du matériel

Les caractéristiques de ce générateur et son rendement de production sont récapitulées dans le tableau 16.

Tableau 16 : Fiche Technique du Générateur électrique

Groupe électrogène	Caractéristique	Valeurs
Groupe à moteur mono cylindre ; à quatre temps	Poids bruit	24,3kg
	Tension / fréquence	220V/50hz
	Maximum de puissance sortie	0,7kw
	Consommation de biogaz par kWh d'électricité	0,36m ³

VIII.3.8. Résultats Prévisionnels de la conversion de production

La conversion en totalité du biogaz produit, en tenant compte de la disponibilité du biogaz à convertir, donne un bilan en énergie électrique affiché dans le tableau 17.

Tableau 17 : Production prévisionnelle en Energie électrique

Biogaz converti [m ³]	Electricité [kWh]		
Par mois	Par an	Par mois	Par an
84,691	1 016,29	228,665	2 744

En effet ; en une année, la production prévisionnelle en énergie électrique est 2 744 [kWh].

CONCLUSION PARTIELLE

Les essais de digestion en anaérobiose de drêche en laboratoire ont permis de connaître les caractéristiques du processus pour ce substrat : une production totale cumulée tournant aux alentours de 38 litre en 30 jours a été constatée ; ceci pour un poids total de substrat et ferment de 1650gramme. Le biogaz obtenu est un biogaz moyen d'après le résultat des test d'inflammation effectués ; donc environ 60% CH₄. En se basant sur les données fournies par ces expérimentations, une application à grande échelle est possible la production prévisionnelle annuelle en fertilisants, en biogaz ou en électricité, respectivement est 15 840kg, 101 6,29 m³ et 2 744 kWh. Ces intéressants résultats techniques prévisionnels conduisent aux études de préfaisabilité économique et de rentabilité du projet.

ETUDE DE PREFAISABILITE ECONOMIQUE ET DE RENTABILITE FINANCIERE

CHAPITRE XI : ETUDE DE PREFAISABILITE ECONOMIQUE ET DE RENTABILITE FINANCIERE

Les études de préfaçabilité économique et les calculs de rentabilité de réalisation et de concrétisation du projet, et d'autre part à constituer sa viabilité financière dans le temps. Dans une telle étude, une méthode fiable, fondée et précise est nécessaire pour pouvoir atteindre les objectifs initialement fixés. Concrètement , il faut donc définir les objectifs réels des études à réaliser, mettre au point les différentes étapes de la méthodologie adoptée , avant de procéder enfin aux calculs de rentabilité proprement dite, ceci à travers l'application des méthodes soulevées .Il faut aussi souligner que ces études économique et financière se basent sur les résultats et les prévisions des études techniques précédentes , sur le contexte socio-économique existant et sur les données statistiques officielles.

XI.1. Contexte du Projet

Le projet faisant l'objet de la présente étude est un projet d'infrastructure annexe, rattaché à la production de biogaz à partir de la matière organique et à la production d'énergie électrique à partir de drêche d'orge. Autrement dit, pour être réalisable, le projet développé dans le présent document nécessite au préalable l'existence de la valorisation de drêche.

Quelques caractéristiques du projet et un aperçu des démarches relatives à une perspective réalisation figurent dans le tableau 18.

Tableau 18 : Fiche technique de projet

Eléments	Objectifs et démarches
Contexte et objet du projet	- Produire du biogaz avec conversion électrique par valorisation des drêches - Les installations de production de biogaz sont à une unité de valorisation des drêches - Les études effectuées dans ce projet concernent uniquement la partie postérieure au fonctionnement de l'infrastructure de valorisation des drêche

Raison et objectifs du projet	Sur le plan économique - Produire de l'énergie moins onéreuse moins de prix comparable à celle fournie par les compagnies distributrices d'électricité habituelle et les sources énergétique courantes - créer de nouvelles valeurs ajoutées Sur le plan technique et autre -Valoriser les drêche d'orge en nouvelle ressource énergétique pour l'exploitation - se centrer vers l'autonomie énergétique - contribuer à la protection de l'environnement pour un développement durable
Réalisation Technique	- Simulation expérimentale de la fermentation en laboratoire - Etude du terrain d'installation et étude technique de réalisation - Evaluation des ressources budgétaires requises.
Maitre d'ouvrage	- Le projet est réalisable par tout entrepreneur intéressé d'investir dans la production d' énergie électrique à partir des drêche d'orge
Période et chronologie	- ce projet est réalisable à l'issue de la mise en opération de l'infrastructure des valorisation des drêche pour la production de nouvelle source d'énergie
Budget	- Coût du projet (devis estimatif) - Mode de financement : capitaux et fonds de roulement (laissé à l'entrepreneur) - Echancier des crédits de paiement (laissé à l'entrepreneur)

XI.1.1. Objectifs des études de préféabilité économique et financière.

L'objectif ultime des études économique et financière est la détermination et/ou la mise en œuvre de la possibilité de réalisation effective du projet ainsi que la viabilité de son fonctionnement dans le temps, à l'issue de son instauration.

XI.1.2. Mise en œuvre de la possibilité de concrétisation du projet

La concrétisation du projet nécessite que deux conditions soient satisfaites, d'abord la rentabilité économique du point de vue de l'investisseur, ensuite il faut que le projet apporte des intérêts à la collectivité.

En effet, l'étude de la rentabilité financière d'un projet de production commence toujours par l'évaluation du point de vue de l'entrepreneur (WIENER et CHERVEL ;1985) qui définit le choix de l'investissement en incitant celui-ci dans la décision d'investir ou non.

XI.1.3. Constitution de la viabilité et de la pérennisation du projet

La mise en œuvre de la viabilité de fonctionnement du projet dans le temps après son instauration implique une mise en place d'un plan de gestion rationnelle fiable afin de pouvoir s'extraire des décisions arbitraires et mieux s'adapter aux conditions futures.

XI.2. La méthodologie des évaluations

Le calcul économique reste l'outil principalement utilisé lors de la réalisation des études de préféabilité. En effet, il conduit les décisions en particulier en matière d'investissement, que ce soit au début ou tout au long de son exécution. Enfin ; le calcul économique permet de déterminer les éléments d'évaluation de l'état financier d'un projet et de mesure de performance comptable, à tout moment de la période de son existence.

XI.2.1. Méthode d'étude de l'opportunité économique du projet

L'étude de l'opportunité économique d'un projet nécessite un recours à l'emploi de la méthode de capitalisation et /ou d'Actualisation des sommes investies et des gains ultérieurs pour prévoir et anticiper les résultats du projet.

XI.2.1.1. Justification et fondement de la méthode

Un processus économique est influencé par divers facteurs qui interfèrent dans les calculs et les rendent complexes. Lors des études, il est ainsi nécessaire de les prendre en compte afin d'obtenir des résultats fiables, sur lesquels on pourrait se baser, dans la conduite du projet et les prises des décisions importantes. Un de ces facteurs est l'effet du temps qui s'écoule entre la dépense initiale et les rentrées ultérieures résultant de cet investissement (CNEEMA, 1968), au cours duquel, les montants correspondants ne se situent pas sur un même plan et appartiennent à des mondes différents. Par conséquent, ils ne sont pas comparables entre eux bien qu'exprimés dans la même unité monétaire.

XI.2.1. 2. Mécanisme de la Capitalisation et de l'Actualisation

Il est alors absolument indispensable de savoir s'extraire du temps et de l'évolution monétaire pour pouvoir juger convenablement. Le mécanisme de la capitalisation et de l'actualisation permet de ramener au choix, dans le futur ou dans le présent, différentes valeurs échelonnées dans le temps, dans le passé comme dans le futur, de manière à ce que ces valeurs deviennent comparables entre elles et rendent possible une décision objective

➤ **Capitalisation**

La capitalisation est définie comme étant la valeur future capitalisée, après placement et fructification pendant une période déterminée, d'un montant actuel d'un fonds.

La valeur future C_f d'un capital actuel C_a placé à intérêts composés est donnée par la formule classique :

$$C_f = C_a(1+i)^n$$

Avec:

- i : est le taux constant d'intérêt annuel admis, exprimé en valeur décimale (en pourcentage, le taux d'intérêt est égal à $100 i$) ;
- n : est la durée totale du placement, en année (plus exactement en période de 12 mois à dater du jour du placement) ;
- C_f : est la valeur qui sera acquise par le capital
- C_a , à la fin des n années, du fait des intérêts accumulés.

➤ **Actualisation**

- L'actualisation est simplement définie comme étant la valeur actuelle d'un montant futur d'un fonds.
- La valeur actuelle A_a d'un montant futur A_f attendu à la fin de n années, en considérant que la somme correspondant à cette valeur actuelle pourrait être placée à intérêt composé au taux annuel de $(100 i) \%$ est donnée par la formule :

$$C_a = C_f (1 + i)^{-n}$$

- Dans laquelle i est le taux annuel d'intérêt exprimé en valeur décimale et n la durée de la période considérée, en années de 12 mois.

XI.2.2. Système comptable de mesure de performance de rentabilité

La Marge Brute d'Autofinancement (MBA) représente le flux net dégagé par l'exploitation d'un investissement et qui va permettre de rentabiliser les capitaux investis.

Le calcul de ces flux dégagés, ou Marge Brute d'Autofinancement, est ainsi fonction des éléments de l'exploitation : durée prévue, recettes envisagées, charges estimées et amortissement des biens acquis.

XI.2.2. 1. Valeurs Actualisé Nette (VAN)

La valeur Actualisé Nette d'un investissement est la valeur actuelle, à une date donnée et à un taux d'actualisation choisi, des flux de trésorerie annuels liés à un projet, c'est-à-dire la somme des flux de trésorerie actualisés.

$$VAN = \sum_{n=1}^{n=p} MBA_n (1 + t)^{-n}$$

XI.2.2. 2. Taux de Rentabilité Interne (TRI)

Le Taux de Rentabilité Interne est la valeur du taux d'actualisation pour laquelle le bénéfice actualisé est nul (M. TERNIER ,1968), ou un indice de profitabilité égal à 1.

$$0 = \sum_{n=1}^{n=p} MBA_n (1 + t)^{-n} - C$$

XI.2.2. 3. Indice de Profitabilité (IP)

L'indice de profitabilité (I_p) d'un investissement est défini comme étant le quotient de la somme de cash-flow (flux générés) actualisés par le montant du capital investi (D Frank,2010)

$$I_p = \sum_{n=1}^{n=p} MBA_n (1 + t)^{-n} / C$$

XI.2.2. 4. Durée de Récupération des Capitaux Investis (DRCI)

La Durée de Récupération des Capitaux Investis (DRCI) est définie concrètement comme étant le temps nécessaire, comptabilisé à partir du début des activités de production, pour que la somme investie pour la conception de l'activité retourne au profit de l'investisseur à partir des bénéfices qu'elle génère.

En science économique et comptable, elle est définie comme étant la durée nécessaire pour que le cumul des Marges Brutes d'Autofinancement soit égal à la valeur des capitaux investis.

$$\sum_{n=1}^{n=p} \text{MBA}_n - C = 0$$

XI.2.3. Définition des éléments d'évaluation financière du projet

Afin d'avoir une bonne indication sur l'état financier du projet, il faut connaître avec certitude la valeur de ses flux circulants et immobilisés. Il est possible ensuite d'en déduire un bilan financier fiable, relatif à la performance comptable du projet. Pour obtenir ces résultats, il faut comparer les emplois de fonctionnement et les ressources résultant des activités.

XI.2.3.1. Emplois débiteurs du projet

La valeur des flux monétaires débiteurs du projet est en fonction de son importance et celui des infrastructures de production, ensuite des objectifs initialement visés et enfin du pourcentage d'accomplissement des prévisions. Ces flux monétaires débiteurs sont représentés par les capitaux initialement investis et les charges de fonctionnement.

➤ Investissement ou Capitaux investis

Dans ce projet, le capital est investi à trois types d'affectations différentes, achats des matériels et équipements, coût des études et assistance technique ainsi que les frais d'installation des infrastructures.

➤ Investissement ou Capitaux investis

Dans ce projet, le capital est investi à trois types d'affectations différentes, achats des matériels et équipements, coût des études et assistance technique ainsi que les frais d'installation des infrastructures.

*** Charges de l'exploitation**

On a deux types de charges : les charges décaissées et les charges calculées, ces dernières étant essentiellement représentées par les amortissements des actifs immobilisés.

*** Charges décaissées**

Les charges décaissées sont les frais déboursés nécessaires au fonctionnement des activités d'exploitation des infrastructures : coûts d'acquisition des drêche substrats de la

digestion, des bouses de vaches, des eaux de digestion, ainsi que les frais de main d'œuvre du personnel responsable du suivi et de l'entretien des installations, y compris les impôts.

*** Charges Calculées**

Les charges Calculées de l'exploitation correspondent aux dotations aux amortissements résultant de la dépréciation de valeurs des actifs immobilisés

XI.2.3.2. Ressources du projet

Les flux monétaires créditeurs par contre sont représentés essentiellement par les recettes globales réalisées, représentées par la valeur numéraire du biogaz, des fertilisants organiques, et le cas échéant, de l'énergie électrique.

➤ Chiffre d'Affaire (CA)

*** Valeur des biogaz produits**

La valeur numéraire du biogaz correspond au prix du volume total (en m³) de biogaz produit annuellement. Le prix d'une unité de volume de biogaz étant évalué à 3 500 Ar. Il est déduit de l'équivalence énergétique de 1 m³ de biogaz qui est égale à 0,6 l de gasoil

*** Valeur des fertilisants organiques**

La valeur des fertilisants organiques correspond au prix total des fertilisants produits annuellement. Le prix unitaire d'un kilogramme étant fixé à 950 Ar, en considérant sa composition biochimique et le prix des fertilisants organiques en général sur le commerce.

*** Valeur de l'énergie électrique**

Pour une application débouchant carrément à une conversion énergétique, l'énergie électrique vaut 900 Ar / KWh, en se basant sur le tarif de la JIRAMA.

XI.2.3. 3. Hypothèses de calcul

Les évaluations concernent les cinq premières années d'exercice, on détermine le montant des flux monétaires et les indicateurs de rentabilité avec les hypothèses suivantes :

- La valeur de l'impôt sur les bénéfices variables. Elle est de 100 000 Ar additionné à 15 % du chiffre d'affaires ;
- Le taux de placement bancaire exigé étant actuellement de 18 % pour une année ;

Le personnel nécessaire pour faire fonctionner et entretenir les installations correspond à deux employés, leur rémunération mensuelle augmente de 15 % tous les 2 ans.

XI.3. L'étude de rentabilité du projet

Le principe adopté dans cette détermination de la rentabilité des activités réside essentiellement dans l'application des méthodes exposées dans les paragraphes en dessus. Le but est d'aboutir aux valeurs des indicateurs de performance et d'en tirer des conclusions.

XI.3. 1. Investissements

Le capital financier nécessaire pour la réalisation d'un projet de production de biogaz avec un réacteur de $10,31\text{m}^3$ est d'environ 4 568 600 Ar, dont les détails des affectations sont donnés dans le tableau 19.

Tableau 19: Investissements financiers du projet

Désignation	Unité	Quantité		
		Quantité	PU(Ar)	Total
Préparation du chantier				500 000
Coffrage en bois		22	3 000	66 000
Fer pour armature		10	18 000	188 000
Fil de fer	kg	2	3 000	6 000
Brique cuites Epaisseur 0.11 m		3 300	110	363 000
Clapet anti-retour		2	40 000	80 000
Sikalite	kg	20	8 000	160 000
Tuyau PVC Ø21/25 mm de 10 m	m	2	8 800	17 600
Coudes		4	3 000	12 000
Colles et adhésifs		2	6 500	13 000
Robinet tournant		2	10 000	20 000
Ciment Cementis	sacs	20	36 000	720 000
Sable	m ³	8	18 000	144 000
Gravier	m ³	8	28 000	224 000
Buse en béton Ø200 mm	m	5	40 000	200 000
Antirouille	kg	2	15 000	30 000
Tôle métallique	m ²	15	25 000	375 000
Conception du gazomètre				300 000
Main d'œuvre de construction de l'unité				1 000 000
Etude et assistance technique				150 000
			Total =	4 568 600

XI.3.1.1. Charges d'exploitation

Les charges décaissées et les charges calculées forment la totalité des charges de l'exploitation, dont les détails de la répartition sont affichés dans le tableau 20.

Tableau 20 : Charges d'exploitation de production de biogaz

Désignation	Quantité par cycle	Quantité annuelle	P.U(Ar)	Total (Ar)
Drêche brasserie	3 000 kg	36 000 kg	250	9 000 000
Bouse bovins	300 kg	3 600 kg	50	180 000
Eau	12 m ³	144 m ³	300	43 200
Frais personnel	2	24	70 000	1 680 000
Charges décaissées =				10 903 200
Amortissement annuels				304 573
Charge calculées =				304 573
Total de charges =				11 207 773

XI.3. 1.2. Chiffre d'affaire

La valeur en numéraire du chiffre d'affaire réalisé annuellement lors de la réalisation des activités de l'exploitation est donnée dans le tableau 21.

Tableau 21 : Détails du chiffre d'affaire de production de biogaz

Produits	Production annuelle(en m ³ et en kg)	PU(Ar)	Total (Ar)
Biogaz	1 016,29 m ³	3 500	3 557 015
Fertilisant	15 840Kg	950	15 048 000
		CA	18 605 015

XI.3. 1.3. Compte d'exploitation

Le compte d'exploitation de la production de biogaz affiche une Marge Brute d'Autofinancement de 7 123 731 Ar au terme de la première année d'exploitation comme le présente le tableau 22.

La Marge Brute d'Autofinancement constitue un élément important pour tous les calculs économiques et financiers en matière de détermination de la rentabilité d'un projet d'investissement.

Tableau 22 : Compte d'exploitation de production de biogaz

Désignation	Annexe 1	Annexe 2	Annexe 3	Annexe 4	Annexe 5
Valeur du Biogaz	3 557 015	3 557 015	3 557 015	3 557 015	3 557 015
Valeur fertilisants	15 048 000	15 048 000	15 048 000	15 048 000	15 048 000
Valeur Ajoutant Brute	18 605 015	18 605 015	18 605 015	18 605 015	18 605 015
Drêche d'orge	9 000 000	9 000 000	9 000 000	9 000 000	9 000 000
Bouse de vache	180 000	180 000	180 000	180 000	180 000
Eaux de digestion	43 200	43 200	43 200	43 200	43 200
Frais du personnel	1 680 000	1 680 000	1 932 000	1 932 000	2 221 800
Charge décaissées	10 903 200	10 903 200	11 155 200	11 155 200	11 445 000
Amortissement	304 573	304 573	304 573	304 573	304 573
Charge Calculées	304 573	304 573	304 573	304 573	304 573
Total des charge	11 207 773	11 207 773	11 459 773	11 459 773	11 749 573
Résultat Imposable	7 397 242	7 397 242	7 145 242	7 145 242	6 855 442
Impôts	273 511	273 511	273 511	273 511	273 511
MBA	7 123 731	7 123 731	6 871 731	6 871 731	6 581 931
MBA cumulées	7 123 731	14 247 462	21 119 193	27 990 924	34 572 855

XI.3. 1.4. Mesure de performance de rentabilité en fin de la 1^{ère} année

Les indicateurs présentés dans le tableau 23 démontrent tous la rentabilité du projet

Tableau 23 : Indicateurs de rentabilité en fin de la 1^{ère} année

Indicateur	Valeur	Signification
VAN	7 123 731 Ar	Elle indique une bonne situation financière du projet
TRI	55,9%	Le taux de rentabilité est très Intéressant
Ip	1,32	La situation de rentabilité du projet est confirmée
DRCI	8mois	L'investissement initial est récupéré au bout de 8 mois environ

XI.3. 2. CALCUL ECONOMIQUE POUR LA PRODUCTION D'ELECTRICITE

XI.3. 2. 1. Capital investi

Le montant du capital s'accroît avec l'achat du générateur ainsi que leurs installations.

Tableau 24: Investissement de conversion énergétique

Désignation	Prix
Investissement de production de Biogaz	4 568 600
Matériels de conversion du biogaz en électricité	2 000 000
Total	6 568 600

XI.3. 2. 2. Compte d'exploitation

Le compte d'exploitation met en évidence les changements des valeurs des recettes.

Tableau 25 : Compte d'exploitation de la conversion énergétique

Désignation	Annexe 1	Annexe 2	Annexe 3	Annexe 4	Annexe 5
Valeur de l'électricité	2 469 584	2 469 584	2 469 584	2 469 584	2 469 584
Valeur des fertilisants	15 048 000	15 048 000	15 048 000	15 048 000	15 048 000
Valeur Ajoutée brute	17 517 584	17 517 584	17 517 584	17 517 584	17 517 584
Charge de biogaz	11 207 773	11 207 773	11 459 773	11 459 773	11 749 573
Amor ^{ti} du générateur	266 666	266 666	266 666	266 666	266 666
Total de charges	11 474 439	11 474 439	11 726 439	11 726 439	12 016 239
Résultat Imposable	6 043 145	6 043 145	5 791 145	5 791 145	5 501 345
Impôts	248 335	248 335	248 335	248 335	248 335
MBA	5 794 810	5 794 810	5 542 810	5 542 810	5 253 010
MBA cumulées	5 794 810	11 589 620	12 132 430	17 675 240	22 928 250

XI.3. 2. 3. Mesure de performance de rentabilité en fin de la 3^{ème} année

Tableau 26: Indicateurs de rentabilité en fin de la 3^{ème} année

Indicateur	Valeur	Interprétations/signification
VAN	12 132 430Ar	Elle indique une bonne situation financière
TRI	22,7%	Le taux de rentabilité est très intéressant
Ip	1.12	La situation de rentabilité du projet est confirmée
DRCI	14 mois et 22 jours	C'est le temps nécessaire récupérer le capital

Conclusion partielle

La production de biogaz ou d'électricité par conversion du biogaz est une alternative prometteuse sur le plan économique. D'après les résultats des études économiques précédentes, la production de biogaz par méthanisation de drêche d'orge offre de taux de rentabilité interne d'investissement de 55,9 %, respectivement pour des disponibilités mensuelles en substrats de digestion environ 900 tonne par mois, au fur et à mesure que l'échelle de l'exploitation augmente. Pour la production d'électricité par conversion du biogaz, ces taux deviennent 22,7 % respectivement à la fin de la 3^{ème} année de fonctionnement. La rentabilité est ainsi réduite, la récupération du capital est plus longue. Les avantages résident essentiellement au niveau de l'importance des sommes récoltées annuellement.

CONCLUSION GENERALE

La production d'énergie de substitution sous forme de biogaz, à partir de la valorisation a divers fin de drêche, par le processus de digestion anaérobie comme l'indique la littérature scientifique est réellement possible et effectivement réalisable, une fois que les conditions requises pour le déroulement de la réaction de digestion en anaérobiose sont réunies. Elle se base sur l'application des théories biochimiques et techniques fournies par la biotechnologie. Néanmoins, la mise en œuvre et la réussite de la technologie nécessite une bonne maîtrise du processus biochimique de bioconversion des substrats carbonés qui requiert une utilisation d'un bioréacteur adéquat pour ce genre de réaction et un substrat favorable à celui-ci. En prenant en compte ces diverses conditions et contraintes de réussite, à partir de techniques et procédés simplifiés, il a été plus ou moins aisé, d'après les essais qui ont été réalisés, d'obtenir du biogaz. Les expériences qui ont été entreprises dans le laboratoire du département Energétique du Centre National de Recherches Industrielle et Technologique (CNRIT) le démontrent. Il est possible d'obtenir du biogaz avec des digesteurs de laboratoire de capacité nominale 5 litres, à partir de fermentation en anaérobiose de drêche comme substrats, dont la proportion adoptée était 1500 g de drêche, 150 g de bouse de bovins servant de sources de bactéries et 2 litres d'eau de robinet en guise de milieu réactionnel. Seulement moins de 24 heures après le chargement des digesteurs, du biogaz s'est formé. Les drêche substrats utilisés lors de ces essais. L'étude et le suivi de près et régulier de cette production en biogaz a permis de déterminer la productivité en biogaz de ce substrat, environ 38 litres a été récolté pendant une durée de fermentation de 30 jours avec les réacteurs de capacité 5 litres susmentionnés. Une production moyenne journalière de 1,26 litre est donc déduite de ce résultat. Il s'agit de chiffres intéressants pour une perspective d'une application de cette technologie à grande échelle pour en faire une activité économique créatrice de valeur ajoutée. Les études techniques d'anticipation des résultats futurs dans ce sens prévoient d'ailleurs des productions annuelles en biogaz et en fertilisants organiques de ;1016,29 m³ et 15 840Kg, respectivement pour le cas de figure étudiés. La disponibilité mensuelle respective en drêche substrat de la digestion environ 900 tonne alors le digesteur utilise est 10,31 m³. Cette technologie de digestion anaérobie de drêche peut également être utilisée pour la production d'électricité par conversion de l'énergie du biogaz récolté en utilisant un groupe électrogène carburé au biogaz. Théoriquement dans ce cas, 1 m³ de biogaz a une potentialité de production d'électricité de 6 kwh. Mais le rendement de conversion réel prévu dans les différents cas exposés dans ce document est d'environ 2,7 kwh par m³ de biogaz consommé. Ce chiffre prend en compte les différentes pertes énergétiques inévitables ainsi que les caractéristiques du générateur électrique à utiliser. En se basant sur

cette valeur, la conversion en totalité des biogaz prévisionnellement produits 2 744 kWh en une année. Les études de préfaisabilité économique qui s'y rattachent indiquent de taux de rentabilité interne d'investissement intéressant également. 55,9 % pour la production de biogaz en incluant les fertilisants organiques. La rentabilité du projet est bien constatée et mise en évidence. Et elle s'accroît au fur et mesure que la dimension de l'exploitation augmente. Les temps de récupération des investissements environ 8 mois. Par contre, lors de la conversion de l'énergie du biogaz en électricité, ces taux de rentabilité enregistrent des baisses considérables si bien que les mesures de performance de rentabilité à l'aide des indicateurs sont effectuées à la fin de la 3^{ème} année d'exercice. Sur cette logique, le temps de retour des investissements ou Durée de Récupération des Capitaux Investis (DRCI) deviendrait nettement plus longue. Elle est d'environ 14 mois 22 jours pour le cas d'étudié. Il est important de mentionner que ces résultats peuvent varier suivant le climat de la région où le projet sera mis en application. En effet, il a été constaté lors des expérimentations que la température a une influence considérable sur le processus de digestion anaérobie. Par conséquent, les éventuelles applications futures du projet étudié et développé dans le présent document écrit sont nettement préférables d'être concrétisées dans les régions chaudes.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] « Créé par Jean-Louis POLOMÉ pour VALBIO »
- [2] BASTIDE Guillaume « - Service Prévention et Gestion des Déchets Direction Consommation Durable et Déchets - ADEME Angers »
- [3] « ADEME 1999, Chiriack 2001, Gourdon 2002 »
- [5] Sarah BOYER - Diane LABRUNIE - Elodie SEGARD ; « Projet Scientifique en Laboratoire pour fabrication de biogaz- Janvier 2009 »
- [6] « Le biogaz. Procédés de fermentation méthanique – Bertrand de la Farge – Masson – Ingénierie de l’environnement – 1995 »
- [8] MELINDA GATES-Novembre 2013 « étude d’établissement d’une base de référence pour le projet Biogaz »
- [9] J. HESS, « modélisation de la qualité du biogaz produit par un fermenteur méthanogène et stratégie de régulation en vue de sa valorisation », université de Nice - Sophia Antipolis – UFR sciences, (2007).
- [10] HESS Jonathan « Modélisation de la qualité du biogaz produit par un fermenteur méthanogène et stratégie de régulation en vue de sa valorisation », Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, Nice, France, [2007].
- [11] THIERRY TSOAZA Lysmonde « Étude de faisabilité pour l’installation d’un biodigesteur au campus universitaire de Vontovorona proposition de solution au problème de restauration, ESPA [2008] »
- [13] GUIBET J-C., « Les carburants et la combustion, Techniques de l’ingénieur », 2000, n° BM 2520,
- [14] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) Internet : www.fnr.de « Guide sur le biogaz de la production à l’utilisation »
- [15] ANDRIANASOLO Jean Lalao Aimé Mars 1990 « essai de vulgarisation d'un type de digesteur familial En milieu rural » Université D'Antananarivo ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES ; Annees Universitaire 1984 - 1988
- [16] CNRIT (Centre National de Recherches Industrielle et Technologique) et DELEGATION UNIVERSITAIRE AUX ENERGIES NOUVELLES, 1990, « Symposium International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables », Edition du Centre d’Information et de Documentation Scientifique et Technique (CIDST).
- [17] Maud Ferrer Mai 2018 « Projet financé par Capitalisation des secteurs biogaz et foyers améliorés à Madagascar »

- [18] Monsieur RATSIAHAROVALA Olive « Production de biogaz par METHANISATION de LA bouse de bovin » Mémoire de fin d'Etude en vue de l'obtention Du Diplôme de Master en Génie Industriel ; Promotion 2016
- [19] Westendorf M L, Wohlt P A S J E, Sniffen C J and Ward RT 2014 Nutrient content of brewer's grains produced at a commercial brewery: Variation in protein/nitrogen, fiber, carbohydrate, fat, and minerals. The professional Animal Scientist .
- [20] Kendal N.T. 1994. Barley and malt. In: Hardwick, W.A. (Ed.), Handbook of Brewing. Marcel Dekker, New York, pp. 109–120.
- [21] Heusé V., Tran G., Sauvart D., Lebas F. 2017. « Brewers grains, Feedipedia, a programme by INRA, CIRAD, AFZ and FAO »
- [22] Kelly L., Briggs D.E. 1992. « Barley maturity and the effects of steep aeration on malting ». Journal of institute of Brewing 98, (4) : 329-334.
- [23] (Fincher, 1989).
- [24] Mussatto S.I., Dragone G., Roberto I.C. 2006. « Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications. Journal of Cereal Science 43, 1–14. »
- [25] Westendorf M. L., Wohlt J. E. 2002. Brewing by-products: Their use as animal feeds. Vet. Clin. North Am. Food Anim. Pract. 18 :233–252.
- [26] Santos M., Jimé'nez J.J., Bartolome B., Go'mez-Cordove's C., del Nozal M.J., 2003. « Variability of brewers' spent grain within a brewery ». Food Chemistry 80, 17–21.
- [27] Huige N.J., 1994. Brewery by-products and effluents, in : Hardwick, W.A. (Ed.), Handbook of Brewing. Marcel Dekker, New York, pp. 501–550
- [28] Salihu A., Muntari B. 2011. Review: Brewer's spent grain : A review of its potentials and applications. African Journal of Biotechnology Vol. 10(3), pp. 324-331. DOI: 10.5897/AJBx10.006
- [29] Wyss U. 1997. « Ensiling of brewers' grains: high effluent production and good fermentation quality », Agrarforsc, 4 (3): 105-108,
Webographie
- [31] RAKOTOMANJATO Henintsoa Hanitriniaina « Politique et stratégie pour l'efficacité énergétique a Madagascar » Mémoire pour l'obtention du diplôme licence en science économique
- [32] MINISTERE DE L'ENERGIE ET DES HYDROCARBURES
- [33] Population .net consulté le 3 juin 2019

[34]] Florence Solohasiniaina MALALATINA « le dynamisme de la ville d’Antsirabe et les difficultés de l’extension urbaine » MEMOIRE DE MASTER EN GEOGRAPHIE soutenu le 22/03/18 .

[35] WOILLET (J) Essai de micro-régionalisation de la préfecture du vakinankaratra.

[36] ANDRIAMANANTENA Haingotiana Malala : diagnostic financier de la societe malto

WEBOGRAPHIE

[30] yearbook- bilan énergétique, Enerdata.net

https://www.0.freebasics.com/https/fr.m.wikipedia.org/wiki/Joule?iorg_service_id_internal=1547440102204384%3BAfpqpPfs-VHGWRTTR#Multiples

[12] ADEME, Maîtriser les coûts et la gestion. Synthèse de l’étude 1998 [en ligne], Disponible sur:<http://www.ademe.fr/collectivites/Dechets->

[new/Maitrise_couts/Connaissance/couts/Rubrique/cou00.htm](http://www.ademe.fr/collectivites/Dechets-new/Maitrise_couts/Connaissance/couts/Rubrique/cou00.htm)

[4] OLLIVIER B, 1987 ; « Fermentation Méthanique par des cultures mixtes définies de Bactéries Thermophiles », [http:// www.horizon.doc](http://www.horizon.doc) / fermentation méthanique-ird.fr / exl-doc / pleins textes / 24783.pdf consulté le 07. 11. 2010

[7] MIGNON C, 2009, « Biométhanisation» [http:/ www.valbiom.be](http://www.valbiom.be) / utilisation du digestat / 1284120093.pdf, consulté le 12.08.2011

ANNEXE

Détails des calculs financiers

➤ **Hypothèse de calcul**

La capacité du réacteur à cloche flottante est d'environ 10.31m³.

Le temps de rétention hydraulique est de 30 jours (un cycle), ce qui correspondrait également à une possibilité de réalisation de 12 cycles en une année.

➤ **Immobilisation**

La valeur de l'investissement initial, nécessaire à l'installation des infrastructures de production de biogaz est **4 568 600 Ar.**

❖ **SUBSTRATS DE DRECHE.**

Prix Unitaire = 250 Ar/kg

Besoin : 3 000 kg par cycle de 30 jours

Besoins annuels totaux pour 12 cycles = 36 000 kg

PRIX TOTAL = 9 000 000 Ar

❖ **FERMENTS BOUSE DE BOVINS**

Prix unitaire = 50 Ar / kg

Besoin : 300 kg par cycle de 30 jours

Besoins annuels totaux pour 12 cycles = 3 600 kg

PRIX TOTAL = 180 000 Ar

❖ **MILIEU REACTIONNEL**

Prix Unitaire = 300 Ar / m³

Besoin : 12 000 litres par cycle (soit 12 m³)

Besoins annuels totaux pour 12 cycles = 144 000 litres (144 m³)

PRIX TOTAL = 42 200 Ar

❖ **MAIN D'ŒUVRE** (Deux personnes sont nécessaires pour le suivi et l'entretien)

Prix unitaire = 70 000 Ar / mois durant la 1^{ère} année (+ 15 % tous les 2 ans)

80 500 Ar à la 3^{ème} et la 4^{ème} année, et 91 000 Ar à partir de la 5^{ème}

PRIX TOTAL = 1 680 000 Ar pour la 1^{ère} année

❖ AMORTISSEMENTS

L'investissement initial est de 4 568 600 Ar

Pour une durée de vie de 15 ans, l'amortissement annuel est de 304 573 Ar

$$\text{AMORTISSEMENT} = 304\,573 \text{ Ar / an}$$

$$\text{Valeur total des charges} = 11\,207\,773 \text{ Ar / an}$$

❖ IMPOTS

Pour une activité agricole, la valeur de l'IBS est égale à 100 000 Ar additionnée à 15 % du chiffre d'affaire. La valeur annuelle de l'IBS est donc 273 511 Ar

❖ MESURE DE PERFORMANCE DE RENTABILITE

➤ Taux de rentabilité interne

Le Taux de Rentabilité Interne (TRI) est la valeur du taux d'actualisation pour laquelle le bénéfice actualisé est nul, ou un indice de profitabilité égal à 1.

$$0 = \sum_{n=1}^{n=p} \text{MBA}_n (1 + t)^{-n} - C$$

D'après nos calculs, notre exploitation coûte **4 568 600 Ar** et rapporte **7 123 731 Ar** au bout d'une année.

La définition du TRI indique un bénéfice nulle ($B = 0$)

$$-4\,568\,600 + 7\,123\,731 / (1+i) = 0$$

$$-4\,568\,600(1+i) = 7\,123\,731$$

$$4\,568\,600 i = 7\,123\,731 - 4\,568\,600$$

$$i = 2\,555\,131 / 4\,568\,600$$

$$i = 0,559 \text{ ou } i = 55,9 \%$$

Le taux de rentabilité de l'investissement est donc de 55,9 %

➤ Indice de profitabilité (I_p)

L'indice de profitabilité (I_p) d'un investissement est défini comme étant le quotient de la somme des cashs – flows (flux générés) actualisés par le montant du capital investi.

$$I_p = \sum_{n=1}^{n=p} \text{MBA}_n (1 + t)^{-n} / C$$

$$7\,123\,731 / (1+1,08) / 4\,568\,600$$

$$I_P = 1,32$$

➤ **Durée de récupération des capitaux investis**

Le cumule de la marge brute d'autofinancement atteint la valeur **4 568 600 Ar** du capital investi après environ 8 mois de fonctionnement des activités de production.

❖ **MESURE DE PERFORMANCE DE RENTABILITE DANS LA CONVERSION ENERGETIQUE DU PREMIER CAS.**

➤ **Valeur Actuelle Nette (VAN)**

La valeur nette actuelle à la fin de la troisième année d'exercice est **12 132 430 Ar**.

➤ **Taux de rentabilité interne (TRI)**

Le capital initialement investi de 6 568 600 Ar génère un flux net positif d'une valeur de 12 132 430 Ar à la fin de la troisième année de fonctionnement des activités d'exploitation.

La définition du TRI indique un bénéfice nulle ($B = 0$)

$$-6\,568\,600 + 12\,132\,430 / (1+i)^3 = 0$$

$$-6\,568\,600 = -12\,132\,430 / (1+i)^3$$

$$(1+i)^3 = 12\,132\,430 / 6\,568\,600$$

$$1+i = 1,226$$

$$i = 1,226 - 1 \quad i = 0,226 \text{ ou } 22,6\%$$

Le taux de rentabilité est donc de 22,6 % à partir de la troisième année de fonctionnement.

➤ **Indice de profitabilité (Ip)**

$$12\,132\,430 / (1+0,18)^3 / 6\,568\,600$$

$$I_P = 1,12$$

➤ **Durée de Récupération du Capital investi (DRCI)**

Le capital initialement investi sera récupéré au bout de 14 mois et 22 jours environ de fonctionnement des activités de production lorsque toutes les prévisions se déroulent convenablement.

Glossaire

Biomasse

Masse de matières organiques, végétales et animales, issues directement ou indirectement des réactions de la photosynthèse, incluant donc tous produits organiques (déjections animales, déchets urbains) à l'exclusion des combustibles fossiles (Houille et produits pétroliers).

Digestat

Le digestat est un résidu solide composé d'éléments organiques non dégradés et de minéraux issu de la digestion anaérobie de la matière organique se produisant dans les bioréacteurs.

Etude de Faisabilité

L'Étude de faisabilité dans la gestion de projets est une étude qui tend à prouver que le projet est techniquement faisable et économiquement rentable. Dans une optique plus large, on distingue les volets suivants dans une étude de faisabilité : étude technique, commerciale, économique, juridique et d'organisation.

Sikalite

Le sikalite est un hydrofuge en poudre pour l'imperméabilisation des mortiers de ciment ou des mortiers bâtards.

TABLE DES MATIERES

Teny fisaorana	i
Remerciements	ii
Sommaire	iii
Liste des abréviations et symboles	iv
Unité	iv
Symbole chimique	v
Liste des figures	vi
Liste des photos	vi
Liste des tableaux	vii
INTRODUCTION	1
PARTIE I : ETAT DE CONNAISSANCES	3
CHAPITRE I : ENJEUX ET SITUATION ENERGETIQUE MONDIALE[W]	4
I .1 Ressources et consommation énergétiques mondiales	4
I .2. Consommation énergétique mondiale	4
I.3. Emissions de dioxyde de carbone (CO ₂)	4
I.4. Classement des énergies primaires	5
I.4.1. Energie fossile [30]	5
I.4.2. Energie solaire	6
I.4.2.1. Thermique	6
I.4.2.2. Photovoltaïque :	6
I.4.2.3. Energie hydraulique	6
I.4.2.4. Energie éolienne	6
I.4.2.5. Biomasse ou Bioénergie :	7
CHAPITRE II : POLITIQUE ENERGETIQUE A MADAGASCAR	8
II. Nouvelle Politique de l'Energie (NPE) 2015-2030. [32]	8
II.1. Vision de la Nouvelle Politique de l'Energie	8
II.2. Aperçu général du contexte de gouvernance du secteur énergétique	8
II.2.1. Ministère en charge de l'Energie et des Hydrocarbures	9
II.2.2. Agence de Développement de l'Electrification Rurale (ADER),	9
II.2.3. Office Malgache des Hydrocarbures (OMH),	9
II.2.3. JIRAMA,	9
II.2.4. Ministère en charge de l'Environnement et des Forêts	9
II.2.5. Ministère en charge de l'Eau	9
II.3. Politiques énergétiques sous-sectorielles	9
II.3. 1. Biomasse	9
II.3. 2. Electricité	10

II.3. 3. Hydrocarbures	10
II.4. Politiques énergétiques.....	10
II.4.1. Energies renouvelables	10
II.4.2. Electrification Rurale.....	10
Chapitre III : ZONE D’ETUDE : SOCIETE STAR ET LA COMMUNE URBAINE D’ANTSIRABE I.....	11
III.1. Commune urbaine d’Antsirabe I	11
III.1.1. Généralité sur le région d’Antsirabe	11
III.1.2. Secteur économique [34].....	11
III.1.3. Ville industrielle et touristique	11
III.1.4. Grande ville industrielle malagasy	11
III.1.5. Essor des activités commerciales et transports	12
III.1.6. Climatologique dans la région d’Antsirabe.....	12
III.2. Société STAR.....	12
III.2.1. Historique de la brasserie	12
III.2.2. Evolution de production	12
III.3. Société MALTO, premier fournisseur des matières premières à la brasserie STAR [36]	13
III.3.1. Présentation de la société MALTO	13
III.3.2. Domaines d’activité de la société, et structure organisationnelle	13
III.3.2.1. Activités	13
III.3.2.2. Objectifs	13
III.3.2.3. Principales zones de production d’orge	14
CHAPITRE IV : LA METHANISATION.....	15
IV.1.1 Histoire de la méthanisation [1]	15
IV.1.2 Définition [2].....	15
IV.1.3 Avantages.....	16
IV.1.4 Procédé de digestion anaérobie (Ou processus de la méthanisation) [3].....	17
IV.1.4.1 Hydrolyse	18
IV.1.4.2 Acidogénèse	18
IV.1.4.3 Acétogénèse.....	18
IV.1.4.4 Méthanogénèse	18
IV.1.5. Bactéries de la méthanisation [4]	18
IV.1.5.1. Bactéries hydrolytiques et fermentatives [5]	19
IV.1.5.2. Bactéries des acidogènes	19
IV.1.5.3. Bactéries acétogènes	19
IV.1.5.4. Bactéries méthanogènes.....	20
IV.1.5.5. Bactéries sulfato-réductrices	21

IV.1.6. Facteurs physico-chimiques [6]	21
IV.1.6.1. pH	22
IV.1.6.2. Température	22
IV.1.6.3. Potentiel d'oxydoréduction	22
IV.1.7. Résultats de la digestion [7]	22
CHAPITRE V. LE BIOGAZ [8]	23
V.2.1. PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DE PRODUCTION DE BIOGAZ	23
V.2.2. Température [9]	23
V.2.3. Le rapport carbone/azote(C/N).....	24
V.2.4. L'humidité [11]	24
V.2.5. L'absence d'air ou anaérobiose [5]	24
V.2.6. L'agitation	24
V.2.7. Composition chimique du biogaz	25
V.2.8. Qualité du biogaz [14]	25
V.2.9. Utilisations et valorisations du biogaz [15]	26
V.2.9.1. Cuisson	26
V.2.9.2. Réglage des brûleurs.	26
V.2.9.3. Eclairage	26
V.2.9.3. Motorisation [16]	27
V.2.10. Equivalence et pouvoir énergétique du biogaz [17]	27
V.3. Les Bioréacteurs de la méthanisation	28
V.3.1. Définition [18]	28
V.3.2. Les digesteurs semi-continus :	28
V.3.3. Les digesteurs continus de type Chinois	29
V.3.4. Les digesteurs discontinus, dits « batch » :	29
CHAPITRE VI : LES DRECHES DE BRASSERIE	30
VI.4.1. Définition et origine	30
VI.4.2. Etapes de production des drêches de brasserie	30
VI.4.3. Composition chimique des drêches de brasserie.....	32
VI.4.4. Valorisation et utilisation en production [28]	33
VI. 4.5. Conservation et stockage [29]	34
Conclusion partielle.....	34
DEUXIEME PARTIE : MATERIELS ET METHODES	35
CHAPITRE VII : MATERIELS	36
VII.1 Matières premières.....	36
VII.2. Etude physico chimique de matière première.....	36
VII.3. Matériels utilisés pour la production du biogaz	36

VII.3.1. Digesteurs	36
VII.3.2. Gazomètre.....	37
VII.3.3. Bac d’immersion des digesteurs	37
VII.3.4. Bac de récupération	38
VII.3.5. Installation du dispositif expérimental.....	38
VII.3.6. Résistance chauffante	39
VII.3.7. Tuyauterie conduite	39
VII.3.8. Balance	39
VII.4. METHODE POUR LA METHANISATION.....	40
VII.4.1. Méthodologie pour la fermentation.	40
VII.4.1.1. Formulations	40
VII.4.1.2. Objectifs	40
VII.4.2. Manipulation lors de la réalisation des expérimentations.....	40
VII.4.2.1. Préparation et introduction des substrats.....	40
VII.4.2.2. Installation et adaptation des matériels	41
VII.5. Evolution de la digestion anaérobie.....	41
VII.5.1. Projet de construction de digesteur et Application en grandeur réelle	41
VII.5.2. Etude de la disponibilité de drêche	41
VII.5.3. Description des installations	42
VII.5.4. Plan du digesteur.....	42
VII.5. Les matériels utilisés pour la production de biogaz.....	42
VII.5.1. Chambre de digestion	42
VII.5. 2. Cloche Gazomètre	43
VII.5. 3. Compartiment d’introduction de substrat	43
VII.5. 4. Evacuation des résidus solides.....	43
VII.5.5. Dimensionnement du réacteur.	43
VII.7. Composition des installations de production	45
VII.7. 1. Digesteur.....	45
VII.7. 2. Tuyauteries en PET.....	45
VII.7. 3. Valves anti-retour	45
VII.7. 4. Robinet tournant	46
VII.7. 5. Système d’épuration	46
VII.7. 6. Générateur électrique à biogaz / Centrale à biogaz	46
VII.8. Construction du digesteur et des installations	47
VII.8. 1. Etapes de la construction	47
VII.8. 2. Matériaux utilisés dans la construction.....	47
VII.8. 2. 1. Les briques cuites	48

VII.8. 2. 2. Tôle métallique.....	48
VII.9. Exploitation prévisionnelle de l'unité de production.....	48
VII.9.1. Chargement du digesteur	48
VII.9.2. Chargement du substrat.	48
VII.9.3. Chargement en milieu réactionnel	48
TROISIEME PARTIE RESULTATS ET DISCUSSIONS	49
CHAPITRE VIII. RESULTATS DES ESSAIS DE LABORATOIRE	50
VIII.1. Production journalière en biogaz.....	50
VIII.2. Production cumulée en biogaz.....	51
VIII.2. 1. Tests d'inflammation du biogaz	52
VIII.2.2. Potentiel et équivalence énergétique du biogaz obtenu.....	52
VIII.3. Production Prévisionnelle en biogaz.....	53
VIII.3.2. Exploitation Prévisionnelle de l'unité de production	54
VIII.3.3. Bilan Énergétique prévisionnel annuel de l'unité de biogaz	54
VIII.3.4. La conversion du biogaz en électricité	54
VIII.3.5. Principe de la conversion énergétique.....	54
VIII.3.6. Matériels de conversion utilisés	55
VIII.3.7. Caractéristiques et fonctionnement du matériel	55
VIII.3.8. Résultats Prévisionnels de la conversion de production	55
CONCLUSION PARTIELLE.....	55
ETUDE DE PREFAISABILITE ECONOMIQUE ET DE RENTABILITE FINANCIERE ..	56
CHAPITRE XI : ETUDE DE PREFAISABILITE ECONOMIQUE ET DE RENTABILITE FINANCIERE	57
XI.1. Contexte du Projet	57
XI.1.1. Objectifs des études de préfaisabilité économique et financière.	58
XI.1.2. Mise en œuvre de la possibilité de concrétisation du projet	59
XI.1.3. Constitution de la viabilité et de la pérennisation du projet.....	59
XI.2. La méthodologie des évaluations.....	59
XI.2.1. Méthode d'étude de l'opportunité économique du projet.....	59
XI.2.1.1. Justification et fondement de la méthode.....	59
XI.2.1. 2. Mécanisme de la Capitalisation et de l'Actualisation	60
XI.2.2. Système comptable de mesure de performance de rentabilité	61
XI.2.2. 1. Valeurs Actualisé Nette (VAN).....	61
XI.2.2. 2. Taux de Rentabilité Interne (TRI)	61
XI.2.2. 3. Indice de Profitabilité (IP).....	61
XI.2.2. 4. Durée de Récupération des Capitaux Investis (DRCI).....	61
XI.2.3. Définition des éléments d'évaluation financière du projet	62

XI.2.3.1. Emplois débiteurs du projet.....	62
XI.2.3.2. Ressources du projet.....	63
XI.2.3. 3. Hypothèses de calcul.....	63
XI.3. L'étude de rentabilité du projet	64
XI.3. 1. Investissements	64
XI.3.1.1. Charges d'exploitation	66
XI.3. 1.2. Chiffre d'affaire	66
XI.3. 1.3. Compte d'exploitation.....	66
XI.3. 1.4. Mesure de performance de rentabilité en fin de la 1 ^{ère} année.....	68
XI.3. 2. CALCUL ECONOMIQUE POUR LA PRODUCTION D'ELECTRICITE	68
XI.3. 2. 1. Capital investi	68
XI.3. 2. 2. Compte d'exploitation.....	69
Conclusion partielle.....	69
CONCLUSION GENERALE	70
BIBLIOGRAPHIE	A
WEBOGRAPHIE.....	C
ANNEXE	D
Glossaire.....	G
Table des matières	H

Monsieur TODINIAINA Lantonirina Bezara

Email : bezaratodiniaina@gmail.com

Tel : +126 32 68 543 66



IES-AV « PROMOTION 2021-2022 »

Thème : VALORISATION A DIVERS FINS DE LA DRECHE : DECHET D'ORGE DE LA SOCIETE STAR D'ANTSIRABE

Résumé

Le biogaz est un produit résultant d'un processus biochimique appelé digestion en anaérobiose de la matière organique par des Archaeobactéries. Des essais de digestion anaérobie de drêche comme substrats, ont donné des résultats confirmant cette théorie. Un biogaz moyen présentant une flamme à base bleue lors de sa combustion a été obtenue en utilisant des bioréacteurs de laboratoire. Parallèlement, une production de résidus solides de digestion finement dégradée y a été collectée et pouvant être utilisée comme fertilisants biologiques. Ces résultats d'expérimentations suscitent de réelles perspectives d'application de la technologie à une échelle plus importante parce que les études techniques prévisionnelles s'y reportant indiquent des productions totales annuelles en biogaz de 1 016,29 m³ et en fertilisants organiques de 15 840Kg, respectivement par utilisation de réacteurs de 10,31 m³. Ce bilan résulte de la valorisation respective de 3 000 kg de drêche d'usine STAR. Une possibilité de conversion de l'énergie du biogaz en électricité ; à l'aide d'un générateur, est également réalisable. Les études techniques d'installation des infrastructures et d'organisation des activités prévoient une réelle faisabilité du projet, dont les gains seront suffisants pour couvrir une partie des besoins énergétiques internes et créer de nouvelles ressources pour l'exploitation. Les résultats des études de préfaisabilité économique ainsi que les évaluations de la rentabilité du projet sont d'ailleurs très satisfaisants.

Mots-clés : Biogaz, Archaeobactéries, digestion, fertilisants, rentabilité

Abstract

The biogas is a product obtained from biochemical process called anaerobic digest of the organic matter by the Archaeobacteria. Some testing anaerobic digest of dreche as raw materials given some result confirming this theory. A biogas having a blue flame during his combustion was obtained by using some laboratory bioreactor. Simultaneously, a production of solid residue with a slim, the using of which like fertilizer in agriculture are much recommended. These interesting results of experience create some real prospect application of this technology to a size scale because the technical study about it, anticipate some biogas production in one year around 1 016,29 m³ and in fertilizer around 15 840Kg, by using any bioreactors of 10,31 m³. These number are the result of the conversion 3 000 kg dreche. A possibility of biogas energy conversion into electricity, with a generator, is realizable too. The technical study of putting up infrastructure and organizing activities anticipate a real feasibility of the plan and the profits will be sufficient for covering partially the energy need of the exploitation and create news resources. The result of the economic prefeasibility study and the financial evaluation of the plan profitability are very satisfactory.

Keys-words: Biogas, Archaeobacteria, digesting, fertilizer, profitability