



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur
Et de la recherche scientifique
Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen
Faculté de technologie
Département de Génie mécanique



Mémoire

*Pour l'Obtention du Diplôme du Mastère en
Génie mécanique*

Option : génie thermique et énergies renouvelables

Thème

**Etude sur la valorisation énergétique par conversion
Biomasse de boues résiduaires urbaines – cas de la station
d'épuration ONA - Tlemcen**

Présenté par :

**Mr KHODJA Farouk Boumediène
Mlle ABOUBEKR Djamila**

Soutenu le : 23 /06/2014

Devant le jury :

Président :	Mr SEBBANE Omar	Université de Tlemcen
Encadreur :	Mr BENMOUSSAT Abderrahim	Université de Tlemcen
Examineurs	Mme BENSEDDIK. Leila	Université de Tlemcen
	Mr ALIANE Khaled	Université de Tlemcen

Année universitaire: 2013-2014

Remerciements

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

Nous tenons à remercier vivement notre encadreur :

Monsieur BENMOUSSAT Abderrahim. Professeur à l'université de Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, chef d'équipe au Laboratoire de recherche "LÆPO" en Electrolytes et polyelectrolytes

Nous tenons à remercier les chercheurs du Laboratoire LÆPO de l'université de Tlemcen pour nous avoir facilité le montage du prototype de digesteur. Nous remercions tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire particulièrement Mr Bouras.

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

Monsieur Mr SEBBANE Omar Maître de conférences A à l'université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen pour la présidence du jury.

Madame BENSEDDIK, L Maître de conférences A à l'université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen pour l'examination.

Monsieur Mr ALIANE Khaled Maître de conférences A à l'université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen pour l'examination.

Enfin, nous remercions tout ceux ou celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions tous les étudiants(es) de master en génie mécanique, option : génie thermique et énergies renouvelables, promotion 2013 – 2014.

Nous remercions vivement nos parents pour leur aide et leur contribution à l'aboutissement de nos études et en témoignage de reconnaissance.

Sommaire

Remerciements

Abréviations

الملخص

Résumé

abstat

Introduction générale : 01

Chapitre 01: valorisation énergétique par biomasse

Introduction	.....	05
1	Valorisation par biomasse	..... 06
1.1	Définition de biomasse.	..... 06
1.2	Génération de biomasse.	..... 07
1.2.1	Premier génération	.....07
1.2.2	Seconde génération.	.....12
1.2.3	Troisième génération.	..... 20
2.	Biométhanisation.	..... 22
2.1	Procédés de méthanisation.	..... 22
2.2	Les phases de dégradation biologique dans la méthanisation.	..... 24
2.3	Le biogaz produit	.....32
2.4	Avantages de la méthanisation.	.....34
2.5	Contraintes de la méthanisation	.....35
3	Utilisation des biocarburants	.....35
3.1	Utilisation des alcools et de leurs éthers	.....35
3.2	Utilisation des huiles végétales et de leurs dérivés dans les moteurs Diesel.	..... 38
3.3	L'utilisation du biogaz.	.....40
4	Synthèse bibliographique	.....46
Conclusion	.....	48

Chapitre 02 : contexte industriel

Introduction	51
1. Présentation du la station d'épuration des eaux usées	51
2. Description des installations	53
2.1 parti eaux usée.	53
2.2 La partie Boues	58
3. donnée de base	59
Conclusion	60

Chapitre 03 : matériels et méthodes

Introduction.	62
1. Les eaux usées	62
2. production des boues.	72
3. Prélèvement des échantillons et préparation.	78
4. Description du prototype de digesteur biomasse.	79
Conclusion	81

Chapitre 04 : simulation numirique

Introduction	83
1. Parti des calculs thermique et énergétique	83
1.1 Les transferts thermiques dans le digesteur.	83
1.2 Transferts thermiques dans le digesteur description du transfert avec schéma ...	84
1.3 Bilan thermique	84
1.4 l'énergie équivalent de volume de biogaz produit	87
1.6 l'énergie net produite	87
2. Simulation de la distribution de la chaleur dans le dégesture.	87
2.1 Quick field.	87
2.2 les donnée de base pour la simulation	88
2.2 le maillage.....	88
Conclusion.	90

Sommaire

Chapitre 05: résultats et dissections

Introduction.....	92
1. Discussion des résultats expérimentaux.....	93
1.1 le volume de biogaz produit.....	93
1.2 Influence des paramètres physico chimique.....	94
2 résultats de simulation.....	95
2.1 Transferts thermiques dans le digesteur.....	95
2.2 Valorisation énergétique du méthane produit.....	96
3 distributions de la température dans le digesteur.....	102
Conclusion.....	103
Conclusion général.....	104
Références	

Abréviations

Liste des abréviations

°GL : le rendement de gay-lussac

3G : troisième génération

ACOS : Acid Catalyzed Orga-nosolv Saccharification

ADEME Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie AGV

AFEX: Ammonia Fiber Explosion

BMP: Biochemical Methane Potential

BTL : Biomass To Liquid

BO : le potentiel de production de gaz

CCPCS : Commission Consultative pour les Carburants de Substitution

CIRAD : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

COV Composés organiques volatils

DBO: Demande Biologique en Oxygène

DBO5: demande biochimique en oxygène obtenue après 5 jours

DCO: demande chimique en oxygène

DDGS : Dried Distiller Grain and Solubles

DME : diméthyléther

EH Equivalents Habitants

ETBE : éthyle tertiobutyl-éther $\text{CH}_3\text{CH}_2(\text{CH}_3)_3$

En : énergie nette

GES : Gaz à Effet de Serre

GL : gay Lussac.

GNS: Gaz Naturel de Synthèse

GNV: Gaz Naturel pour Véhicules

GTL: Gas To Liquid

IB : l'indice de boue

IFP : institut Français du pétrole

IOM : indice d'octane moteur

IOR : indice d'octane recherche(en anglais RON research octane number).

IRTF : d'absorption infrarouge à transformée de Fourier

M: méthylcoenzyme

MES : matières en suspension

MF : Matière Fraiche

Abréviations

MM : Matière Minérale

MO : Matière Organique

MS : Matière Sèche

MTBE : méthyle tertiobutyl-éther (CH₃C(CH₃)₃)

OHPA : Obligate Hydrogen Producing Acetogens

OAM: oxydation anaérobie du méthane

OLR: Organic Loading Rate

ONA: office national d'assainissement

PCI : pouvoir calorifique inferieur

PH : potentiel hydrogène

PPM : parti par million

P_{CH₄} : la production de méthane

R: rendement

Step : Station d'épuration

UTAC : Union Technique de l'Automobile et du Cycle)

Abréviations

Liste des symboles

Symbole	Signification	Unité (système international)
S	surface	m ²
ΔH	L'enthalpie	kJ/kg
P	Le point	N
A	L'âge des boues	jour
c	Concentration	kg/m ³
C	La chaleur spécifique	(J / g de C°)
T	Température	C°
Cm	Concentration massique	g/l
CV	Concentration volumique	ml/l
Cv	la chaleur spécifique	kJ/kg C°
E	Energie	Watt
Hv	La chaleur latente	kJ/kg
V	Le volume	m ³
M	La masse	g
Q	Débit	m ³ /s
Q	Quantité de chaleur	J
T	Le temps	S
Ww	le débit massique de vapeur à partir de digesteurs	kg /j
γ	Le volume de biogaz produit	m ³

Abréviations

Les Composés chimiques

Les éléments chimiques	Signification
$C_{12}H_{12}O_{11}$	Saccharose
$C_6H_{12}O_6$	Glucose
C_2H_4	Ethane
C_2H_5OH	Ethanol
C_2H_6	Ethane
C_5	Hexoses
CH_3OH	Methanol
$C_5H_4O_2$	aldéhyde aromatique
CH_4	Méthane
CO	monoxyde de carbone
CO_2	dioxyde de carbone
H	hydrogen
H_2O	L'eau
$N-NH_4$	Azotes
C_6	Pentoses
$CH_3(CH_2)_3COOH$	l'acide valérique
CH_3CH_2COOH	acide propénoïque
$CH_3CH_2CHOHCOOH$	Acide 2-hydroxyde butanoïque
CH_3COOH	l'acide acétique
Fe	Fer
$H_2O=C(CH_3)_3$	L'isobutane
H_2SO_4	Acide
N	Azote
NO_x	oxyde d'azote
$NaOH$	Hydroxyde de carbone
HCO^{-3}	Hydrogénocarbonates
NH_4^{+}	ammonium
HS	d'hydrogène sulfureux
O	oxygène

Liste des symboles

Tableau 01 : Indice d'octane moteur (IOM) de l'essence avec différentes proportions d'éthanol [source ENSPM. (École Nationale Supérieure du Pétrole et des Moteurs) et IFP (Institut Français du Pétrole), Rapport de voyage d'étude au Brésil, 1991]

Tableau 02 : Correspondance entre la quantité d'oxygène apporté en masse et le volume des composés oxygénés les plus utilisés [ENSPM. (École Nationale Supérieure du Pétrole et des Moteurs) et IFP (Institut Français du Pétrole), Rapport de voyage d'étude au Brésil, 1991]

Tableau 03 : Rendements énergétiques de l'éthanol, des éthers et de l'essence [Bilans énergétique, économique et environnemental des biocarburants. CCPCS (Commission Consultative pour les Carburants de Substitution). Rapport des travaux du groupe de travail N° 1, janv. 1992.]

Tableau 04 : Résultats des émissions des gaz polluants [VAITILINGOM (G.) et LIENNARD (A.) Essai de 1 000 heures sur moteur diesel à injection indirecte, CIRAD, Rapport N° 126/97]

Tableau 05 : Amélioration de la capacité lubrifiante du gazole par l'ester [MONTAGNE (X.). Impact de l'incorporation d'ester méthylique de colza sur le pouvoir lubrifiant des gazoles (évaluation au moyen). Institut Français du Pétrole, 2nd European Motor Biofuels Forum, sept.1996, Graz, Austria.]

Tableau 06 : Production de biogaz selon les intrants [Fischer, T. 2007. Expérience allemande Politique et apprentissage technologique. Journée sur la méthanisation des engrais de ferme. 26 janvier. Sainte-Juli]

Tableau 07 : Caractérisations des eaux usées le cas de l'ONA [données de la station d'épuration des eaux usées ONA Tlemcen]

Tableau 08 : Age des boues requis [44]

Tableau 09 : variation de la température mesurée en fonction de temps (température ambiante)

Tableau 10 : les résultats de volume de biogaz produit

Tableau 11: Données essentielles pour la résolution du système de simulation

Résumé

L'étude a porté sur la conversion énergétique par biomasse et production du biogaz par processus de méthanisation anaérobie des boues d'épuration primaire produites dans le système d'épuration ONA Tlemcen. La méthanisation est une biodégradabilité et une valorisation basée sur l'activité des microorganismes (les bactéries) dans un milieu en absence d'oxygène à une température choisie dans l'intervalle de température 20°C - 70°C où l'activité bactérienne est active. Pour suivre cette conversion au laboratoire un prototype de digesteur a été réalisé au laboratoire. Les essais ont été réalisés au laboratoire en considérant deux températures au niveau du digesteur $T=35^{\circ}\text{C}$ et $T=55^{\circ}\text{C}$ et qui ont été choisies pour avoir le maximum de la conversion et de l'activité bactérienne respectivement mésophiles et thermophiles en tenant compte de la variation des paramètres d'influence (température ambiante, temps d'immersion, concentration de la matière organique, matériaux de conception du digesteur).

Les résultats ont montrés que le volume du biogaz produit dépend des paramètres physico chimiques et la concentration de la matière organique initiale. Les résultats ont été obtenus en tenant compte de l'activité bactérienne qui est beaucoup plus intense à la température de 35°C qu'à la température de 55°C où le processus de méthanisation s'effectue à vitesse lente.

Les calculs thermique sur le bilan énergétique ont montrés que l'énergie nette a diminuée lorsque le digesteur fonctionne à des températures ambiantes très basses de l'ordre de 16°C, ce qui implique que les transferts thermiques échangés avec le milieu extérieur augmentent et le biogaz produit dépendra de la quantité de matière organique introduite dans le digesteur et de la température du digesteur.

Les résultats de la simulation numérique sous environnement Quick Field ont montrés que la distribution de la température au niveau du digesteur n'est pas uniforme pour l'intervalle de température considéré. La température maximale est concentrée à la source de chaleur et diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la source vers les parois et vers le milieu extérieur ce qui confirme les résultats obtenus dans la simulation expérimentale.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction :

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

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

Nous sommes intéressés dans ce travail à la valorisation des déchets par énergie biomasse appelée l'énergie verte. C'est une source énergétique propre sans effet néfaste sur l'environnement naturel. La biomasse c'est la fraction biodégradable des produits composant les matières organiques soit les déchets et résidus provenant de l'agriculture, les substances végétales et animales, la sylviculture et les industries connexes ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers. La biomasse peut être utilisée comme combustible ou comme biomatériau ou matériaux biodégradables comme les polymères. Le bois est la source de biomasse très utilisée. C'est la production des biocarburants; cette dernière se sépare en trois générations, chaque génération a des procédés de conversion des matières premières utilisés différents de l'autre ou sur le rendement spécifique.

La première génération basée sur la fermentation des sucres comme le glucose, le saccharose... et la dégradation des huiles, cette conversion peut produire les alcools, les éthers, les huiles végétales transformées ou non et les esters aussi il y a la méthanisation pour produire le biogaz.

La seconde génération c'est la biomasse lignocellulosique travail sur la gazéification

La troisième génération est encore à l'état de recherche c'est l'activité des micro-algues.

Nous développerons dans ce travail la valorisation énergétique par conversion biomasse des déchets organiques. On considérera les boues de station d'épuration des eaux urbaines de la ville de Tlemcen gérées par l'office ONA Tlemcen. Les boues produites lors du procédé de traitement des eaux par activation ne sont pas valorisées après séchage solaire en lits de séchage à l'air ambiant.

La méthodologie de cette valorisation est la production du biogaz par processus de méthanisation en conversion biomasse microbologique. La méthanisation est un procédé de conversion simple des matières organiques en absence d'oxygène et en présence des microorganismes. Dans un premier temps la digestion des boues d'épuration sera simulée en laboratoire en utilisant un prototype de digesteur travaillant dans les conditions de méthanisation. La matière première vive est prélevée dans le bassin d'aération à la station d'épuration ONA Tlemcen. La source de chaleur est une plaque chauffante électrique et un bain marie sera utilisé pour stabiliser la température. Deux températures au niveau du digesteur ont

Introduction générale

été choisies : température 35°C et 55°C en raison de l'activité microbiologique. Le volume du biogaz produit sera mesuré en utilisant la méthode des volumes déplacés []

Nous présenterons dans le premier chapitre l'énergie biomasse comprenant les générations de biocarburants, les procédés de méthanisation et les applications et nous terminerons ce chapitre par une synthèse bibliographique sur les travaux récents sur les voies de la conversion biomasse.

Le deuxième chapitre est une description du contexte industriel et la présentation de la station d'épuration ONA Tlemcen et les procédés de production des boues avec la problématique de la valorisation des boues.

Dans le troisième chapitre nous présenterons les méthodes d'étude de la méthanisation en laboratoire en simulant le système de digestion anaérobie et les matériels utilisés.

Le quatrième chapitre est une simulation numérique permettant de calculer l'énergie consommée et l'énergie équivalente au volume du biogaz produit pour déduire l'énergie nette produite. La distribution de la température dans le prototype de digesteur a été simulée en utilisant le code de calcul Quick Field.

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

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

CHAPITRE I

**Etude bibliographique sur la
Valorisation
énergétique par
biomasse**

Sommaire de chapitre

Introduction	05
1 Valorisation par biomasse .....	.06
1.1 Définition de biomasse.....	06
1.2 Générations de biomasse.....	07
1.2.1 Premier génération .....	.07
1.2.1.1 Alcool et leurs éthers.....	.07
1.2.1.1.1 Alcool éthanoïque .....	.07
1.2.1.1.1.1 Principes de base	07
1.2.1.1.1.2 Matières premières des sucres .....	.08
1.2.1.1.1.3 Technologie de production de l'éthanol.....	08
1.2.1.1.2 ETBE.....	.09
1.2.1.1.3 Méthanol.....	.10
1.2.1.1.4 MTBE.....	.10
1.2.1.2 Filière Huiles végétales et leurs esters .....	.11
1.2.1.2.1 Huiles végétales non transformées chimiquement.....	.11
1.2.1.2.2 Esters d'huiles végétales.....	11
1.2.2 Seconde génération.....	12
1.2.2.1 Voie biochimique (éthanol cellulosique)	12
1.2.2.1.1 Prétraitement	13
1.2.2.1.1.1 Le prétraitement mécanique	14
1.2.2.1.1.2 Le Prétraitements physico-chimiques	15
1.2.2.1.1.3 Les Prétraitements chimiques	15
1.2.2.1.2 Hydrolyse.....	.16
1.2.2.1.2.1 Hydrolyse chimique	17
1.2.2.1.2.2 Hydrolyse enzymatique.....	.17
1.2.2.1.3 Fermentation éthanolique.....	.17
1.2.2.2 La voie thermochimique .....	.18
1.2.2.2.1 Gazéification .....	.19
1.2.3 Troisième génération.....	.20
2. Biométhanisation.....	.22
2.1 Procédés de méthanisation.....	.22
2.1.1 La teneur en matière sèche.....	22
2.1.2 La température de réaction.....	22
2.1.3 Les modes d'alimentation et d'extraction des déchets.....	23
2.2 Les phases de dégradation biologique dans la méthanisation.....	24
2.2.1 La phase aérobie	24
2.2.2 Les phases anaérobies .....	.25
2.2.2.1 L'hydrolyse .....	.26

2.2.2.2 L'acidogenèse	26
2.2.2.3 L'acétogenèse, l'homoacétogenèse	28
2.2.2.4 L'oxydation syntrophique de l'acétate.	28
2.2.2.5 La méthanogenèse	29
2.2.2.6 Réactions minoritaires.	29
2.2.3 Les effluents générés durant la dégradation.	20
2.3 Le biogaz produit	32
2.3.1 L'approche stœchiométrique.	33
2.3.2 L'approche via la biodégradabilité des déchets (approche BMP).	34
2.4 Avantages de la méthanisation.	34
2.5 Contraintes de la méthanisation	35
3 Utilisation des biocarburants	35
3.1 Utilisation des alcools et de leurs éthers	35
3.1.1 Forte concentration de composés oxygénés	35
3.1.2 Faible concentration de composés oxygénés	36
3.1.3 Critères d'utilisation de l'éthanol et de l'ETBE	36
3.1.4 Bilan énergétique	38
3.2 Utilisation des huiles végétales et de leurs dérivés dans les moteurs Diesel.	38
3.2.1 Les huiles végétales.	39
3.2.2 Ester d'huiles végétales.	39
3.3 L'utilisation du biogaz.	40
3.3.1 La Valorisation thermique.	44
3.3.2 La Production de l'électricité.	44
3.3.3 L'utilisation comme carburant pour les véhicules	43
3.3.4 Le rendement en biogaz.	43
3.3.5 Biométhanisation et énergie	45
4 Synthèse bibliographique	46
Conclusion	48

Introduction

La biomasse appelée aussi l'énergie verte c'est une source d'énergie propre renouvelable pas nouveaux elle à connus permit des siècles et des siècles elle Son utilisation remonte à la maîtrise du feu, **Olivier Bertrand**¹ dit que « *La combustion du bois reste la voie la plus importante* », mais aujourd'hui son utilisation dans divers domaines comme dans la production des matériaux biodégradables et dans le domaine d'énergétique pour la production des biocarburants qui peut remplace les hydrocarbures à une grande échelle soit industriel la production d'électricité au comme un combustible avec un rendement très important. A nos jours il existe plusieurs pays utilisent les biocarburants pour les véhicules et même pour démarrages des grandes installations industrielles; on Algérie la biomasse reste négligeable à cause que on à le pétrole et nous oublie que cette dernière est fossile et périssable et à une autre phase des grandes quantités des déchets on rejette sans recyclage à le temps que on peut utiliser comme matière première pour la conversion par biomasse (les boues, les déchets industriels, les déchets verts, ...), pour cela nous spécifions ce chapitre à l'explication sur la biomasse et les biocarburants en particulier comme début de recherche dans ce domaine.

Nous présenterons dans ce premier chapitre comme début de notre travail la biomasse et nous découvrirons les générations de cette dernière pour produire un biocarburant chaque un avec son mode de conversion, le principe et les étapes de valorisation; par suite on détaille la production de biogaz par procédé de méthanisation, aussi développement de l'utilisation de cet biocarburant, enfin nous terminerons ce chapitre par une synthèse bibliographique sur des recherches faites dans le domaine de biomasse comme une source d'énergie renouvelable et surtout le biogaz.

La production de biogaz se fait par trois générations, méthanisation anaérobie dans la première génération, par gazéification dans la deuxième génération et avec un procédé neuf est il sur l'état de recherche (procédé de micro-algues) pour la troisième génération, mais dans notre travail on base sur la méthanisation anaérobie car c'est le procédé qui nous avons choisi pour notre travail.

La méthanisation consiste en une série d'opérations de dégradations biologiques de matières organiques qui se produisent en l'absence d'oxygène et présence d'une quantité d'énergie thermique. Les produits résultants de la dégradation peuvent être classés en deux catégories, le biogaz et le digestat.

Olivier Bertrand : chef du département Bioénergies du Syndicat des énergies renouvelables en France

1. valorisation à partir de la biomasse

Pendant longtemps la biomasse, fut la source d'énergie la plus exploitée par l'homme. Son utilisation remonte à la maîtrise du feu, il y a environ 450 000 ans [1]. Puis vint la révolution industrielle au 19^{ème} siècle. L'énergie du bois fut alors remplacée par les énergies fossiles : le charbon et surtout les hydrocarbures. Cependant, la biomasse connaît aujourd'hui un renouveau.

Qu'est-ce que la biomasse ?

Comment produit-on de l'énergie à partir de la biomasse ?

1.1 Définition de la biomasse

En toute rigueur, c'est l'ensemble de la matière d'origine vivante. Mais les textes donnent différentes définitions qui peuvent varier sur des points de détails.

L'article 29 de la loi 2005-781 de programmation fixant les orientations de la politique énergétique dite " POPE", du 13 juillet 2005, la définit ainsi :

"La fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales, de la sylviculture et des industries connexes ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers". [2]

On peut également définir la biomasse comme un l'ensemble de la matière organique d'origine végétale ou animale. La biomasse considérée à des fins énergétiques englobe des végétaux provenant de cultures et des déchets. Les cultures énergétiques recouvrent des plantes très diverses telles que les oléagineux, les graminées comme le maïs et la canne à sucre (plantes riches en carbone), le bois... Les déchets peuvent être soit solides (industries agro-alimentaires, papetières, de transformation du bois, agricoles déchets verts ou ménagers), soit liquides (les boues de stations d'épuration, déjections animales) [3].

Les applications de la biomasse sont multiples et souvent anciennes. Hormis les usages alimentaires et pour la fumure des champs, la biomasse a de tout temps être utilisée comme combustible et comme biomatériau traditionnel ou innovant le bois et ses dérivés (papiers, cartons, panneaux de process), mais aussi le chanvre et autres plantes textiles, utilisés de plus en plus comme isolant compris dans du béton composite. L'amidon de céréales ou de pomme de terre peut être utilisé pour la production de plastiques biodégradables et de nombreux autres polymères. aussi les applications de la biomasse comme matières premières de la chimie (elle est utilisée pour produire des tensioactifs, solvants, fluxant de bitumes, encres, peintures, résines, liants, lubrifiants, produits antigel... sans oublier les nombreux principes actifs et huiles essentielles utilisés en pharmacie et cosmétique.) et comme carburants(les huiles végétales les ester, les alcools et les éthers, le biogaz), importantes au 19^{ème} et au début du 20^{ème} siècle,

redeviennent attractives, avec la hausse du prix du pétrole pour les consommateurs et la crise de pollution et l'effet de serre.

La biomasse est toujours renouvelable tant que le milieu où prospèrent les espèces vivantes qui la produisent n'est pas dégradé et que la production de biomasse est renouvelée. Toutefois, la durée du cycle concerné est extrêmement variable (quelques heures dans un fermenteur industriel ; un an pour du blé, du colza ou de la betterave ; 30 à plus de 200 ans pour les arbres forestiers), ce qui n'est pas sans conséquence en termes de disponibilité et de gestion durable. C'est le caractère renouvelable de la biomasse qui lui confère son intérêt pour réduire les émissions de gaz carbonique (CO₂) car le bilan net de celles-ci est théoriquement nul sur la durée d'un cycle de production-consommation.

1.2 Générations de biomasse comme biocarburants

Il existe deux grandes filières de production de biocarburants : les filières de première génération, seconde génération et celles de troisième génération.

1.2.1 Première génération

Ils regroupent selon le mode de production utilisé deux grands types de produits. Nous avons la filière biodiesel et celle des alcools et les éthers dont le plus connu est l'éthanol.

1.2.1.1 La filière des alcools et les éthers

1.2.1.1.1 Alcool éthylique ou éthanol

L'homme sait produire de l'éthanol depuis Noé, (Peut-être 3000 ans avant notre ère !!) et le lien entre sucre et alcool a été fait très tôt même s'il a fallu attendre Gay-Lussac et Pasteur pour en comprendre les mécanismes. Toutefois la production d'éthanol carburant, basée sur les mélasses d'abord, après la 1ère guerre et les céréales ensuite, après la seconde, est relativement récente. La mise au point de technologies robustes permettant la conduite de procédés optimisés à grande échelle s'est véritablement développée depuis les années 1970.

Dans tous les cas il s'est agi de trouver des matières premières riches en sucre facilement mobilisable. Le développement des technologies permet maintenant d'envisager l'extraction des sucres de la cellulose et des hémicelluloses, des polymères végétaux universels ouvrant par là une source de matière première nouvelle pour l'industrie de la fermentation en général et celle de l'éthanol en particulier. Ce chapitre tente de faire le point sur l'état de l'art et les perspectives.

1.2.1.1.1.1 Principes de base

Tous les sucres en C6 fermentescibles, principalement le glucose et le saccharose, peuvent être convertis en éthanol et en dioxyde de carbone après fermentation anaérobie et catalysée par

une enzyme produite par une levure : *Saccharomyces Cerevisiae*. Les équations des réactions de fermentation sont les suivantes :



Glucose ethanol



Saccharose éthanol

Avec ΔH représentant l'enthalpie massique.

Ces équations sont théoriques et leurs rendements sont appelés rendements de Gay-Lussac. Du fait de la fabrication inévitable de sous-produits divers et de levures, le rendement de Pasteur, égal à 94,7 % du rendement de Gay-Lussac, définit la production d'éthanol. 100 kg de sucre produisent respectivement 48,4 kg et 50,95 kg d'éthanol à partir de glucose ou de saccharose.

1.2.1.1.1.2 Matières premières des sucres

Les sucres sont présents à l'état plus ou moins polymérisé dans le monde végétal. Les plantes dites sucrières ou saccharifères (betteraves à sucre, canne à sucre) produisent directement du saccharose et dans ce cas, le sucre fermentescible est extrait par diffusion. Les plantes amylacées telles les céréales produisent de l'amidon qu'il est nécessaire d'hydrolyser par des enzymes, les amylases. Les sucres obtenus sont alors un mélange de glucose et de maltose.

1.2.1.1.1.3 Technologie de production de l'éthanol

Hydrolyse : L'hydrolyse est appliquée industriellement à l'amidon des céréales avec deux procédés.

La voie humide : le grain est moulu et ses constituants (son, gluten, amidon...) sont séparés de façon classique pour le son et en partie par lavage. Seul l'amidon est traité au cours de l'hydrolyse enzymatique puis fermenté.

La voie sèche : le grain est également moulu et la totalité de ses constituants subit l'hydrolyse enzymatique et la fermentation. Le débouché du coproduit principal, les drèches (appelées en anglais DDGS : Dried Distiller Grain and Solubles), est très important. L'hydrolyse de la cellulose et des hémicelluloses est possible et a fait l'objet d'importants travaux de recherches dans le monde entier. Hormis les procédés utilisant l'hydrolyse acide qui ont été exploités dans le passé, les procédés enzymatiques et/ou combinés à des prétraitements physiques, thermiques et/ou chimiques ont fait l'objet de pilotes de démonstration sans parvenir encore à une évolution véritable vers une taille industrielle importante.

Fermentation: La fermentation traditionnelle des sucres en C₆ (hexoses) par la levure citée, reste la voie industrielle de production de l'éthanol. De nombreux travaux de recherche ont abordé des fermentations différentes avec des bactéries, d'autres levures, voire même des champignons, et la fermentation des sucres en C₅ (pentoses). Quelques voies semblent intéressantes, mais n'ont pas encore trouvé d'applications industrielles permettant de produire de l'éthanol dans des conditions performantes.

Au plan industriel, la principale distinction est à opérer entre les procédés discontinus et les procédés continus de fermentation. Ces derniers (le procédé Speichim et le procédé Biostil) sont plus productifs, avec un rendement supérieur de 1 à 6 % aux procédés discontinus, mais ils sont aussi nettement plus sensibles aux contaminations bactériennes.

Séparation de l'éthanol: Le fractionnement du vin obtenu après l'étape de fermentation conduit à séparer l'éthanol du reste des constituants. La technologie appliquée comprend deux étapes : la distillation et la déshydratation.

La distillation usuelle permet d'obtenir une concentration en éthanol de 96 % en masse, voisine de l'azéotrope (97,1 %). Une distillation des vins par une colonne à double effet nécessite 114 kg de vapeur/hl d'alcool pur et une consommation d'électricité de 2 kWh/hl d'alcool pur. Les variantes de combinaison avec la concentration des vinasses non recyclées, l'existence de multiples effets et la distillation sous vide partiel permettent encore d'améliorer ces consommations énergétiques.

La déshydratation conduit à l'éthanol anhydre (99,7 % minimum en masse) et elle est obtenue par au moins deux techniques : la distillation azéotropique à la pression atmosphérique, en présence de cyclohexane (en général) comme solvant d'entraînement, accompagnée de recompression mécanique de vapeurs.

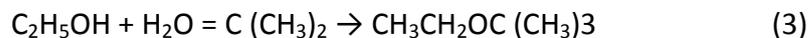
Le tamisage moléculaire qui consiste à adsorber et désorber l'eau sur un support tel des zéolites synthétiques, ou des silicoaluminates métalliques, à structure cristalline tridimensionnelle poreuse. Actuellement, trois installations avec tamis moléculaire sont en exploitation en France pour traiter le bioéthanol.

Une troisième technique a été appliquée pendant quelques temps, mais n'a pas été suffisamment adaptée à l'alcool de betteraves.

Il s'agit de la pervaporation par membrane, très performante au plan énergétique et qui doit pouvoir s'appliquer à d'autres alcools.

1.2.1.1.2 ETBE

L'ETBE peut être produit industriellement à partir de différentes matières premières et de différents procédés à partir d'éthanol et d'isobutane selon la réaction suivante :



L'isobutane est obtenu en raffinerie de pétrole par craquage catalytique du naphta ou par craquage à la vapeur après extraction du butadiène. Le procédé de l'IFP (Institut Français du Pétrole) comprend un réacteur à lit fixe et une distillation réactive et assure une conversion de la plupart de l'isobutane. La composition moyenne du produit obtenu est de 98,5 % d'ETBE et de 1,5 % d'éthanol.

1.2.1.1.3 Méthanol

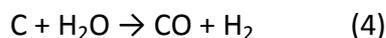
Le méthanol est produit abondamment dans le monde, à partir de gaz naturel. Il peut être produit également à partir de biomasse, et de bois en particulier. Cette voie a été exploitée en France, jusque dans les années 1960 avec le procédé Delacote dans de petites unités (15 t/j de méthanol), et elle a ensuite été testée dans les années 1980 avec le pilote de Clamecy et le procédé Framatome (Creusot- Loire). D'autres procédés ont été également mis en œuvre au Canada et en Suède [4].

Le méthanol produit pourrait servir de constituant pour fabriquer des esters méthyliques d'huile végétale ou du MTBE.

Le faible coût de production du méthanol à partir de Gaz naturel et l'effort d'industrialisation nécessaire de la production à partir de la biomasse a empêché, pour le moment, le développement de cette filière et du procédé Framatome en France.

Rappelons les réactions qui conduisent à la production du méthanol :

— production de gaz de synthèse à 800-1 000 °C, par gazéification de la matière solide :



avec $\Delta H = 130$ kJ (réaction du gaz à l'eau)

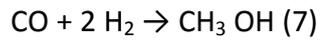


avec $\Delta H = 171$ kJ (réaction de Boudouard)



avec $\Delta H = - 41$ kJ (réaction de conversion).

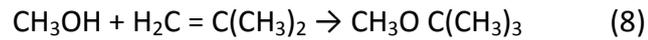
— synthèse du méthanol, avec un catalyseur sous une pression de 50 à 100 bars :



avec $\Delta H = - 110 \text{ kJ}$

1.2.1.1.4 MTBE

Le MTBE peut être produit industriellement à partir de différentes matières premières et de différents procédés à partir de méthanol et d'isobutane selon la réaction suivante :



L'isobutane est obtenu en raffinerie de pétrole de la même façon que pour produire l'ETBE. Le méthanol est obtenu dans 90 % des cas à partir de gaz naturel. Le produit fini obtenu selon le procédé de l'IFP n'est pas pur. Sa composition moyenne est de 99,2 % de MTBE et 0,8 % de méthanol.

1.2.1.2 Filière Huiles végétales et leurs esters

1.2.1.2.1 Huiles végétales non transformées chimiquement

Les huiles végétales s'obtiennent classiquement par simple pressage de graines oléagineuses, suivi d'une extraction par solvant de l'huile résiduelle contenue dans le tourteau. Elles ont cependant une très forte viscosité et une aptitude à l'auto-inflammation (indice de cétane) faible, qui les rendements plus difficiles à utiliser en l'état dans certaines conditions, à faible température, du fait de la longueur de leurs chaînes carbonées.

Elles peuvent alors être transformées chimiquement, en raccourcissant ces chaînes, ce qui modifie leurs caractéristiques.

Les huiles sont utilisées pures, filtrées et dégommees, c'est-à-dire après retrait d'une grande partie des phospholipides. En France, les huiles de colza et de tournesol sont concernées par ces usages qui restent cependant peu développés.

1.2.1.2.2 Esters d'huiles végétales

De nombreux esters peuvent être obtenus avec des caractéristiques différentes selon leur longueur de chaîne carbonée. Les acides gras des huiles végétales sont estérifiés couramment avec l'alcool dont la formule est la plus simple, le méthanol. L'éthanol peut être également utilisé, mais la purification de l'ester semble industriellement plus délicate que celle de l'ester méthylique.

➤ La réaction de transestérification

La formation d'esters méthyliques passe par la réaction de transestérification de triglycérides (huiles végétales ou graisses animales) avec du méthanol selon le schéma suivant:

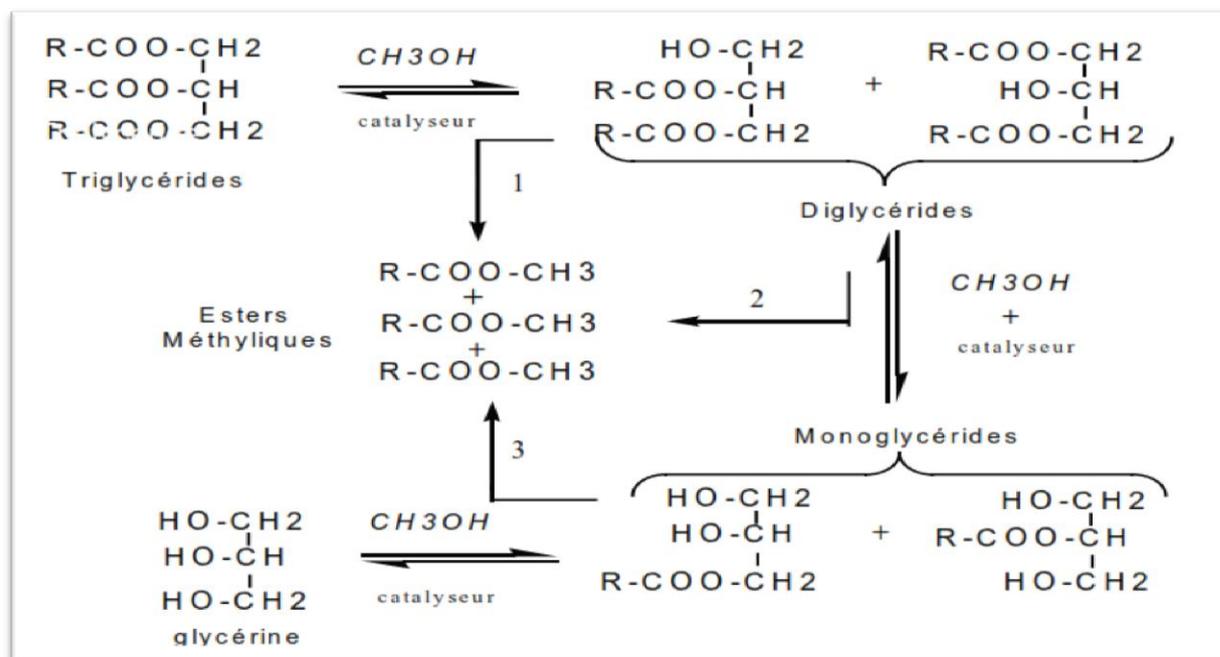


Figure 01: Schéma réactionnel global de la réaction de méthanolyse d'un triglycéride

La figure 1 représente l'équation de réaction équilibrée qui a besoin d'être catalysée. Contrairement à l'estérification, réaction que l'on confond souvent et qui est la combinaison d'un alcool avec un acide, la transestérification consiste à substituer l'alcool d'un ester par un autre alcool. Dans le cas d'un triglycéride, qui est un tri ester d'acides gras de la glycérine, cette dernière qui est un polyol (3 fonctions alcool) est remplacée par 3 molécules de méthanol.

Au vu du précédent schéma, on constate que c'est seulement après trois réactions consécutives que la molécule de glycérine est libérée.[5]

1.2.2 La seconde génération de biomasse

Afin de résoudre l'épineux problème de compétition entre les différents usages des ressources agricoles, alimentation pour la production d'énergie, les biocarburants dits de seconde génération sont apparus. Dans ce cas, les matières premières sont sous la forme de biomasse lignocellulosique.

Il s'agit essentiellement de résidus d'origine agricole non consommables (pailles, tiges de maïs), de résidus forestiers et de sous produits issus de la transformation du bois. Les déchets organiques des industries papetières et agroalimentaires constituent également d'importantes ressources. La transformation de ces nouvelles ressources en carburants est en cours de développement. Deux voies de production sont développées [6].

1.2.2.1 Voie biochimique (éthanol cellulosique)

La voie biochimique désigne la filière de valorisation de la biomasse lignocellulosique par hydrolyse puis fermentation. Le produit final principal est l'éthanol dit « cellulosique », en référence à la fraction majoritairement valorisée de la biomasse. Il est de même nature que le bioéthanol de première génération produit à partir de plantes sucrières ou céréalières telles que le maïs et le blé. Néanmoins, si la filière bioéthanol de première génération est à un stade avancé de maturité technologique, celle de seconde génération se heurte encore à des difficultés techniques et économiques liées à la matière à valoriser [7] :

- la lignine ne peut pas être fermentée en éthanol. Seules les fractions cellulosiques et hémicellulosiques sont des sources potentielles de sucres fermentescibles, respectivement d'hexoses (glucose) et de pentoses ;
- les trois polymères constitutifs de la matière lignocellulosique forment une matrice rigide qu'il est nécessaire de prétraiter pour rendre cellulose et hémicellulose accessibles à l'hydrolyse.

Afin de répondre à ces considérations, le schéma générique du procédé de production d'éthanol cellulosique (figure 2) est articulé autour de quatre étapes principales :

- prétraitement de la matière première afin d'en libérer la fraction hydrolysable ;
- cassure par hydrolyse des molécules de cellulose et d'hémicellulose en sucres, respectivement hexoses (glucose) et pentoses ;
- fermentation des sucres en éthanol ;
- séparation de l'éthanol du moût de fermentation, distillation et séchage afin d'obtenir de l'éthanol anhydre, apte à un usage comme biocarburant.

Il existe différentes variantes de ce schéma générique, en fonction des options choisies pour chaque opération unitaire et des flux de chaque constituant. La distillation est une opération unitaire déjà bien maîtrisée et ne sera pas abordée ici.

En revanche, le prétraitement de la biomasse, l'hydrolyse et la fermentation des pentoses sont des étapes clés du procédé, spécifiques à la filière de seconde génération.

1.2.2.1.1 Prétraitement

Les procédés de prétraitement visent à séparer les constituants intimement liés de la matière lignocellulosique de façon à rendre la cellulose accessible à son hydrolyse ultérieure, en diminuant sa cristallinité et en augmentant la surface spécifique du matériau. Par action thermique et/ou chimique, la structure de la lignine peut également être détruite et

l'hémicellulose plus ou moins hydrolysée. On retrouve ainsi la lignine solubilisée et les produits d'hydrolyse de l'hémicellulose dans la phase liquide et la cellulose et les résidus de lignine et d'hémicellulose dans la phase solide. Les principales contraintes de cette étape sont d'éviter la perte ou la dégradation des sucres qui conduit à une baisse du rendement et de limiter la formation de produits inhibiteurs de la fermentation tels que le furfural (aldéhyde aromatique de la fermentation $C_5H_4O_2$) ainsi que les rejets comme le glycérol.

Il existe de nombreuses technologies de prétraitement qui présentent chacune leurs avantages et inconvénients et sont à différents stades de développement [6] [8] [9]. Le choix de la technologie dépend en général du substrat (paille, bois) mais surtout des impacts qu'elle a sur les coûts et performances des étapes ultérieures d'hydrolyse et de fermentation.

1.2.2.1.1.1 Le prétraitement mécanique

Consiste en un broyage de la matière lignocellulosique en fragments de quelques millimètres. Il vise essentiellement à augmenter les surfaces accessibles. Bien que dépendante de la matière première (plus ou moins fibreuse), l'énergie nécessaire au broyage pour rompre la structure de la lignocellulose est trop importante pour envisager une application industrielle. Le broyage est plutôt utilisé comme préparation préalable de la charge à l'étape de prétraitement proprement dite.

1.2.2.1.1.2 Le Prétraitements physico-chimiques

La **thermo**hydrolyse est un procédé discontinu qui consiste en une cuisson, à l'eau (200 à 230 °C) sous forte pression (50 bar) pendant 15 à 60 minutes. Étudiée essentiellement à l'échelle d'un laboratoire, elle a démontré de bons taux de solubilisation des hémicelluloses (80 à 100 %) et des rendements d'hydrolyse supérieurs à 90 %. Malgré divers attraits tels que l'absence d'inhibiteurs et de faibles rejets, la forte pression rend les applications industrielles difficiles.

L'explosion à la vapeur est l'un des procédés de prétraitement les plus matures à ce jour. Il consiste à porter le matériau à haute température (entre 160 et 270 °C) par injection de vapeur saturée sous haute pression (entre 10 à 50 bar) pendant un temps court (quelques secondes à quelques minutes), puis à pratiquer une détente brutale jusqu'à pression atmosphérique. Cette technique conduit à une déstructuration importante de la matrice lignocellulosique ainsi qu'à l'hydrolyse partielle de l'hémicellulose et à un début de transformation de la lignine du fait des conditions sévères imposées. Les meilleures efficacités sont obtenues en trouvant un compromis entre température et temps de contact (1 min à 270 °C ou 10 min à 190 °C).

Des procédés discontinus (Iotech) et continus (Stake et Iogen) ont été développés et mis en œuvre jusqu'au stade industriel. Leurs points forts sont d'être moins gourmands en énergie et en réactifs chimiques et de générer peu de rejets. Ces techniques sont en outre bien adaptées aux particules de grande taille, limitant les besoins en broyage préalable, mais elles conduisent

à une solubilisation limitée de l'hémicellulose (inférieure à 60 % du maximum théorique) et à une dégradation importante des pentoses et de la lignine, induisant la formation de produits inhibiteurs de fermentation.

Des variantes ont été développées plus récemment pour augmenter les rendements et éviter la formation d'inhibiteurs, par ajout d'acide (H_2SO_4 ou SO_2) ou de CO_2 . La plus prometteuse est l'explosion à la vapeur en conditions acides douces (150 à 200 °C, 16 bar, 2,5 min, 0,1 N d' H_2SO_4). Cette technique, utilisée dans le procédé de logen, est bien adaptée en amont d'une hydrolyse enzymatique.

Le **procédé AFEX** (Ammonia Fiber Explosion) [10], opéré avec une solution d'ammoniaque liquide à haute température (90 à 180 °C) et sous pression (7 à 40 bar), offre l'avantage de moins dégrader les sucres que l'explosion à la vapeur classique. Il est plus efficace sur les biomasses herbacées que sur les biomasses riches en lignine, telles que les bois tendres [10][11].

1.2.2.1.1.3 Les Prétraitements chimiques

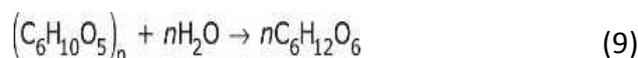
La **préhydrolyse acide** consiste à mettre la matière végétale en contact avec de l'acide dilué (de 0,3 à 2 % par rapport à la matière sèche du substrat) à une température modérée (de l'ordre de 150 °C) pendant 15 à 20 minutes environ. Cette technique permet d'hydrolyser jusqu'à 90 % de l'hémicellulose et de solubiliser partiellement la lignine. Elle présente l'inconvénient de former des produits de dégradation des sucres obtenus tels que le furfural qui inhibe la fermentation ultérieure. Ce prétraitement est bien adapté pour l'hydrolyse enzymatique, il peut constituer la première étape d'une hydrolyse acide. Mais de par la consommation d'acide associée, il est plus coûteux que les prétraitements physicochimiques.

Le **prétraitement en condition alcaline** (8 à 12 % de NaOH entre 80 et 120 °C pendant 30 à 60 minutes) dont le principe est issu du procédé Kraft de fabrication de pâte à papier présente l'avantage de solubiliser quasi totalement la lignine et de diminuer la cristallinité et le degré de polymérisation de la cellulose. L'efficacité de délignification est dépendante de la teneur en lignine du substrat [12]. L'utilisation de soude est cependant trop coûteuse et son recyclage trop difficile pour que ce procédé soit viable.

Enfin, le **procédé Organosolv** [13], issu de l'industrie papetière, consiste en l'extraction de la lignine et de l'hémicellulose par des solvants organiques (éthanol, acétone). À 150-200 °C et en conditions acides, la cellulose et l'hémicellulose sont également hydrolysées (procédé ACOS pour Acid Catalyzed Orga-nosolv Saccharification). Ce procédé est prometteur mais limité par le coût et le besoin de recyclage du solvant.

1.2.2.1.2 Hydrolyse

L'étape faisant suite au prétraitement consiste à convertir les molécules de cellulose en glucose (réaction (9)), c'est l'hydrolyse :



Si l'hémicellulose est facilement hydrolysable, parfois dès le prétraitement, l'hydrolyse de la cellulose en glucose est une opération difficile, du fait de sa structure, de sa cristallinité et de son association avec la lignine et les hémicelluloses encore présentes malgré le prétraitement. L'hydrolyse doit donc être catalysée soit par un acide (dilué ou concentré), soit par des enzymes spécifiques appelées cellulases.

1.2.2.1.2.1 Hydrolyse chimique

L'hydrolyse à l'**acide dilué** se fait généralement en deux étapes. La première est semblable au prétraitement acide vu plus haut et permet de « digérer » les hémicelluloses et de solubiliser les sucres qui en sont issus. Après séparation, la fraction solide riche en cellulose est soumise à une nouvelle hydrolyse qui peut être optimisée indépendamment de la première, en augmentant le rendement global en sucres et en évitant leur dégradation. Les sucres sont ensuite fermentés ensemble ou séparément. Les rendements en glucose sont compris généralement entre 50 et 80 % selon les conditions d'hydrolyse (généralement 190 à 215 °C ; 5 à 10 min ; H₂SO₄ < 1 %).

L'hydrolyse à l'**acide concentré**, est généralement opérée en deux étapes, comme dans le: une première étape de décristallinisation de la cellulose à l'acide sulfurique concentré (40 % de H₂SO₄ à 60 °C), puis une seconde étape d'hydrolyse par de l'acide plus dilué (20 - 30 % à 100 °C).

Ce type de procédé offre de meilleurs rendements (plus de 95 %) à des températures moindres et limite la formation de coproduits nuisibles. Il a néanmoins des inconvénients technologiques (corrosion des réacteurs) et économiques (besoin d'un recyclage très efficace et coûteux de l'acide) qui ont conduit à l'abandon progressif de cette voie, au profit de l'hydrolyse enzymatique.

1.2.2.1.2.2 Hydrolyse enzymatique

L'hydrolyse de la cellulose par voie enzymatique est considérée par de nombreux acteurs comme beaucoup plus prometteuse que la voie acide et a fait l'objet de travaux de recherche depuis les années 1970 [2] [14] [15] [16]. Elle a l'avantage de générer peu d'effluents à traiter et les conditions réactionnelles (45 à 50 °C, pH 4,8) beaucoup moins rudes qu'en hydrolyse acide permettent d'éviter les problèmes de corrosion. En outre, elle serait économiquement plus rentable que l'hydrolyse chimique sur le long terme. Néanmoins, cette voie nécessite le développement d'enzymes spécifiques, les cellulases. Celles-ci sont produites grâce à la culture

de bactéries ou de champignons cellulolytiques. Parmi ces derniers, *Trichoderma reesei* présente à ce jour le meilleur potentiel en termes de concentrations et d'activité des cellulases sécrétées et a été exploité industriellement. Mais le coût de production des cellulases reste élevé et a un impact important sur le coût de revient de la production d'éthanol cellulosique.

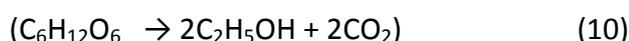
Des détails sur ces mécanismes sont disponibles dans les références [17] [18].

Des recherches sont également menées afin d'optimiser la dégradation enzymatique des hémicelluloses, qui requiert une grande variété d'enzymes (recherche de nouvelles hémicellulases). D'autre part, le développement et l'utilisation industrielle d'enzymes lignolytiques (ligninases) sont envisagés afin d'améliorer le rendement global de conversion en éthanol.

L'hydrolyse par voie acide devient marginale par rapport à la voie enzymatique qui est sans conteste la voie d'avenir. C'est maintenant une étape clé du procédé, porteuse d'enjeux très importants qui génèrent de nombreuses activités de recherche et dont dépend vraisemblablement la viabilité à long terme de la filière d'éthanol cellulosique.

1.2.2.1.3 Fermentation éthanolique

Si la fermentation du glucose en éthanol



Cette réaction bien connue et exploitée depuis des siècles, l'utilisation de matériaux lignocellulosiques comme substrat initial implique des difficultés spécifiques qui justifient des efforts de recherche conséquents.

D'une part, des composés toxiques et inhibiteurs de fermentation (le furfural surtout) peuvent être formés durant l'hydrolyse (voire le prétraitement), diminuant significativement les rendements de conversion. Le glycérol est également un sous produit majoritaire obtenu au cours de la fermentation dont on doit minimiser la production.

D'autre part, la conversion des pentoses tels que la xylose en éthanol



ne peut pas être effectuée par les organismes classiquement utilisés en fermentation. Si certaines levures permettent de convertir les pentoses, elles sont très sensibles aux inhibiteurs et peu performantes. On leur préfère les bactéries, dont certaines souches créées par les biotechnologies génétiques sont capables de convertir à la fois le glucose et les pentoses avec de bons rendements, et de résister aux inhibiteurs [6][10].

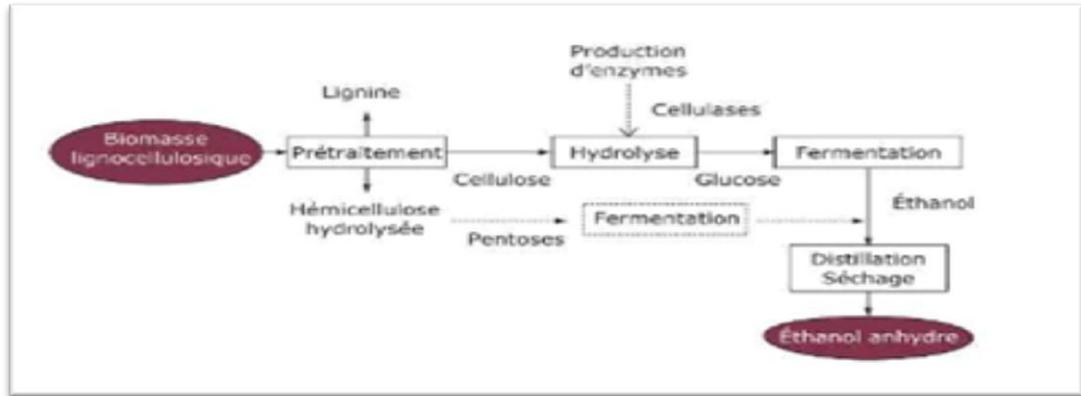


Figure 2 : Schéma de principe du procédé de production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique.

1.2.2.2 La voie thermochimique :

La **voie thermochimique** ou **BTL** (*Biomass To Liquid*) désigne la filière de valorisation de la biomasse lignocellulosique par gazéification puis synthèse. Le produit final peut être du diesel, du DME (diméthyléther), du méthanol ou encore de l'éthanol. Elle doit son nom à la réaction de gazéification qui combine des processus thermiques et chimiques à températures élevées (> 800 °C). Elle produit entre autres l'hydrogène (H_2) et le monoxyde de carbone (CO) qui, dans une étape ultérieure du procédé, sont valorisés en hydrocarbures liquides ($C_xH_yO_z$). Si l'étape de transformation d'un gaz de synthèse ($CO + H_2$) en hydrocarbures est bien maîtrisée industriellement, en particulier dans les procédés **GTL** (*Gas To Liquid*), les technologies de gazéification de biomasse, quant à elles, ne permettent pas aujourd'hui de produire directement un gaz de synthèse de qualité suffisante. Des étapes d'épuration et de conditionnement du gaz en sortie du réacteur de gazéification sont nécessaires, tout comme le conditionnement de la matière première en amont du réacteur [10].

Ainsi, la conversion de la biomasse en biocarburants par voie thermochimique se fait à travers les étapes suivantes (figure 3) :

- le prétraitement de la biomasse
- la gazéification
- l'épuration du gaz de gazéification
- le conditionnement en gaz de synthèse
- la synthèse d'hydrocarbures

1.2.2.2.1 Gazéification

La gazéification met en jeu un ensemble de transformations thermo-chimiques [19]. La biomasse après séchage passe par une étape de pyrolyse où elle est convertie en composés hydrocarbonés gazeux (matières volatiles) et en résidu carboné (charbon). Cette transformation, très sensible à la température, démarre significativement à partir d'une température d'environ 250 °C. Par la suite, les matières volatiles subissent diverses réactions de craquage homogène, de combustion (si présence d'un gaz oxydant) et de reformage à la vapeur qui produit de l'hydrogène et du monoxyde de carbone. Le charbon peut être partiellement oxydé puis est gazéifié par une réaction hétérogène entre le carbone et la vapeur d'eau/dioxyde de carbone pour produire également H₂ et CO.

En sortie du réacteur de gazéification, le gaz contient de l'hydrogène et du monoxyde de carbone, et en quantité plus faibles des hydrocarbures légers (CH₄, C₂H₄, C₂H₆), de l'azote, si l'air est utilisé comme agent oxydant, du dioxyde de carbone, et des produits indésirables tels que des goudrons et des composés inorganiques dans des proportions variables. Sa composition dépend principalement de la nature du gaz oxydant (air, oxygène, vapeur d'eau) et du type de technologie.

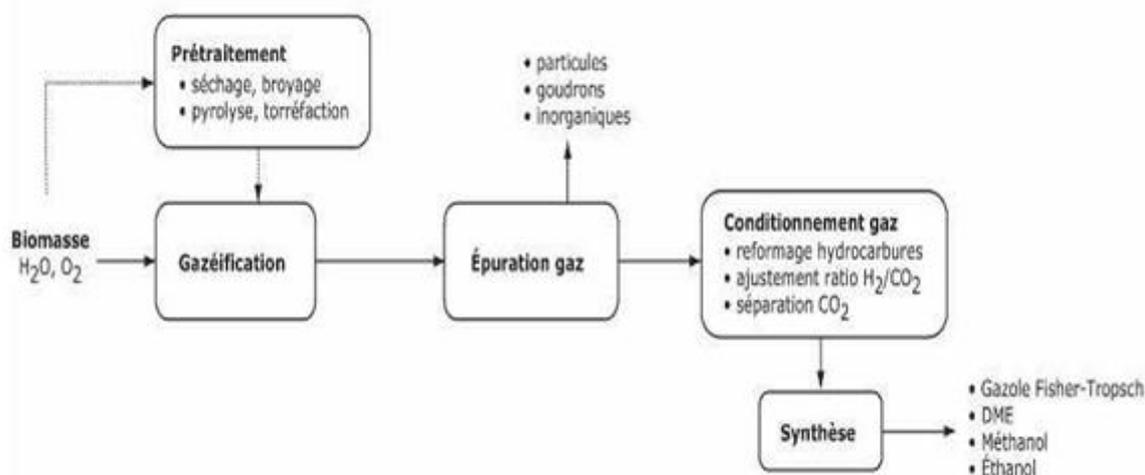


Figure 3 : Schéma de principe du procédé de production gaz de synthèse à partir de gazéification

Les technologies de gazéification [19] [20] [21] [22] sont généralement classées selon différents critères. Les principaux critères sont :

- le type de technologie qui peut se décliner en : lit fixe, lit fluidisé, lit entraîné, ou encore des variantes de ces trois principes
- la nature du gaz réactif qui peut être de l'air, de l'oxygène ou de la vapeur d'eau. Seuls les procédés utilisant de l'oxygène ou de la vapeur d'eau sont développés pour des

applications biocarburants en raison de la richesse nécessaire du gaz en hydrogène et en monoxyde de carbone

- la pression est un paramètre important pour le dimensionnement d'un réacteur de gazéification généralement imposé par le type d'application et la taille de l'installation.
- l'apport d'énergie dans le procédé. Un procédé de gazéification nécessite un apport énergétique pour les phénomènes thermiques que sont le chauffage, le séchage, le reformage des goudrons, l'oxydation à la vapeur d'eau ou au dioxyde de carbone.

L'épuration du gaz, en aval du procédé de gazéification, est nécessaire pour éliminer les produits indésirables tels que particules, goudrons et composés inorganiques, et atteindre les spécifications des réacteurs de synthèse.

Pour les particules, le système de filtration associe un séparateur grossier de type cyclone à une filtration plus fine par filtre de masse (à lit granulaire) ou filtre à manches (céramiques, métalliques) ; les filtres électrostatiques sont aussi parfois utilisés dans les procédés de gazéification.

En ce qui concerne les goudrons, leur élimination peut se faire par craquage thermique ou catalytique, ou bien par lavage humide.

Les composés inorganiques (composés azotés et soufrés, alcalins, métaux lourds) peuvent, pour leur part, être éliminés également par voie humide (lavage), ou bien par voie sèche pour laquelle de nombreux réacteurs et adsorbants industriels ont été développés pour d'autres applications.

Le conditionnement du gaz vise à obtenir le gaz de synthèse, c'est-à-dire un mélange d'hydrogène et de monoxyde de carbone le plus pur possible et avec un ratio H₂/CO supérieur à 2. Dans ce but, le reformage à la vapeur du méthane et des autres hydrocarbures permet de maximiser la quantité d'hydrogène alors que la réaction du gaz à l'eau (water gasshift) permet elle d'optimiser le ratio H₂/CO. Ensuite, l'élimination du CO₂ par des techniques de séparation est réalisée afin de limiter la teneur en gaz inerte dont la présence limite l'efficacité de la synthèse et augmente les volumes des réacteurs en aval.

Les gaz de synthèse produits par gazéification permettent l'élaboration de carburants tels que méthanol, diméthyléther (DME), gaz naturel de synthèse (GNS), éthanol et gazole Fischer-Tropsch.

1.2.3 Troisième génération : l'énergie des micro-algues

Le biométhane de 3^e génération (3G) provient de la transformation de micro-algues photosynthétiques, cultivées dans des réacteurs en milieu liquide et se développant à l'aide de lumière naturelle. Ces micro-algues sont l'origine de la composition actuelle de l'atmosphère terrestre et disposent de capacités de biorémédiation inédites et de la propriété de recycler le CO₂ issu de sources naturelles (atmosphère) ou de sources humaines (effluents gazeux issus de la combustion de ressources fossiles telles que le charbon, pétrole...). La filière de 3^e génération sera une filière de production d'énergie fortement intégrée sur le plan énergétique et environnemental au paysage économique local. Le biométhane 3G sera le premier biométhane ne dépendant pas de ressources primaires et pourra être produit dans des zones géographiques ne disposant pas de ressources de biomasse mais qui souhaitent disposer d'un carburant renouvelable souple et stockable. Cette technologie encore émergente devrait être industrialisée à horizon 2020-2030.[23]

2 Méthanisation

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 anaérobie, contrairement au compostage qui est une réaction aérobie). Ce processus se déroule en enceinte fermée (appelée digesteur, fermenteur ou réacteur) généralement calorifugée afin d'y maintenir une température constante. On estime que entre 20 et 40% de l'énergie primaire produite par le biogaz est utilisée pour réchauffer et maintenir en température le digesteur (à température mésophile ou thermophile) [24][26].

2.1 procédés des méthanisation

Les procédés de méthanisation se distinguent principalement selon :

2.1.1 la teneur en matière sèche

- les procédés à voie humide (% matière sèche inférieur à 15%). On retrouve ces types de procédé pour les effluents dits liquides (boues, lisiers, ...). Ils peuvent être utilisés pour les déchets solides nécessitant alors leur dilution.
- les procédés à voie sèche (% matière sèche entre 15% et 40%). Les procédés en voie sèche ont été développés pour traiter les déchets solides. Ces procédés nécessitent un volume moindre (substrat concentré) mais une bonne maîtrise de la circulation de la matière (pompage et brassage).

2.1.2 la température de réaction

- la digestion anaérobie mésophile (température moyenne = 35°C ; temps de séjour moyen = 3 semaines)

- la digestion anaérobie thermophile (température moyenne 55 à 60°C ; temps de séjour moyen réduit = 10 à 15 jours)

2.1.3 les modes d'alimentation et d'extraction des déchets

- les procédés continus : 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.
- les procédés discontinus, dits « batch » : les digesteurs sont remplis puis vidés séquentiellement lorsque la production de biogaz chute ou devient nulle.
- les procédés 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.[25][26]

2.2 Les phases de dégradation biologique dans la méthanisation

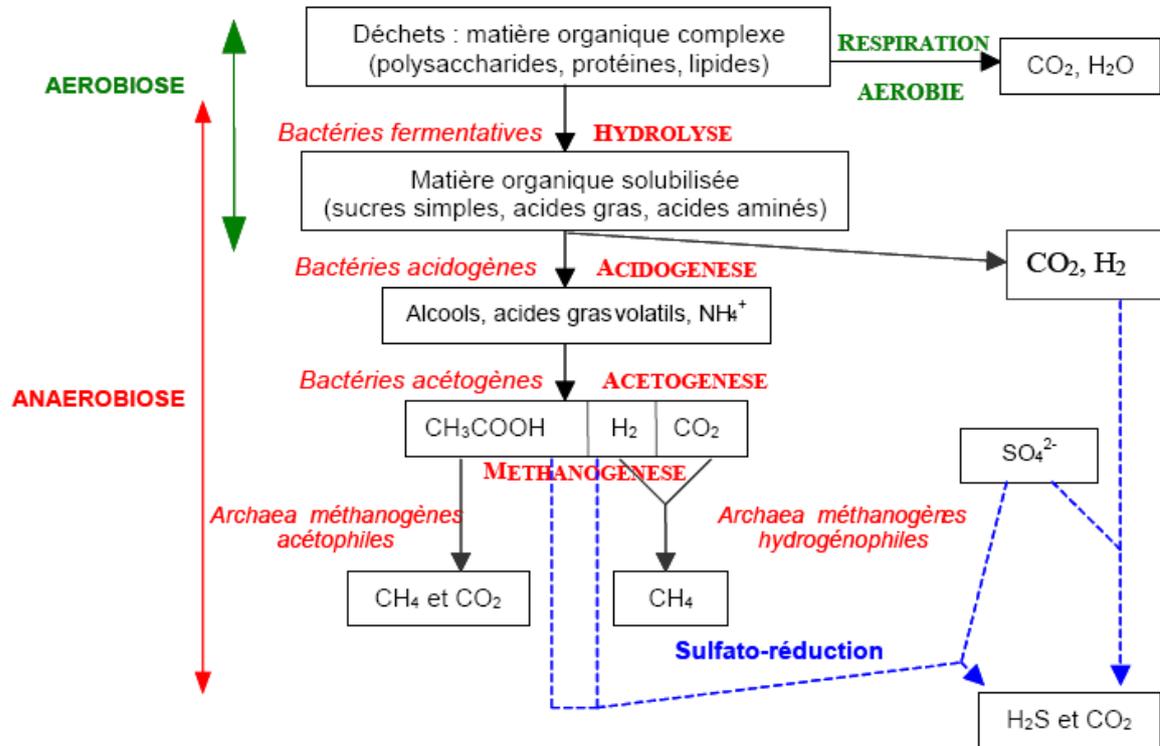


Figure 4 : Représentation séquentielle de la dégradation anaérobie des déchets

2.2.1 La phase aérobie de dégradation

La phase de dégradation aérobie des déchets est en général très limitée lors d'une méthanisation hors sol (essentiellement lors de la collecte et du transport). Elle intervient par contre de manière significative dans le cadre d'un enfouissement en installation de stockage. A leur arrivée en ISDND, les déchets sont déposés et compactés dans des alvéoles, selon une succession de couches horizontales. Les déchets sont alors au contact de l'air et de son oxygène pendant la période qui s'étale du dépôt jusqu'à l'ajout d'une nouvelle couche de déchet ou de la fermeture de l'alvéole par une couverture imperméable.

L'étude des gradients verticaux de concentration en oxygène au sein d'un volume de déchets montre que la diffusion de l'oxygène de l'atmosphère est significative dans le massif et dépend à la fois de la compaction des déchets et du temps d'exposition (Lanini 1997; Aguilar-Juarez 1999).

Cette interaction déchets-oxygène va initier une phase de dégradation aérobie des déchets qui va durer pendant les premières semaines d'exploitation de l'alvéole. Cette phase est généralement caractérisée par une montée en température du volume de déchets qui peut

s'élever jusqu'à 80°C, due aux réactions exothermiques de biodégradation des putrescibles. Cette phase s'accompagne d'une production de dioxyde de carbone et de vapeur d'eau. La température va ensuite diminuer et se stabiliser aux environs de 30 à 40°C . Il a été estimé que 5 à 15% de la matière biodégradable pouvait être consommée lors de cette dégradation aérobie.

La phase de décomposition aérobie, à travers cette augmentation de température, permet la croissance ultérieure des populations microbiennes anaérobies. Elle a une influence positive sur le démarrage de la biodégradation du massif de déchets et sur l'installation d'une méthanogenèse stable. En métabolisant une partie des déchets facilement biodégradables, elle permet également d'éviter une hydrolyse/acidogenèse trop rapide et intense qui peut entraîner un relargage important d'AGV et par conséquent bloquer les phases ultérieures de la dégradation anaérobie.[27][28]

2.2.2 Les phases anaérobies de dégradation

Les phases de dégradation anaérobie des déchets prennent place dès que le système ne présente plus d'oxygène et conduisent à la production de deux effluents distincts mais interdépendants que sont le lixiviat et le biogaz. Celui-ci est principalement composé de dioxyde de carbone et de méthane. Les processus de dégradation conduisant du déchet jusqu'à ces molécules mettent en jeu différentes populations de microorganismes (et donc des conditions optimales de croissance et d'activité optimales différentes). Ces populations travaillent en série (les produits d'une réaction seront les substrats d'une autre) (Farquhar 1973; Barlaz, Ham et al. 1990) et en parallèle : au sein d'un même massif, différents éléments de volume peuvent se trouver à des stades différents de dégradation anaérobie. On distingue plusieurs grandes étapes dans la dégradation anaérobie :

1. l'hydrolyse
2. l'acidogenèse
3. l'acétogenèse et l'homoacétogenèse
4. l'oxydation syntrophique de l'acétate
5. la méthanogenèse

Et des réactions minoritaires :

- l'oxydation anaérobie du méthane
- la sulfato-réduction

Puis :

- la maturation et la stabilisation des déchets

2.2.2.1 L'hydrolyse

La phase d'hydrolyse correspond à la décomposition des polymères complexes des matériaux organiques sous forme des monomères les constituant. Ces réactions sont catalysées par des enzymes extracellulaires comme les cellulases, les lipases, convertissant les matières grasses en acides gras et glycérol, ou les protéinases, enzymes coupant les liaisons peptidiques des protéines et relâchant des acides aminés ou des oligopeptides dans le milieu. Les polysaccharides sont également transformés en sucres plus simples. De l'ammonium peut être libéré durant cette étape.

Cette phase permet aux microorganismes de type fermentatif d'incorporer des nutriments (Christensen 1989). On considère que les fractions dites putrescibles des déchets (déchet alimentaires principalement) s'hydrolysent rapidement dans une ISDND ou un digesteur hors sol. Dans une ISDND, cette phase d'hydrolyse peut se dérouler en conditions aérobies ou microaérophiles, sous l'action de microorganismes respirant l'oxygène et de champignons. Les fractions lignocellulosiques (papier, cartons, bois,...) s'hydrolysent beaucoup plus lentement et la vitesse de réaction est inférieure aux vitesses de réaction des étapes suivantes. Ainsi, une fois que se sont installées les étapes aval de la dégradation, l'hydrolyse de ces fractions spécifiques devient l'étape cinétiquement limitant pour le processus global. [28]

2.2.2.2 L'acidogenèse

Les monomères issus de l'hydrolyse sont disponibles pour les groupes bactériens acidogènes. La flore est constituée pour partie de bactéries anaérobies facultatives (genres Streptocoques, Bacillus, Micrococcus...) et pour une autre de bactéries anaérobies strictes (genre Clostridium). Les molécules vont être converties en de nouveaux composés organiques simples tels que des alcools et des acides gras volatils.

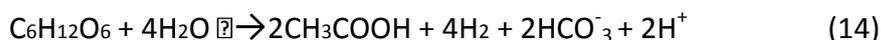
Parmi les AGV et les acides organiques, on trouve :

- l'acide acétique (CH_3COOH)
- l'acide propionique ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$)
- l'acide lactique ($\text{CH}_3\text{CHOHCOOH}$)
- l'acide butyrique ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COOH}$)
- l'acide iso-butyrique ($(\text{CH}_3)_2\text{CHCOOH}$)
- l'acide valérique ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{COOH}$)
- l'acide iso-valérique ($(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2\text{COOH}$)
- l'acide caproïque ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{COOH}$)

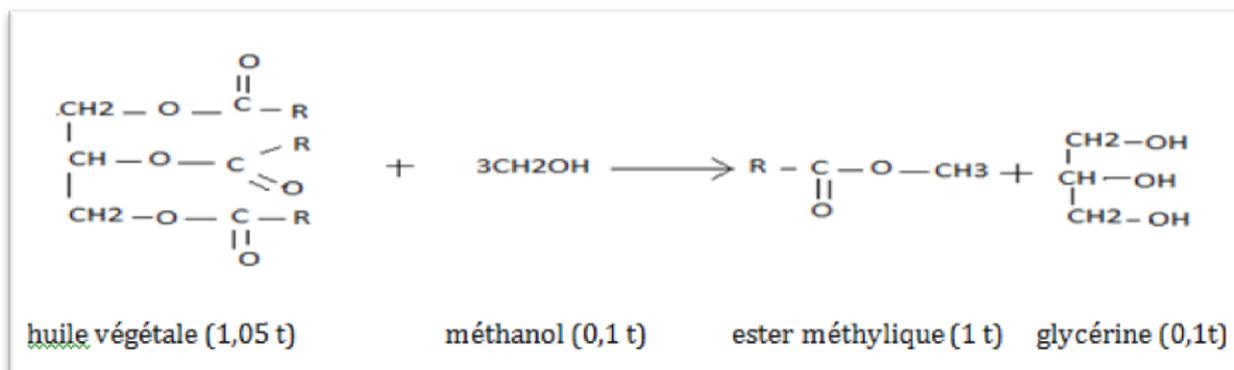
- ...

Les réactions de dégradation du glucose ci-dessous sont données à titre d'exemple

(Thauer, Jungermann et al. 1977).



Les acides générés pendant l'acidogénèse vont provoquer une diminution du pH, avec des impacts aussi bien sur la physico-chimie du milieu (dissolution de matière organique) que sur sa biologie (Siegert and Banks 2005; Wang, Zhang et al. 2009) : les bactéries acidogènes préfèrent des environnements acides (pH entre 4,5 et 5,5). Leur action va donc être favorisée dans une certaine mesure par cette production d'AGV.

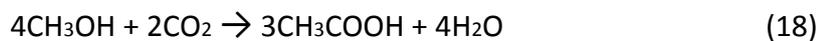
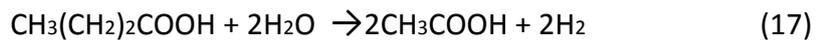


Equation (14)

La réaction est obtenue avec un catalyseur basique ou acide, à température modérée de 20 à 80 °C et à la pression atmosphérique. Dans le cas du colza, une 1 t d'huile est obtenue avec 2,55 t de graines, correspondant à la récolte d'une superficie de 0,85 ha, (avec une production moyenne de 30 quintaux/ha de graines). Un hectare de colza peut fournir dans ces conditions 1 273 L ou 1 125 kg d'ester méthylique. Avec un rendement de 35 quintaux/ha de graines, cette production devient 1 485 L ou 1 312 kg d'ester méthylique.

2.2.2.3 L'acétogénèse, l'homoacétogénèse

La troisième étape de la dégradation anaérobie correspond à l'acétogénèse. Durant cette étape, ce sont les alcools et les AGV produits préalablement qui sont utilisés en tant que substrat pour former de l'acide acétique, de l'hydrogène et du dioxyde de carbone. Le profil des produits formés durant cette étape varie avec le type de bactéries dans le système, ainsi que les conditions environnementales comme la température et le pH.



On distingue trois types de bactéries acétogènes (Pelmont 1993) :

- les homo-acétogènes, produisant essentiellement de l'acétate à partir de dioxyde de carbone et de dihydrogène, mais pouvant également utiliser le méthanol, la méthylamine ou le formate. Les microorganismes responsables de ces réactions sont strictement anaérobies et forment un groupe extrêmement hétérogène : on y trouve des microorganismes Gram-positifs, Gram-négatifs, des morphologies de type bacilles et coques, le développement des températures variées (psychrophiles, mésophiles, thermophiles). Cette étape est un processus consommant l'hydrogène des ISDND et MHS de façon significative.

- les hétéro-acétogènes, convertissant les substrats organiques en caproate, butyrate et acétate

- les mixotrophes, utilisant à la fois le dioxyde de carbone, le dihydrogène et les substrats organiques

L'accumulation trop rapide d'acétate lors de cette étape peut inhiber les réactions de conversion du propionate par exemple ou les réactions suivantes de méthanogénèse. Dans le même ordre d'idée, la croissance des bactéries acétogènes nécessite une très basse pression partielle en H_2 (Inférieure à 10^{-4}atm) pour rendre la production d'acétate thermodynamiquement possible.

Le bon déroulement de cette étape n'est possible que si une syntrophie étroite existe entre les bactéries acétogènes productrices d'hydrogène (souvent désignées sous le terme OHPA pour Obligat Hydrogen Producing Acetogens), produisant de l'acétate par oxydation du propionate et du butyrate en particulier, et les microorganismes consommateurs d'hydrogène, appartenant aux étapes suivantes de la dégradation comme les méthanogènes et les sulfato-

réducteurs. Malgré l'importance de la relation syntrophique entre ces deux taxons, peu d'étude ont été effectuées sur la taxonomie des bactéries oxydant les AGV, leur diversité et leur physiologie. Ce manque de données provient de la difficulté d'isoler ces microorganismes. Plusieurs bactéries oxydant le butyrate, le propionate et l'acétate ont toutefois été isolées en co-culture avec des méthanogènes hydrogénotrophes dans les dernières années.

On peut donc voir que l'acétogénèse est une étape-clef à différents niveaux : son bon ou mauvais déroulement conditionne le blocage de la dégradation à cette étape (l'accumulation d'hydrogène, d'AGV et la baisse de pH sont trois leviers pouvant chacun inhiber la méthanisation) ou l'avancée à l'étape suivante.

2.2.2.4 L'oxydation syntrophique de l'acétate

L'oxydation syntrophique de l'acétate correspond à la réaction durant laquelle cette molécule est oxydée en H₂ et CO₂ (ces deux produits pouvant être convertis en méthane par la suite). L'oxydation syntrophique a été identifiée dans certains environnements naturels en condition psychrophile, mésophile et thermophile, Deux facteurs environnementaux influencent l'activité de l'oxydation syntrophique : la température et la concentration en acétate. La réaction est favorisée pour de faibles concentrations en acétate.

2.2.2.5 La méthanogénèse

La méthanogénèse correspond à la phase de production biologique du méthane au sein d'un système de dégradation anaérobie. Elle se déroule en anaérobiose stricte, sous l'action de trois types de microorganismes méthanogènes, tirant de cette réaction l'énergie nécessaire à leurs activités métaboliques :

- les hydrogénotrophes (Methanosarcina, Methanobacterium,

Methanococcus), transformant l'hydrogène et le dioxyde de carbone en méthane selon la réaction :

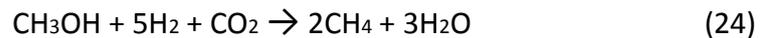


- les acétoclastes (Methanosarcina, Methanosaeta), convertissant l'acide acétique en méthane et en dioxyde de carbone selon la réaction :



- les méthyloxydants (Methanosarcina), transformant le méthanol ou le méthylamine en méthane et dioxyde de carbone selon les réactions :





Méthanol + Acétate → Méthane

On peut remarquer que certains méthanogènes comme *Methanosarcina* sont capables de produire du méthane selon les trois voies métaboliques.

Les trois types de méthanogenèse suivent différentes voies métaboliques.

Différents substrats intermédiaires, enzymes et coenzymes interviennent.

Le méthylcoenzyme M en particulier constitue un composé clef car il est commun aux trois processus de méthanogenèse : la production du méthane est catalysée par la méthylcoenzyme M réductases qui réduit le groupe méthyle du méthyl-coenzyme M en utilisant les électrons apportés par le coenzyme B, donneur d'électron commun chez tous les méthanogènes.

La littérature rapporte que 65% du méthane est issu de la conversion de l'acétate et la méthanogenèse hydrogénotrophe ne peut théoriquement dépasser 33% à cause de la balance entre production d'hydrogène et d'acétate des voies fermentatives et les nombres de moles respectives nécessaires pour la production de la même quantité de méthane.

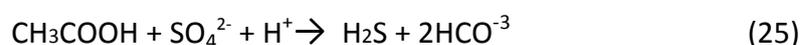
Alors que la méthanogenèse acétoclaste est favorisée par des concentrations élevées en acétate, la méthanogenèse hydrogénotrophe, via l'oxydation syntrophique de l'acétate, sera activée et peut devenir la voie dominante de la méthanogenèse à faible concentration en acétate.

Toutefois, tout comme les bactéries acidogènes abaissaient le pH du système à une valeur qui leur était favorable de par leur action fermentative, la consommation des AGV par les archées acétoclastes entraîne une augmentation du pH vers une plage de valeur stimulant la méthanogenèse. Cette remontée du pH peut s'accompagner de la précipitation d'éléments inorganiques.

2.2.2.6 Réactions minoritaires

- La sulfato-réduction :

Parallèlement à la méthanogenèse, des réactions de sulfato-réduction peuvent se produire sous l'action de bactéries sulfato-réductrices (Zhou and Fang 1998). Ces réactions nécessitent du sulfate pour prendre place. Les principaux microorganismes sulfato-réducteurs sont les espèces *Desulfovibrio* et *Desulfobacter*.



Du fait de la consommation d'hydrogène, d'acide acétique et d'AGV pour la production de dioxyde de carbone et d'hydrogène sulfureux (HS), une compétition avec les méthanogènes hydrogénotrophes et acétoclastes prend place.

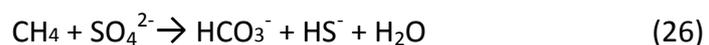
Les bactéries sulfato-réductrices ont un avantage thermodynamique et cinétique sur les méthanogènes. En effet, la réaction de conversion d'acétate en méthane par les archées acétoclastes a un ΔH de -37 kJ par mole d'acétate alors que la réaction de conversion de l'acétate en présence de sulfate donnant du H_2S a un ΔG_0 de -56 kJ par mole. Cette seconde réaction est thermodynamiquement plus favorable. Si le taux de croissance des sulfato-réductrices est du même ordre de grandeur que celui des méthanogènes, l'affinité de ces bactéries pour l'hydrogène et l'acétate est plus forte.

La littérature est très controversée en matière de compétition entre ces deux groupes trophiques, il est difficile de prévoir l'évolution des systèmes de digestion anaérobie en présence de sulfate. Si les sulfato-réductrices ont un avantage écologique par rapport aux méthanogènes, elles sont toutefois moins tolérantes aux métaux lourds et à certaines teneurs en H_2S [31][28]

- L'oxydation anaérobie du méthane

L'oxydation anaérobie du méthane (OAM) s'apparenterait à une réaction de

méthanogenèse inversée, et met en jeu des bactéries sulfato-réductrices en association avec un partenaire archée ANME (Anaerobic Methanotroph). Le méthane est oxydé en présence de sulfate comme accepteur d'électrons [29]



Les mécanismes de l'OAM et la nature des microorganismes impliqués constituent un sujet de recherche et de débat important.

- La dénitrification

En présence de nitrate dans le système, la méthanogenèse est remplacée par la réaction de dénitrification. Néanmoins, cette réaction ne peut être une réaction majoritaire dans une ISDND de par l'absence de nitrate dans le lixiviat.



- La solvantogénèse

La solvantogénèse est une réaction de production de solvants organiques (éthanol, butanol), qui prend place après l'hydrolyse et l'acidogénèse dans des conditions riches en AGV (la concentration n'est pas clairement définie et varie entre 2 et 30mM et en hydrogène. Le pH doit être bas : pH optimum pour la production de solvant autour de 4,5. Cette réaction permet d'allouer, en partant d'une mole de glucose, plus d'énergie aux microorganismes syntrophes (méthanogènes), qu'aux fermenteurs et donc d'améliorer leur croissance.

2.2.3 Les effluents générés durant la dégradation

Pour connaître le stade de dégradation d'un massif de déchets, il faut s'intéresser aux différents éléments évoluant dans ce massif. Si la phase solide n'est pas accessible en raison de son enfouissement, ce n'est pas le cas des effluents liquides et gazeux qui sont accessibles grâce au captage. Toutefois, les données récupérées constituent une information sur la globalité de l'alvéole. Un digesteur peut se remplir sur plusieurs semaines. Les premiers déchets enfouis ne seront pas au même stade de dégradation que les déchets les plus jeunes, au sommet de l'alvéole, et les effluents récupérés sont un mélange de ces différents volumes "élémentaires".

2.3 Le biogaz produit

Sa composition évolue avec la phase principale en place dans le massif de déchets. Pour rappel, les principaux gaz sont le dioxyde de carbone (produit durant l'acidogénèse et la méthanogénèse), le méthane (produit durant la méthanogénèse), l'hydrogène (produit durant l'acidogénèse), l'hydrogène sulfureux (produit s'il y a présence de sulfate à la fin de l'acidogénèse et au début de la méthanogénèse). Des traces de protoxyde d'azote N_2O (Ryu), quatrième gaz à effet de serre après la vapeur d'eau, le CO_2 et le CH_4 , peuvent également être détectées, ainsi que de l'ammoniac NH_3 produit à partir des protéines.

Sa composition moyenne est la suivante :

CH_4 : 50 – 80 %

CO_2 : 15 – 45 %

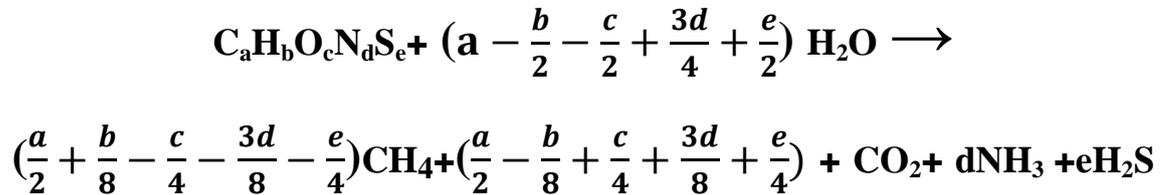
H_2O : 5 %

H_2S : 0.2%

Le potentiel de production du biogaz estime Trois approches sont utilisées pour prédire la production de méthane à partir de la composition des déchets entrants : l'approche stœchiométrique, l'approche fondée sur la biodégradabilité des déchets (BMP : Biochemical Methane Potential).

2.3.1 L'approche stœchiométrique

Elle consiste à considérer la composition élémentaire des différents constituants des déchets, les produits de la réaction globale de dégradation, et à équilibrer les deux membres de l'équation-bilan ainsi formée (Equation 29).



Equation 29 : Equation bilan de la méthanisation de la matière organique

Cette équation ne prend toutefois pas en compte la partie du carbone détournée par la biomasse, estimée entre 5 et 10%. Lorsque la composition élémentaire des déchets est connue, cette équation permet de déterminer à la fois la composition du biogaz et sa production théorique totale. Selon la proportion des différents constituants des déchets, les productions de gaz seront théoriquement différentes. L'approche purement stœchiométrique suppose que la minéralisation des constituants soit totale, elle donne donc un potentiel maximum.

Les productions théoriques fondées sur cette approche seraient au maximum comprises entre 200 et 270 m³ par tonne de déchet sec selon les proportions chimiques utilisées et les proportions habituelles des différents constituants dans les déchets ménagers.

2.3.2 L'approche via la biodégradabilité des déchets (approche BMP)

En réalité, la dégradation est rarement complète, comme nous l'avons évoqué avec la maturation et stabilisation des déchets. Certains composants sont plus facilement biodégradables, comme les putrescibles. C'est pourquoi il est plus courant de s'intéresser à la biodégradabilité des déchets pour estimer au mieux le potentiel d'un déchet selon sa composition. Cette approche consiste donc à considérer différentes valeurs de biodégradabilité pour les différents composants des fractions des déchets et à utiliser un taux moyen pondéré de production de méthane. Les valeurs de la littérature pour le potentiel de la production de méthane selon cette méthode sont comprises entre 60 et 170 m³ par tonne de déchet sec [32]. On peut voir que la prise en compte de la biodégradabilité abaisse sensiblement le potentiel en comparaison avec l'approche stœchiométrique.

La réalisation des tests BMP basés sur une étude fraction par fraction et non sur un déchet total induit toute fois un biais au niveau de l'interaction entre les dégradations de divers composés. Les variations des inocula utilisés pour activer la dégradation des déchets, ainsi que celles des phases liquides enrichies en éléments-traces pour nourrir ces microorganismes sont autant de sources d'études et de débat. De plus, le déchet évolue au cours du temps en termes de composition. En fonction de son évolution, le potentiel BMP peut être affecté.

2.4 Avantages de la méthanisation

La méthanisation de déchets organiques présente de nombreux avantages :

- une double valorisation de la matière organique et de l'énergie (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
- un traitement possible des déchets organiques gras ou très humides, non compostables.
- une faible emprise au sol des unités de traitement et l'existence d'une offre d'installations compactes
- une limitation des émissions d'odeurs à priori du fait de digesteur hermétique et de bâtiment clos équipés de traitement d'air performant.

2.5 Contraintes de la méthanisation

La méthanisation présente des inconvénients à ne pas négliger :

- ce procédé permet de traiter seulement la matière organique biodégradable, ce qui nécessite d'associer la méthanisation à l'incinération et aux centres de stockages de déchets non dangereux pour les autres fractions de déchets
- une phase de compostage peut être nécessaire pour traiter les déchets ligneux plus difficilement dégradables et pour finaliser la maturation de la matière organique
- un traitement des excédents hydriques du procès peut être nécessaire.

3. Applications des biocarburants

3.1 Application des alcools et de leurs éthers

Les alcools, tels l'éthanol ou le méthanol, ont été ou sont encore utilisés dans le monde, purs ou en forte proportion dans l'essence, avec des moteurs adaptés, mais seul l'éthanol est obtenu couramment à partir de la biomasse. L'utilisation la plus importante et en forte proportion concerne l'éthanol au Brésil avec des moteurs à essence modifiés ou des flottes captives, comme par exemple certains bus de Stockholm (moteurs Diesel légèrement modifiés).

L'éthanol et ses dérivés oxygénés peuvent avoir une utilisation généralisée en faible proportion, comme co-carburant ou comme additif dans l'essence. Les usages, les avantages et les contraintes n'étant pas les mêmes à forte et à faible concentration de composés oxygénés, l'utilisation d'éthanol et de son éther, l'ETBE, dans différentes conditions est présentée ci-après.

3.1.1 Forte concentration de composés oxygénés

Les composés oxygénés peuvent être utilisés seuls ou en forte concentration comme carburant. Les pays concernés actuellement ou récemment par cette utilisation sont principalement le Brésil, les États-Unis, la Suède et la France. Aux États-Unis et en Suède, des mélanges d'éthanol à 85 % issu de la biomasse (E85) ou à 95 % (E95) sont utilisés par exemple avec des véhicules flexibles, Ford et General Motors proposent à leur catalogue de tels véhicules.

Équipés de capteurs d'analyse des gaz d'échappement, ces véhicules peuvent utiliser de l'essence seule ou un mélange essence/éthanol dont l'optimum se situe autour de 85 % d'éthanol. Les émissions mesurées sur des Ford Taurus indiquent une diminution des NOx de - 20 à - 40 %, du benzène de - 70 à - 90 % et des émissions toxiques cancérigènes de - 55 à - 65 % . La consommation est de 1,3 L de E85 pour 1 L d'essence pure.

Le Brésil a développé fortement l'usage à 100 % d'éthanol hydraté (95,5 °GL), avec un indice d'octane recherche de 130 et un PCI de 5926kcal/kg (24 803 kJ/kg), avec des véhicules

spécialement conçus, dont le taux de compression du moteur est de 12,7, afin de compenser en grande partie la différence de pouvoir calorifique entre l'éthanol et l'essence. En dix ans, de 1980 à 1991, le Brésil a produit près de 5 millions de véhicules fonctionnant à l'alcool et en 1995, le parc était encore composé de 4,3 millions de véhicules fonctionnant à l'éthanol.

En France, quatre bus équipés de moteurs Diesel dont l'injection et l'alimentation du carburant ont été modifiées ont parcouru environ 1 million de kilomètres en utilisant de l'éthanol hydraté pur à 95 °GL, un additif détonant améliorant l'indice de cétane (3,7 %) et l'adjonction de deux alcools dénaturants (4 %) La Suède a ensuite appliqué cette solution à une flotte de bus urbains.

3.1.2 Faible concentration de composés oxygénés

Aux États-Unis, depuis 1978, comme en France, il a été établi, après plusieurs années d'expérience, que le bioéthanol pouvait être incorporé dans les essences à hauteur de 5 à 10 % en volume sans modification notable du niveau de performance des moteurs et sans aucun aménagement de ceux-ci. En France, un arrêté modifié du 16 septembre 1987 autorise l'incorporation de composés oxygénés jusqu'à des taux limites de 3 à 15 % en volume, selon la nature du produit (dont 5 % pour l'éthanol absolu et 15 % pour les éthers, dont l'ETBE). Aux États-Unis, l'incorporation d'éthanol est réglementée par la quantité maximale d'oxygène dans le mélange, soit 3,7 % en masse, ce qui correspond à environ 10 % en volume. Le mélange est appelé dans ce cas gasohol. Des réglementations fédérales, mais aussi relevant de certains États, définissent l'usage de l'oxygène associé à des essences reformulées pour certaines zones à fort risque de pollution (Californie par exemple). Cette option à 5 % d'éthanol a été testée en France par l'IFP dans les années 1980, et proposée au public. La distribution d'essence éthanol a cependant été abandonnée au début des années 1990.

Le Brésil a également largement pratiqué le mélange d'éthanol anhydre (99,3 °GL, de PCI 6 405 kcal/kg ou 26 808 kJ/kg) dans l'essence avec un taux de 22 %. Les moteurs utilisés ont un taux de compression de 8,7, identique à ceux qui utilisent du supercarburant. Le parc comptait, en 1995, 9,5 millions de véhicules fonctionnant avec ce mélange.

3.1.3 Critères d'application de l'éthanol et de l'ETBE

Le principal avantage technique et économique de l'éthanol et de l'ETBE est d'améliorer l'indice d'octane des essences (tableau 1) si l'on considère que l'usage du plomb tétra éthyle est aujourd'hui en voie d'abandon. Une quantité de 5 % en volume d'éthanol accroît l'indice d'octane recherche (IOR) d'une essence euro super de 1,2 point. Il faut le double d'ETBE, soit une quantité de 10 % pour obtenir environ le même résultat (+ 1,4 point) sur l'IOR. L'expérience brésilienne a montré les gains en indice d'octane moteur (IOM) apportés par l'éthanol (tableau suivant).

Tableau 01 : Indice d'octane moteur (IOM) de l'essence avec différentes proportions d'éthanol

Proportion d'éthanol	IOM
0 %	72.5
5 %	74.8
10 %	76.6
15 %	78.5
20 %	80.3
25 %	81.4

Ces composés apportent de l'oxygène ce qui permet une combustion plus complète du carburant. Les quantités d'oxygène apportées sont indiquées dans le tableau qui montre aussi une comparaison avec le MTBE.

Tableau 02 : Correspondance entre la quantité d'oxygène apporté en masse et le volume des composés oxygénés les plus utilisés

Oxygène (% en masse)	Éthanol (% en volume)	ETBE (% en volume)	MTBE (% en volume)
2	5.7	12.7	11
2.7	7.7	17.2	15
3.5	23.6	23.6	19.2

Afin de prévenir des phénomènes de démixtion entre l'éthanol et l'essence, l'éthanol utilisé doit être anhydre, soit présenter une teneur maximale en eau de 3000 ppm. L'utilisation directe d'éthanol dans les circuits pétroliers présente un risque de migration de cet éthanol vers l'eau contenue dans les bacs, cuves, conduits et réservoirs, ce qui entraînerait une perte énergétique et d'indice d'octane apporté par l'éthanol. Aux États-Unis, le mélange est réalisé le plus possible en aval du circuit, parfois même juste au moment de l'utilisation (splash blending), ce qui supprime ces risques.

L'ETBE ne présente pas ces caractéristiques d'hydrophilie et sera donc préféré à l'éthanol.

L'éthanol présente une forte volatilité par rapport à l'essence et l'ETBE une volatilité très faible, or cette caractéristique est limitée réglementairement. L'utilisation d'éthanol oblige donc le pétrolier à avoir une essence moins volatile, avec par exemple moins de butane, alors que l'ETBE permettra l'inverse. Ce critère est surtout important en été ou dans des régions chaudes, car la valeur maximale autorisée de la tension de vapeur des carburants est plus élevée en hiver, ce qui devient alors moins contraignant. Aux États-Unis, une dérogation est accordée pour une augmentation de la tension de vapeur de 68 mbar des essences éthanol.

3.1.4 Bilan énergétique :

Le bilan énergétique des différentes filières concernées a été établi par la CCPCS (Commission Consultative pour les Carburants de Substitution) en 1990-1991 et au cours d'un écobilan comparant les filières de production et d'utilisation du MTBE et de l'ETBE en 1995-1996. Le rendement énergétique principal utilisé a été présenté comme une capacité à économiser et à substituer l'énergie

$$R1(CCPCS) = \frac{\text{Énergie restituée sous forme de carburant oxygéné}}{\text{Énergie primaire totale fossile consommée}} \quad (30)$$

Les premiers travaux indiquent que pour une dépense d'énergie fossile de 1 unité, la production de bioéthanol à partir de blé est de 1,15 unité énergétique et de 1,65 à partir de betteraves dans les régions à meilleur rendement, sans tenir compte des coproduits. Si l'on tient compte de tous les produits obtenus par la filière (paille, drèches, pulpes...), le rendement utilisé sera défini de la façon suivante :

$$R2(CCPCS) = \frac{\text{somme des pouvoirs calorifique des produits obtenus}}{\text{Énergie totale dépensée dans la filière}} \quad (31)$$

Pour une dépense d'énergie totale de 1 unité, l'énergie totale obtenue, avec l'ensemble des produits, est de 3,4 unités pour le blé et de 2,4 unités pour les betteraves, dans les mêmes régions et 1,4 pour l'ETBE. En comparaison, le bilan énergétique de l'essence est de 0,74 à 0,84, soit un résultat inférieur.

L'écobilan réalisé par la suite a permis d'affiner ces résultats pour la filière betterave et l'ETBE. La consommation d'énergie primaire a aussi été établie phase par phase pour la production d'éthanol et ensuite pour l'éthérification, imputant massivement la dépense énergétique au seul alcool ou à l'éther :

$$R1(\text{Écobilan}) = \frac{\text{Énergie restituée sous forme de carburant oxygéné}}{\text{Énergie primaire totale fossile consommée imputée à l'alcool ou l'éther}} \quad (32)$$

Les résultats des rendements R1 et R2, décrits ci-dessus, sont indiqués dans le tableau suivant.

Tableau 03 : Rendements énergétiques de l'éthanol, des éthers et de l'essence

Produits	R1 (CCPCS)	R1 (Écobilan)	R2 (CCPCS)
Éthanol de blé.	1.15	–	3.4
Éthanol de betteraves	1.65	–	2.4
ETBE	–	0.93	1.4
MTBE	–	0.73	
Essence	–	–	0.74-0.84

3.2 Application des huiles végétales et de leurs dérivés dans les moteurs Diesel

3.2.1 Les huiles végétales

À l'origine, l'inventeur du diesel (Rudolph Diesel) a mis au point son moteur avec de l'huile d'arachide et de nombreux exemples d'utilisation étendue à plus ou moins grande échelle, au niveau mondial, ont déjà été réalisées avec de l'huile de colza, tournesol, palme, coton, etc. En France seules les huiles de colza et de tournesol ont été testées récemment en conditions réelles, essentiellement avec des tracteurs agricoles, pures ou en mélange avec du fioul. Les huiles pures filtrées et dégommees sont admissibles dans les moteurs à préchambre, capables d'accepter indifféremment de l'huile pure, un ester, du gazole ou leur mélange.[5]

Un essai d'endurance de 1 000 h a été effectué sur un moteur Deutz de type 912 W, avec de l'huile de tournesol, sans constat d'anomalies ou d'usure anormale. Les résultats des émissions, essai CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) N°126/97, sont notés dans le tableau (7).

Tableau 04 : Résultats des émissions des gaz polluants

Polluants	Polluants Fioul Domestique (g/kWh)	Huile de tournesol (g/kWh)	Règlement R49 (octobre 1998) (g/kWh)
CO	2,3	1,9	6,5
HC	0,6	0,5	1,3
NOx	6.6	6.4	9.2

3.2.2 Esters d'huile végétale :

Pour les raisons indiquées, les esters sont mieux adaptés que les huiles végétales pour un usage banalisé. En effet leurs caractéristiques sont très voisines de celles du gazole et conviennent aussi aux moteurs à injection directe. La viscosité a une influence directe sur la qualité de l'injection du carburant et donc sur la taille et la répartition des gouttelettes dans la chambre de combustion.

Pour cette raison, l'huile est utilisable avec des moteurs équipés de chambre de turbulence, l'ester n'a pas cette contrainte.

La consommation d'ester méthylique d'huile végétale a été en France de 215 000 t environ en 1996 et de 300 000 t environ en 1997, essentiellement sous forme de carburant.

- Spécifications des esters d'huile végétale :

Les principales caractéristiques des esters d'huile végétale et du gazole sont équivalentes et leur usage comme carburant ou combustible est autorisé au taux maximal de 5 % en volume dans le gazole, le gazole grand froid et le fioul domestique.

- Utilisation de l'ester à faible taux :

Il s'agit en majorité d'une incorporation dans le gazole par les pétroliers, autorisée jusqu'à un maximum de 5 % en volume. En réalité ce taux maximal n'est pas systématiquement pratiqué et dans ce cas, l'ester améliore la capacité lubrifiante du gazole. Il a alors une fonction d'additif et ce mélange à faible taux à la dénomination gazole (arrêté du 28 août 1997). Un programme national d'essai a été réalisé en laboratoire et à grande échelle avec un taux de 5 % sur une flotte de 88 véhicules (bus, bennes à déchets, véhicules légers, poids lourds) et la conclusion a été que son utilisation est complètement transparente.

Son utilisation est aussi autorisée à 5 % maximum en volume dans le fioul domestique, de façon banalisée, et ce mélange à faible taux a également la dénomination fioul domestique (arrêté du 28 août 1997).

L'identification de l'ester méthylique dans les distillats moyens par chromatographies liquide et gazeuse et son dosage par spectroscopie d'absorption dans l'infrarouge moyen, pour des teneurs maximales de 5 % en volume.

- Utilisation de l'ester à taux relevé :

Il est aussi utilisé comme co-carburant destiné aux flottes captives, essentiellement urbaines, avec un mélange ester-gazole de teneur variable en ester, de l'ordre de 30 %. Cet ordre de grandeur a été déterminé après des tests à différents taux effectués par l'UTAC (Union Technique de l'Automobile et du Cycle) ¹⁴, indiquant des réductions d'émissions déjà importantes à 30 %. Plus de 33 villes ou réseaux de transport utilisent actuellement un tel mélange. L'objectif recherché dans ce cas est une amélioration de la qualité de l'air.

- Amélioration de la capacité lubrifiante du gazole :

L'IFP (Institut Français de Pétrole) et différents organismes en Europe ont démontré par des tests appropriés, l'usure provoquée par différents gazoles avec ou sans soufre et l'influence de différents esters méthyliques de colza utilisés comme additifs sur la capacité lubrifiante du carburant. Les résultats sont différents selon la qualité de l'ester (tableau 5).

Tableau 05 : Amélioration de la capacité lubrifiante du gazole par l'ester (ester produit en France)

Ester méthylique de colza % en volume	Réduction de l'usure comparée au gazole pur	
	Gazole suédois (1)	Gazole EN590 (2)
0,8	15 %	45 %
1	45 %	45 %
2	70 % (3)	65 % (4)

(1) 1 ppm de soufre ;

(2) 460 ppm de soufre ;

(3) seulement 25 % avec un autre ester ;

(4) seulement 30 % avec un autre ester.

3.3 L'utilisation du biogaz

Le biogaz produit à la ferme peut être valorisé directement sous forme d'énergie thermique ou indirectement par la production d'électricité.

3.3.1 La valorisation thermique

La valorisation thermique consiste à utiliser le biogaz comme source d'énergie thermique en remplacement, par exemple, du propane, du gaz naturel ou du mazout. C'est le mode de valorisation le plus courant, le plus efficace et le mieux maîtrisé. Ce mode de valorisation permet de récupérer le maximum d'énergie contenue dans le biogaz. Pour un procédé psychrophile (basse température), le chauffage des digesteurs ne requiert qu'environ 10 % du biogaz, laissant plus de 80 % de son contenu énergétique disponible pour une valorisation, le reste étant perdu en raison de l'efficacité des équipements. Pour des procédés mésophile et thermophile, le chauffage du digesteur consommera relativement plus d'énergie et par conséquent, en laissera moins pour d'autres usages.

Pour une utilisation thermique à la ferme, la purification du biogaz se limite généralement à sa désulfuration, par exemple par son passage sur du charbon activé, qui limitera les risques de corrosion des canalisations. Dans ce cas, l'énergie thermique est utilisée pour chauffer les bâtiments, alimenter une chaudière, sécher des matériaux, réfrigérer des aliments, etc. Le biogaz peut ainsi remplacer le gaz propane ou le gaz naturel utilisés dans un grand nombre de bâtiments d'élevage. Des brûleurs adaptés à la combustion du biogaz sont toutefois requis. Un biogaz contenant 70 % de méthane a un pouvoir calorifique de l'ordre de 23,75 MJ/m³ ou 6,59 kWh/m³, soit l'équivalent d'environ un litre d'essence. Un élevage de 1500 porcs à l'engraissement permettrait de fournir assez de biogaz pour remplacer l'énergie produite par 650 litres de propane par jour. Le chauffage de serres à l'aide de biogaz permet en plus, tout comme le chauffage au propane, d'enrichir l'air de la serre en dioxyde de carbone, ce qui permet d'augmenter le rendement de plusieurs légumes de serre.

3.3.2 La production de l'électricité

La production d'électricité peut être envisagée lorsque le volume de biogaz produit est important en effet une telle valorisation nécessite l'achat de cogénération fonctionnant au biogaz. Cette unité peut être composée d'une chaudière au biogaz complète à une turbine à vapeur ou à moteur à gaz chacune de ces options ayant ses contraintes d'application. L'électricité produite peut être utilisée directement à la ferme pour assurer la ventilation des bâtiments l'éclairage et le fonctionnement des différents équipements (pompes, soigneurs, etc). Lorsque les réseaux distribution d'électricité le permettent, il est possible d'alimenter le réseau avec surplus d'énergie produit à la ferme la transformation énergie thermique en énergie électrique se fait toutefois au détriment du rendement énergétique global du biogaz.

Toujours pour un procédé psychrophile (digestion à basse température), la répartition typique de l'utilisation de l'énergie contenue dans le biogaz est la suivante :

- Maintien de la température de digesteurs 10%
- Energie transformée en électricité 25 à 35 %
- Energie transformée en énergie thermique 40 à 45%
- Perte d'énergie liée à l'efficacité des équipements 15 à 25%

La production d'électricité varie selon le type de biomasse utilisée en fonction de sa capacité à générer du biogaz :

- Lisier de porcs 65 KWh/t
- Fumier de volailles 140 KWh/t
- Déchets domestiques 285 KWh/t
- Ensilage de maïs 450 KWh/t
- Gras 540 KWh/t

3.3.3 L'utilisation comme carburant pour les véhicules ou dans un réseau de gaz naturel

Une fois purifié, le biogaz peut être utilisé comme équivalent au gaz naturel, soit comme carburant pour les véhicules fonctionnant au gaz naturel (GNV), soit en étant injecté dans un réseau de distribution de gaz naturel. Ce type d'utilisation implique un degré de pureté beaucoup plus élevé que pour les applications précédentes. En plus de la désulfuration, le dioxyde de carbone ainsi que la vapeur d'eau doivent être retirés du biogaz. Par ailleurs, la proportion de méthane doit être équivalente à celle du gaz naturel commercialisé (96 % et plus) afin d'assurer une valeur calorifique intéressante. Les concentrations admissibles des différents composants du biogaz sont fixées par les fabricants des moteurs ou par les gestionnaires des réseaux de distribution, selon le mode de valorisation envisagé. Le coût des traitements requis pour amener le biogaz à un tel niveau de pureté est très élevé, ce qui disqualifie cette option au niveau de la ferme. Par ailleurs, en termes pratiques, l'injection du biogaz produit à la ferme dans un réseau de distribution de biogaz ne peut être envisagée.

Une unité traitant 20 000 t/an de déchets peut produire une quantité de carburant qui permet à 2 000 voitures de parcourir 10 000 km/an. Un kilogramme de déchets correspond donc à la consommation de carburant pour un parcours d'un kilomètre en voiture.

3.3.4 Le rendement en biogaz

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

de l'énergie du lisier sert à la synthèse de nouvelles cellules et 40 % à la production de Chaleur, aucun méthane n'étant produit.

La quantité de biogaz produite à l'issue du procédé de biométhanisation est fonction des Caractéristiques de l'effluent traité, en particulier de son contenu en matière organique biodégradable. Cependant, la biométhanisation est un processus complexe qui est sensible Au ratio de carbone sur l'azote (C/N), au pH, à la température et à la siccité de la matière première ou du mélange de matières premières. Le procédé présente donc davantage un enjeu du point de vue de la biologie que de l'ingénierie.

De façon générale, le rendement en biogaz issu de la méthanisation des déjections animales se situe entre 1,3 et 2,0 m3 par jour par unité animale (500 kg de poids vif) selon l'espèce animale¹⁹. Par comparaison, les cultures énergétiques et les résidus agroalimentaires ont une performance nettement supérieure à celle des effluents d'élevage (Tableau 1). Les lisiers de porcs et bovins sont relativement peu performants pour la production de biogaz en raison de leur faible teneur en matière sèche et leur teneur limitée en matière organique. L'ajout d'une source additionnelle de matière organique permettra d'augmenter de manière importante la production de biogaz d'un digesteur installé à la ferme.

Tableau 06 : Production de biogaz selon les intrants

Intrants	Matière sèche (%)	Production (m3/t)de matière fraîche
Lisier de porcs	6	16-23
Lisier de bovins	8	13-32
Fumier de volailles	24	61-112
Déchets domestiques	20	126
Foin (ensilage)	30	145
Maïs (ensilage)	30	197
Gras	25	238

3.3.5 Biométhane et l'énergie :

Ce biogaz peut être valorisé en produisant de l'énergie thermique et/ou électrique tout comme un combustible fossile il peut être caractérisé par son pouvoir calorifique inférieur.

A titre de comparaison le pouvoir calorifique de 1 Nm³ de biogaz équivalant énergétiquement à :

0.56 l de mazout

0.65 de fuel

0.21 m³ de propane

0.7 kg de charbon

Avant d'être brûlé le gaz doit être épuré car il peut contenir des substances indésirables comme du sulfure d'hydrogène (H₂S), des organon chlorés, ou fluorés peuvent également apparaître lors de la dégradation de matières plastique.

L'utilisation du méthane issu du biogaz comme carburant répond à un certain nombre de préoccupations économiques, écologique et énergétique. Par conséquent le biogaz « à la cote » car il peut être considéré comme énergie verte renouvelable par opposition aux combustibles fossiles, dont on sait que les réserves sont limitées.

Toutefois, le méthane et le CO₂ sont des gaz dit 'à effet de serre' et il convient de les confiner afin d'empêcher leur dispersion dans l'atmosphère. On peut tout de même noter que la méthanisation produit en moyenne 3 fois moins de CO₂ qu'une fermentation aérobie classique qui a lieu par exemple après l'épandage des lisiers. La combustion du méthane produit dégage de la vapeur d'eau et une faible quantité de CO₂. Dans l'exemple d'une installation industrielle parfaitement contrôlée, la biométhanisation contribue à la protection de la couche d'ozone et est une source d'énergie renouvelable important.

4. Synthèse bibliographique

La biomasse comme une source d'énergie par biocarburants a été entrepris par un certains nombres de chercheurs dans le monde surtout le coté de méthanisation:

Kamal HADJ ALI Ingénieur (2010) a rassemblé des données effectuées sur la combustion des biocarburants dans un Thèse réalisée dans le cadre du Programme Interdisciplinaire Energie du CNRS en relation avec le Ministère de la Recherche et la DGA. La thématique en était "Biomasse - Combustion – CO" et le sujet "Utilisation de combustibles issus de la gazéification de la biomasse dans les moteurs HCCI". Le programme était très ambitieux. Dès l'abord, il a fallu faire le choix des carburants et des réacteurs de laboratoire. Quatre carburants ont été sélectionnés : un mélange monoxyde de carbone-hydrogène pour simuler le gaz de synthèse, un mélange méthane-hydrogène pour simuler le biogaz, et deux produits de synthèse représentatifs de carburants facilement liquéfiables, le méthanol et le diméthyléther.

Trois techniques de laboratoire ont été mises en œuvre : un réacteur parfaitement agité par jet gazeux, un tube à choc et une machine à compression rapide.

Le premier réacteur qui se trouve à l'Institut de Combustion Aérothermique Réactivité et Environnement d'Orléans fournit la mesure des intermédiaires dans un large domaine de températures. Le second se trouve au même laboratoire et permet la mesure des délais d'auto-inflammation aux températures supérieures à 1000 K. Le troisième réacteur se trouve au Laboratoire de Physico-Chimie des Processus de Combustion et de l'Atmosphère de Lille et permet de mesurer à la fois les délais d'auto-inflammation et les produits intermédiaires en dessous de 1000 K. Chaque carburant a été étudié dans le réacteur le mieux adapté à sa réactivité. On s'est efforcé de développer ensuite des corrélations et des modèles thermocinétiques détaillés, ils sont simuler les résultats expérimentaux, mais également saisir le mécanisme intime des réactions d'oxydation conduisant à l'auto-inflammation.

Casimir TOGBE (2010) a étudié les différences entre d'oxydation des hydrocarbures et l'oxydation des esters méthyliques et des alcools. Il est faits un bons travail expérimental sélectionnées l'oxydation de ces composés purs ou en mélanges a été étudiée en réacteur auto-agité à haute pression (10 atm) et dans un large domaine de températures (530-1250 K) et de richesses (ca. 0,3-4). Les profils de concentration des réactifs, produits et principaux intermédiaires stables obtenus par spectroscopie d'absorption infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) et chromatographie en phase gazeuse (GC-FID-TCD-MS) ; il simulait les résultats expérimentaux obtenus au cours de étude avec un logiciel CHEMKIN

De nombreux travaux de recherche ont été effectués afin d'estimer la méthanisation de biomasse. Différents pays ont développé des méthodes des valorisations directement liées à la nature des matières primaires. On prendre par exemple

M. E. Afilal, N. Belkhadir, H. Daoudi, O. Elasri Université Mohamed Premier Oujda, ils réalisée un travail de recherche sur la Fermentation méthanique des différents substrats organiques, se travail est opérée dans laboratoire avec des simple choses comme un matériel (Bouteilles en plastique transparent de 5 litres, Bain-marie Des tuyaux à gaz transparents, Étuve à 105 °C et four à 600°C)et le matière première c'est (déchet de vache, mélange de laboratoire . résidus de PAM substrat P).ils mesure le taux de production de gaz en fonction de temps et des autres composants du gaz produit, temps de rétention de la matière organique.

Dans ce même contexte **René MOLETTA** fait recherche sur la méthanisation de la biomasse par plissure vois de conversion (digestion des boues, Méthanisation des déchets

Agricoles Méthanisation de la fraction organique des ordures ménagères, méthanisation solide.), d'autre coté **X. Chopy on 2012** fait un travail sur La digestion des boues d'épuration (situation et potentiel d'optimisation), et **João Alberto Lima Amarante** aussi travail sur la biométhanisation des déchets putrescibles municipaux technologies disponibles et enjeux pour le QUÉBEC.

On Algérie un travail de recherche au niveau de Unité de Recherche en Energie Renouvelable en Milieu Saharien sur la production de bio énergie par la Digestion Anaérobie des déchets ménagers réalisé par un groupe de recherche à la biomasse (TAHRI. A, KHELAFI.M, KALLOUM. S, DJAAFRI. M, KAIDI. K) étudier la digestion anaérobie des déchets ménagers (déchet de cuisine) et plus particulièrement l'influence de la salinité des eaux sur le rendement en biogaz. Durant cette étude, ils sont suivi l'évolution de pH, et le volume du biogaz produit en fonction du temps. Les résultats obtenus démonter que La salinité des eaux n'a pas d'influence sur la production du biogaz.

Un travail de "Thermal modelling of the completely stirred anaerobic reactor treating pig manure at low range of mesophilic conditions "par (Jianbin Guo, Renjie Dong, Joachim Clemens, Wei Wang) simulais l'énergie net produit a partir de méthanisation des déchets d'agricole on fonction des températures ambiantes, volume produit.

Conclusion

La biomasse c'est la conversion des matières organiques végétales ou animales en matériaux biodégradables ou en biocarburants pouvant être utilisés comme une source d'énergie renouvelable.

La valorisation énergétique par biomasse est une technologie connue pendant les dernières années une évolution importante surtout les voies de conversion dans la production des biocarburants dans la recherche dans les énergies renouvelables.

Les biocarburants représentent trois générations différentes où les nuances de matières organiques sont différentes ainsi que les procédés de conversion donnant des rendements et des qualités de produit différents.

La première génération utilise les produits alimentaires comme la betterave et les cannes à sucre ou le blé comme source de matière organique. La conversion donnera les alcools comme l'éthanol ou le méthanol, les éthers ETBE et MTBE (bioessences) et les huiles végétales et les esters (biodiesels). L'utilisation de ces derniers est en état de croissance dans le monde, l'alcool c'est le plus utilisé à l'état pur ou mélangé à différent pourcentage avec l'essence comme au Brésil, en France, au USA... (bio essence A65, A85).

La méthanisation des déchets est basée sur la fermentation anaérobie des matières organiques en présence des bactéries. Ce procédé représente encore des axes de recherche comme solution à la pollution et source d'énergie propre où les produits de la combustion de biogaz (biométhane) est un gaz biodégradable. Le problème de la digestion anaérobie réside dans l'apport thermique en énergie fossile où le rendement en énergie nette produite est faible.

La deuxième génération utilise les matières premières sous la forme lignocellulosique. Il s'agit de résidus d'origine agricole non consommables (pailles, tiges de maïs), de résidus forestiers et de sous-produits issus de la transformation du bois, les déchets organiques des industries papetières et agroalimentaires. Deux voies de production de biocarburants ont été développées :

- Voie biochimique : éthanol cellulosique
- Voie Thermochimique
- Gazéification

La troisième génération concerne la transformation des micro-algues photosynthétiques, cultivées dans des réacteurs en milieu liquide et se développent à l'aide de la lumière naturelle. Ce procédé est encore émergent est encore à l'état d'étude et de recherche il sera réalisé industriellement aux horizons 2020-2030.

Nous présenterons dans les chapitres suivant une étude sur les boues provenant du traitement des eaux résiduaires ; présentation de la station d'épuration des eaux usées obtention des boues les traitements qui ce réalisé dans la station ,les caractérisation des eaux traitiez et des boues sortantes, prélèvement et les essais de production du méthane dans un prototype de digesteur ; et après description du digesteur, apport de chaleur, description de l'essai : choix des températures, mesure de volume, pH, temps d'immersion, énergie consommée, l'énergie net....

CHAPITRE II

Contexte industriel

Sommaire de chapitre

Introduction.....	51
1. Présentation de la station d'épuration des eaux usées.....	51
2. Description des installations.....	53
2.1 partie eaux usée.....	53
2.1.1 Un poste de pompages.....	53
2.1.2 Déversoir d'orage.....	54
2.1.3 Poste de dégrilleurs.....	54
2.1.4 Déssableur-déshuileur (2unités).....	55
2.1.5 Bassins d'aération.....	55
2.1.6 Décanteurs secondaires.....	56
2.1.7 Bassin de chloration.....	57
2.2 La partie Boues.....	58
2.2.1 Épaississeur à boue.....	58
2.2.2 Lits de séchage.....	59
2.2.3 Air de stockage.....	59
3. donnée de base.....	59
3.1.1 Caractéristiques après traitement preuves par l'étude.....	60
Conclusion.....	60

Introduction :

La pollution de la terre soit la pollution d'eaux aux bien de sol ou l'air c'est un résultat de les travaux humain pour sa nous somme les responsables à cherchée des solutions de cette grands problème ; permes les solutions qui nous avons trouvés c'est l'épuration des eaux polluions au lieu de jet dans la nature (la mer, les fleuves, ...).

L'épuration des eaux usées est un traitement par différents procédés physico chimiques et biologique pour une séparation en eau épurée et en boues. Historiquement, la création des premiers réseaux d'égouts structurés à la fin de la première XIX^{ème} siècle, les responsables ont proposés des solutions pour lutter contre l'infection provoquée par les eaux d'égouts.

Dans se chapitre nous avons présenterons la station d'épuration des eaux usés (ONA Tlemcen) les installations et les équipements, le début entrant par jour et par heure, les caractéristiques des eaux après traitements

L'installation qui nous avons prendre pour nous étude comme un exemple industriel (STP ONA Tlemcen) elle traités les eaux usés pour on put utilises en agriculteurs et dans autre activités mais pour le traitement des boues usés et sont conversion elle reste encoure retarde, elle est utilise seulement le séchage à air libre sous exposition solaire comme une voix passive malheureusement.

1. Présentation du la station d'épuration des eaux usées

La station d'épuration de la ville de Tlemcen se situe au nord du chef lieu « Tlemcen Ville », à l'ouest de Chetouane « Daïra » sur la Route de Ain El Houtz conçue pour une population de 150 000 eq/hab d'une capacité de 30 000 m³/j, elle a été réalisée par l'Entreprise Hydrotraitement mise ne service le 05 Novembre 2005 gérée et exploitée actuellement par l'Office National de l'Assainissement.

La station d'épuration de la ville de Tlemcen est de type Boues activées à faible charge. Dans le traitement biologique des effluents, on fait généralement appel aux processus aérobies par les quels les bactéries provoquent une oxydation directe des matières organiques des eaux usées à partir de l'oxygène dissous dans l'eau.



Figure05 : Panoramique de la Station

2. Description des installations

La station comporte deux parties : une partie eaux usées et une deuxième partie des boues.

2.1 Partie Eaux Usées

Les eaux usées arrivent généralement dans un collecteur enterré et donc nécessitent un système de relèvement jusqu'au prétraitement, et un tamisage pour ...

2.1.1 Un poste de pompes

On a besoin des pompes minimum 1 en secours, poire ou sonde de niveau, panier dégrilleur relevable > 5 cm pour récupérer le maximum de déchet (morceau de bois, bouteilles ...) avec guide. Une pente de 20 % à l'arrivée des eaux usées afin d'éviter les dépôts.

A l'extérieur des pompes de relèvement, il y a une potence pour faciliter le relevage de la pompe pour la maintenance (préventive, curative ...), armoire électrique de commande, des vannes et clapets placés de préférence dans un regard annexe (opération d'entretien).

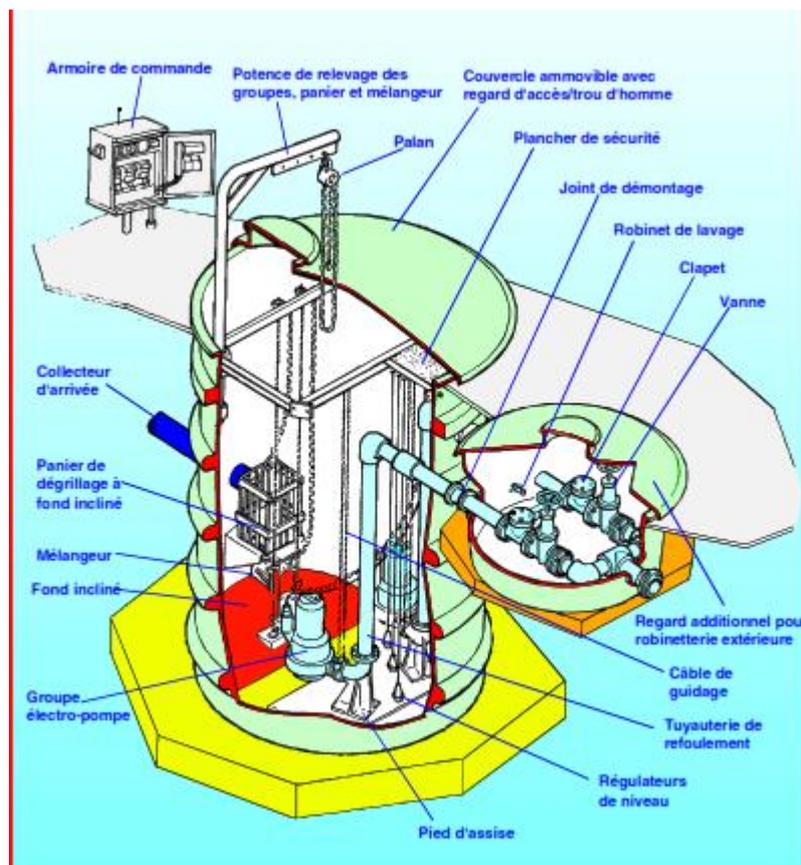


Figure 06 : exemple de configuration de la station de pompage

2.1.2 Déversoir d'orage

Il est dimensionné pour prendre en charge maximum de 3300 m³/h



Figure 06 : Déversoir d'orage

2.1.3. Poste de dégrilleurs

- **Grille grossière manuelle (1unité)** : avec une largeur de 1,8m et un inclinaison de 70%, l'écartement entre les barreaux est 50mm Dessableur – déshuileur



Figure 7 :Grille grossière manuelle (1unité)

- **Grille mécanisée (2 unités)** ; avec une largeur de 1,0m et de profondeur du chenal 1,5m, l'écartement entre les barreaux est 20mm, la puissance du moteur est 0,37kw



Figure 08 : Grille mécanisée (2 unités)

2.1.4. Désableur-déshuileur(2unités)

Sous forme trapézoïdale, le dessableur déshuileur est équipé d'un pont suceur et écumeur et a pour dimensions de longueur 26m largeur de 4m



Figure 09 : Désableur- déshuileur

2.1.5 Bassins d'aération

Dans la station ONA Tlemcen il ya quatre bassin d'aération chaque bassin de forme rectangulaire avec longueur de 55,5m largeur de 18,5m, hauteur béton de 5,6m donc un Volume de 4723m³ le profondeur d'eau dans c'est bassin est de 4,6m



Figure 10 : Bassins d'aérations

2.1.6 Décanteurs secondaires

Il ya deux décanteurs de forme circulaire avec un diamètre de 46m et profondeur d'eau égale 4m donc un surface de 1667m^3 chacun est équipé de pont racleur à vitesse de rotation $0,04\text{m/s}$



Figure 11 : Clarificateurs

2.1.6 Bassin de chloration

Il est en béton armé et d'un volume de l'ordre de 700 m³



Figure 12 : Bassins de chloration

2.2 La parti Boues

Un poste de pompage des boues avec pompe de recirculation



Figure 13 : Vis de recirculation

2.2.1 Épaisseur à boue

Il est en béton armé avec un diamètre de 14m et un hauteur utile de 4m et un pente de fonde 1/10, et à un pont support de la tête tournante avec moteur et réducteur



Figure 14 : Epaisseur

2.2.2 Lits de séchage

il ya Quatorze lits de séchage Chaque lit a 30m de longueur et 15m de largeur les dimensions suivantes.



Figure 15 : Lits de séchage +Aire de stockage

2.2.3 Aire de stockage

Les boues sont stockées après le séchage dans des bâtiments d'exploitation

3. Données de base

La station d'épuration de la ville de Tlemcen a été dimensionnée sur la base des données suivante :

1/ horizon	_____	2005
2/ type de réseau	_____	unitaire
3/ nature des eaux brutes	_____	domestiques
4/ population	_____	150 000 EQ/HAB
5/ débit journalier	_____	30 000 m ³ /j
6/ débit de pointe horaire admis au traitement	_____	3 800 m ³ /h
7/ DBO ₅ journalière	_____	9 300 kg/j
8/ matière en suspension	_____	13 950 kg/j
9/ azote à nitrifier	_____	1 980 kg
10/ l'équivalence calculée sur la DBO	_____	172 000 EQ/HAB

4. Caractéristiques après traitement preuves par l'étude

Les caractéristiques du rejet qui devraient être garanties par l'étude du process sur une durée moyenne de 24 heures:

1/ matière en suspension	_____	30 mg/l
2/ matières sédimentables	_____	0.5 CC/l
3/ DBO	_____	20 mg/l
4/ DBO point max, en moyenne sur 2 heures	_____	30 mg/l
5/ DCO	_____	120 mg/l
6/ azotes (N-NH ₄)	_____	3 – 5 mg/l
7/ azotes (N-NO ₃)	_____	8 – 10 mg/l
8/ huiles et graisses végétales	_____	20 mg/l
9/ coliformes totaux	_____	20 000 / 100 ml
10/ coliformes fécaux	_____	12 000 / 100 ml
11/ streptocoques fécaux	_____	2 000 / 100 ml

Conclusion

Les stations d'épuration des eaux usées ils sont travaillés sur des normes internationales pour voir une eau sortant respecter les caractéristiques des eaux non polluées ; les eaux usées entrantes elles sont défectueuses et très polluées pour sa dans chaque STEP il ya des équipements et des installations précisés pour les étapes de traitement mécanique et biologique ; l'ONA de Tlemcen respecte les normes et comporte des intervalles de traitement des eaux usées , elle produit des quantités de boues biologiques très importantes mais elle sont traitées seulement avec le séchage à l'air libre.

Nous sommes intéressés dans ce travail à la valorisation des boues produites des traitements des qui faite dans le step, la valorisation énergétique est été pas encore connue dans les stations d'épuration on Algérie pour ca nous présenterons dans le chapitre suivant une étude sur les boues provenant du traitement des eaux résiduaires , l'obtention des boues (traitements), caractérisation et prélèvement et les essais de production du méthane dans un prototype de digesteur (description du digesteur, apport de chaleur, description de l'essai, choix des températures), et parti de méthode de mesure de volume, le pH, le temps d'immersion, après calcul de l'énergie consommée.

CHAPITRE III

Matériels et méthodes

Sommaire de chapitre

Introduction.	62
1. Les eaux usées	62
1.1 Définitions.	62
1.2 Les différentes qualités d'eau usées	63
1.2.1 Les eaux usées domestiques	63
1.2.2 Les eaux pluviaux (pluie)	63
1.2.3 Les eaux usées industrielles	63
1.2.4 Les matières de vidanges.	63
1.3 Techniques d'épuration des eaux usées	64
1.3.1 Les prétraitements.	64
1.3.2 Les traitements physicochimiques.	64
1.3.3 Les traitements biologiques.	64
1.3.4 Traitement tertiaire des eaux usées.	64
1.4 les paramètres caractéristiques des eaux usées	65
1.4.1 Les matière en suspension-Les matières dissoutes et les matières colloïdales.	65
1.4.2 Les matières décantables :	65
1.4.3 Les matières organiques - Les matières minérales	67
1.4.4 Les matières biodégradables et non biodégradables :	67
1.4.5 Matière azotées :	70
1.4.6 Les matières phosphorées :	70
1.4.7 Le PH	70
1.4.8 La conductivité	71
1.5 Composition moyenne d'un effluent domestique :	71
2. production des boues.	72
2.1 Les paramètres caractéristiques des boues :	74
2.1.1 La charge massique Cm :	74
2.1.2 La charge volumique.	75
2.1.3 Le temps de séjour.	75
2.1.4 L'âge de boue.	76
2.1.5 Indice de boue.	77
3. Prélèvement des échantillons et préparation.	78
4. Description du prototype de digesteur biomasse.	79
4.1 Matériel et méthodes	79
4.1.1 Matériel	79
4.1.2 Méthode	80
Conclusion	81

Introduction

Les eaux usées dans la station d'épuration elle à des caractéristiques dépend de les flux des déferant qualité et quantité des eaux entrants, cette dernière peut changée de station à l'autre a cause des déchets productif à des activités industriel les traitements de c'est eaux produit des grandes quantités des boues biologique active humide et riche en matière organique.

Les boues sortantes d'après le traitement physique et chimique et biologique de l'eau polluante elle à des caractéristiques présenté dans la charge massique, la charge volumique, le temps de séjours, l'âge des boues, indice de boue ; sans oublie les caractéristiques des eaux avachie comme le teneur en matière organique et en matière dégradable et non dégradable le BCO et le BDO...etc.

Dans ce chapitre nous allons présenterons les différent composants des eaux usées entrant et sont caractéristique, les étapes des traitement pour produit des eaux non polluions et des boues d'épuration, les caractéristiques des boues comment vas détermine aux calcules ; en fin en exposons la description de prototype (digesteur) et les matériel utilise et les méthodes suivies pour les mesure de PH et la stabilité de température, le mesure de volume de méthane produit avec la méthode de liquide déplaces.

1. Les eaux usées

1.1. Définitions

Les eaux usées sont toutes les eaux provenant des canalisations de rejets et dont les propriétés naturelles ont été altérées par suite de leur utilisation domestique, industrielles, agricoles ou autre. On englobe aussi dans les eaux usées les eaux de pluie qui s'écoulent dans ces canalisations [33].

Ce sont des eaux qui ont subit une ultime utilisation par l'homme. Elles contiennent de nombreux éléments polluants provenant de la population (eaux ménagères, rejets de toilettes...) Ce sont des eaux qui ont été utilisées et qui doivent être traité avant d'être réintroduite vers d'autres sources d'eaux pour qu'ils ne causent pas de pollution [34] Elles peuvent être solubles ou pas. Ces eaux sont une source de nuisance car elles contiennent des produits fermentescibles, qui en se décomposant, émettent des gaz fétides. Celles-ci sont dites de qualité « médiocre » exigent une épuration avant leur rejet dans le milieu naturel [35].

1.2 Les différentes qualités d'eau usées

En distingue quatre types suivant :

1.2.1 Les eaux usées domestiques

C'est toute sorte d'eau d'évaluation (toilettes). Des eaux ménagères (cuisines, salles de bain) et se sont des déchets constituant par des matières organiques dégradables et des matières minérales de la substance soit sous forme dissoute ou en suspension.

1.2.2 Les eaux pluviales (pluie)

Se sont des eaux d'une origine naturelle c'est comme les eaux domestiques mais en plus de sa elles contiennent des métaux lourds et toxiques comme (le plomb, zinc,) et sa a causes lessivage de sols, des surfaces imperméabilisées, remise en suspension des dépôts des collecteurs.

1.2.3 Les eaux usées industrielles

Les caractéristiques des eaux usées d'origine industrielle mais sa dépend aux types d'industries implantées. La pollution de ces eaux peut être organique, minérale, toxique. En peut faire le branchement les établissements commerciaux, industriels ou artisanaux au réseau public mais à condition qu'elles soient compatibles avec les techniques d'épuration traditionnelle.

1.2.4 Les matières de vidanges

Dans toutes les communes, il existe des habitants non raccordés ou non raccordables à l'égout public. Or, toute fosse septique (ou appareil équivalent) produit obligatoirement des matières de vidange. L'évacuation et le traitement de ces matières domestiques font partie intégrante de l'assainissement.

Ces matières de vidange sont un concentré de pollution.

Leur traitement simultanément à celui des eaux usées domestiques peut constituer une alternative intéressante dans la mesure où la station est équipée spécifiquement d'une fosse de réception de ces résidus permettant d'assurer les principales fonctions suivantes (dégrillage, stockage, homogénéisation et présentation, alimentation modulable de la station)

Certaines pollutions sont facilement identifiables par leur odeur, aspect et couleur spécifique.

Il est indispensable de déterminer leur origine et leur bonne prise en compte lors de la conception de la station d'épuration.

1.3 Techniques d'épuration des eaux usées

L'épuration des eaux usées consiste à purifier l'eau usée pour le recycler dans le milieu naturel passe par défirant etape complexe et relié un à l'autre comme une chane des opirations jusqu'à optenire calité l'eau non poluion et peut utisabele ; les etape sont suivents

1.3.1 Les prétraitements

- **Le relevage** : On se sert de pompe de relevage pour le transport des eaux usées vers la station d'épuration, lorsque ces dernières arrivent à un niveau plus bas que les installations de dépollutions. Les prétraitements servent à éliminer les gros éléments, qui pourraient gêner les traitements ultérieurs et endommager les équipements [36].
- **Le dégrillage** : consiste à faire passer les eaux usées au travers d'une grille dont les barreaux retiennent les gros éléments. Après nettoyage des grilles par des moyens mécaniques, manuels ou automatiques, les déchets sont évacués avec les ordures ménagères. Il peut être suivi d'un tamisage qui sépare les débris plus fins.
- **Le dessablage** : débarrasse les eaux usées des sables par sédimentation.
- **Le dégraissage(ou déshuilage)** : élimine la présence de graisses qui pourraient gêner l'efficacité des traitements biologiques qui interviennent ensuite. Le dégraissage s'effectue par flottation. Les graisses sont raclées à la surface, puis stockées avant d'être éliminées (mise en décharge ou incinération). Elles peuvent aussi faire l'objet d'un traitement biologique spécifique au sein de la station d'épuration [37].

On enlève ainsi de l'eau les éléments grossiers et les sables de dimension supérieure à 200 microns ainsi que 80 à 90 % des graisses et matières flottantes (soit 30 à 40 % des graisses totales).[38]

1.3.2 Les traitements physicochimiques

Ils sont consacrés pour les traitements primaires et tertiaires, ils utilisent des moyens physiques (décantation, flottation, filtres et membranes) et/ou des produits chimiques, notamment des coagulants (Chlorure ferrique, Sulfate d'aluminium...) et des flocculants ; et une désinfection par le chlore, l'ozone ou la chaux (pour éliminer les germes pathogènes). Chaque étape produit à son tour des sous-produits (déchets grossiers, sable et surtout les boues constituées de bactéries mortes) qu'il faut éliminer [39].

1.3.3 Les traitements biologiques

La sélection naturelle des espèces et leur concentration dans un bassin permet d'accélérer et de contrôler un phénomène qui se produit communément en milieu naturel. Dans le cas des eaux usées urbaines, on favorise le développement de bactéries aérobies. Les différents types

de stations d'épuration dépendent du procédé d'épuration principal utilisé et des dispositifs mis en œuvre [40].

1.3.4 Traitement tertiaire des eaux usées

Il s'agit de traitements chimiques souvent facultatifs et nécessitent l'emploi de réactifs variés coûteux. Les procédés les plus employés sont : la chloration, l'ozonation, l'addition de la chaux ou du sulfate ferreux résiduaire qui peut intervenir comme agent coagulant de décantation et d'élimination de métaux lourds.[41]

L'effluent issu du clarificateur est ainsi désinfecté, généralement par du chlore avant son rejet dans un milieu d'eau naturelle. Bien que cette désinfection ne soit pas totalement efficace, elle réduit énormément les quantités de bactéries coliformes et d'autres micro-organismes pathogènes qui restent après traitement dans les stations d'épuration (Perry., 1984).

1.4 les paramètres caractéristiques des eaux usées

1.4.1 Les matière en suspension- les matières dissoutes et les matières colloïdales

La distinction porte sur la taille des composés contenus dans l'eau :

- Taille supérieure à 1 micron : ce sont les matières en suspension, responsables essentiellement de troubles de l'eau ; les plus lourdes sédimentent rapidement et Constituent les matières décantables.
- Taille inférieure à 1/1000 micron : ce sont les matières dissoutes ou liquides. Certains de ces liquides (huile, hydrocarbures, ...) ne se mélangent pas à l'eau. Disposés en fines gouttes, on dit qu'ils forment alors des émulsions.
- La taille intermédiaire correspond aux matières colloïdales, qui participent au trouble et à la coloration de l'eau. Ces matières colloïdales ne sont pas décantables.[42]

Deux techniques sont utilisées pour déterminer le taux de matières en suspension (MES) dans un échantillon :

-La méthode par filtration puis séchage à 105°C

-La méthode par centrifugation puis séchage à 105°C

Le choix de l'une ou de l'autre de ces méthodes est conditionné par la teneur en MES de l'échantillon à analyser.

La technique par filtration est adaptée à des échantillons peu chargés et, est généralement applicable aux eaux de la ressource, aux eaux usées ainsi qu'aux eaux de rejet.

La méthode par centrifugation est réservée à des échantillons présentant des concentrations plus élevées (supérieures à 300 mg/L) tels que les boues liquides et certaines eaux très chargées.

La technique par filtration est décrite dans la méthode [43]. Elle recommande l'usage de Membranes en fibre de verre borosilicaté.

Les matières en suspension présentes dans un volume défini (V) d'échantillon sont recueillies par filtration sur membrane en fibre de verre de poids connu (P1) puis sont

Pesées après séchage à 105°C (le filtre et son résidu : P2). La différence P2 - P1 correspond au poids de MES. Il suffit de diviser ce poids par le volume V pour déterminer la Concentration en MES, on multiplie par 1 000 pour exprimer le résultat en mg/l.

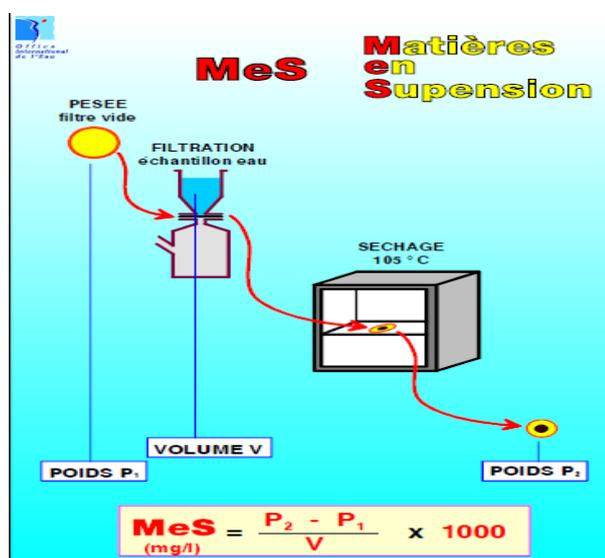


Figure16: technique pour déterminée le taux en Mes par méthode de filtration

1.4.2 Les matières décantables

La quantité des matières décantables peut être appréciée par le test de décantation effectué sur un litre d'eaux usées dans le cône de coin pendant deux heures. Le résultat est indiqué en ml/litre.

Des teneurs de l'ordre de 10 à 15 ml/l sont normales sur des eaux brutes domestiques.

Des teneurs extérieures à la fourchette 5 - 50 mg/l peuvent traduire une anomalie de l'effluent.

Pour évaluer les performances prévisibles d'un décanteur primaire et la pertinence de sa mise en place, les paramètres ad2 peuvent être évalués (MES ad2, DBO5 ad2, DCO ad2, N ad2, P ad2...)

1.4.3 Les matières organiques – les matières minérale

Les matières organiques proviennent des êtres vivants (matières végétales ou animales), les excréments, urines, ...etc. Ou des produits fabriqués à partir de ces êtres vivants (papier, tissus,...) ; les compositions de cette dernière c'est (l'hydrogène, l'oxygène, carbone, l'azote, phosphore et du soufre.)

A haute température (plus de 500°C), les matières organiques brûlent et se transforment en fumée.

Les matières minérales : graviers, sables, métaux, sels minéraux, Sont pour la plupart des composés qui évoluent peu dans les conditions naturelles. Elles constituent les résidus (ou cendres) obtenus après calcination à 550°C.

1.4.4 Les matières biodégradables et non biodégradables

Les matières biodégradables représentent l'ensemble décomposé transformables par des organismes vivants, essentiellement des bactéries.

Cette transformation peut se réaliser en présence d'oxygène de l'air, on parle de dégradation aérobie. Elle peut également survenir en absence d'oxygène, dégradation anaérobie.

La plupart des matières biodégradables proviennent des matières organiques, alors que les matières minérales sont plus généralement non biodégradables.

On notera enfin que certaines matières sont très rapidement biodégradables, tels le sucre, l'alcool,... . D'autres matières, de composition chimique plus complexe, nécessitent plus de temps et sont donc difficilement biodégradables. Il s'agit, par exemple, des graisses, du bois, du tissu.

Les matières organiques sont estimées par la quantité d'oxygène nécessaire à leur dégradation.

Deux analyses sont utilisées :

*la DCO,

*la DBO₅.

- **la DBO₅**

La détermination de la Demande Biologique en Oxygène est une façon indirecte d'évaluer la quantité de matières biodégradables essentiellement organiques contenues dans l'eau.

Ces substances biodégradables ont les mêmes sources que les matières organiques : métabolisme des organismes vivants, activité humaine, lessivage des sols, ...L'effet principal des matières biodégradables sur le milieu récepteur est l'appauvrissement en oxygène dissous de ce milieu qui résulte de leur dégradation.

La Demande Biologique en Oxygène (DBO) est la quantité d'oxygène nécessaire aux microorganismes pour assimiler la pollution biodégradable sur une période définie. En effet, une période allant de 21 à 28 jours serait nécessaire aux microorganismes pour assimiler la

totalité de la pollution biodégradable. Il a été déterminé qu'une période de 5 jours correspondait à l'assimilation de la pollution biodégradable carbonée (oxydation), et qu'ensuite les microorganismes assimilaient la pollution biodégradable azotée (nitrification).

Pour des raisons pratiques, on prendra en compte pour cette analyse la première phase de 5 jours que l'on notera DBO_5 . [44]

L'échantillon d'eau à analyser est dilué dans une eau saturée en oxygène. Après mélange, on mesure la concentration initiale C_0 en oxygène avant de fermer la bouteille et de la placer dans une enceinte à 20°C à l'obscurité.

Après 5 jours, la mesure de la concentration finale C_1 en oxygène est effectuée.

La valeur de la DBO_5 correspond à la différence des concentrations C_0 et C_1 .

$$DBO_5 = C_0 - C_1 \text{ en mg O}_2 / \text{l}$$

Les valeurs usuelles de DBO_5 pour une eau usée urbaine sont de l'ordre de 150 à 300 mgO₂/l.

[DBO_5] eau brute moyenne = 250 mg O₂/l

60 g DBO_5 /EH/j zone urbaine

54 g DBO_5 /EH/j zone rurale

Environ 35 g DBO_5 /EH/j réellement reçu

- **Le DCO**

La mesure de la Demande Chimique en Oxygène, permet de façon indirecte d'évaluer la quantité de matières oxydables essentiellement organiques contenues dans l'eau.

Les substances oxydables naturelles proviennent du lessivage des sols et essentiellement du métabolisme des organismes vivants.

L'effet principal des rejets de matières oxydables dans le milieu naturel est la consommation d'oxygène qui résulte de leur dégradation.

Leur présence peut entraîner la prolifération de microorganismes et la production de composés halogénés indésirables pour la santé et pour un éventuel traitement des eaux par le chlore.

La DCO (demande chimique en oxygène) est la mesure de la quantité d'oxygène apportée par un réactif chimique (oxydant) pour détruire toutes les matières organiques biodégradables et non biodégradables. [45]

On mélange à l'eau à analyser une quantité volontairement excessive de réactif oxydant (dichromate de potassium). Pour que la réaction soit rapide et complète, on ajoute de l'acide sulfurique et on chauffe pendant deux heures.

La DCO correspond à la différence entre la quantité d'oxydant initiale et celle subsistant après deux heures de réaction.

Dans une eau usée urbaine, la concentration en DCO est usuellement de l'ordre de 300 à 700 mg O₂/l.

Les analyses de la DCO peuvent être réalisées (à la demande de l'Agence de l'Eau) sur des eaux usées après décantation 2 heures.

Ces résultats sont alors notés : DCO_{ad2}

% d'élimination de DCO par décantation est de l'ordre de 25 à 30 %.

Le suivi de l'évolution de la dégradation de matière organique en fonction du temps permet de détecter la présence d'une DCO résiduelle que l'on appelle aussi DCO réfractaire ou DCO dure qui correspond à la fraction de la matière organique non dégradée par les bactéries.

L'évaluation de cette DCO dure permet de déterminer l'efficacité prévisible d'un traitement biologique ou la pertinence de sa mise en place.

De plus, cette fraction réfractaire laisse présager la quantité de matière organique que l'on retrouvera dans l'eau traitée.

En effet, le raccordement de certains effluents industriels peut empêcher le respect d'une norme de rejet classique pour un effluent urbain (tanneries par exemple).

- **Le rapport DCO/DBO₅**

DCO = matières organiques biodégradables et non biodégradables

DBO₅ = matières organiques biodégradables

Donc :

_ la DCO est toujours supérieure à la DBO₅

_ la DBO₅ est une fraction de la DCO

Plus cette fraction est importante, plus les bactéries seront efficaces dans la dégradation de la pollution.

Pour vérifier cette caractéristique, on calcule le rapport entre la DCO et la DBO₅, appelé rapport de biodégradabilité.

Pour une eau usée urbaine, ce rapport est de l'ordre de 2 à 3. L'effluent est considéré alors comme biodégradable.

Si $\frac{DCO}{DBO_5}$ est supérieur à 3, la pollution est peu ou pas biodégradable.

Pour les effluents d'industries agroalimentaires, il est de l'ordre de 1,5 à 2. Cela traduit donc une meilleure biodégradabilité, ce qui implique qu'un traitement biologique est parfaitement adapté pour ce type de pollution.

Un rapport supérieur à 3 traduit l'apport d'un effluent industriel plus ou moins difficilement biodégradable. Dans ce cas, le traitement biologique seul risque d'être inadapté (notamment pour des valeurs supérieures à 3,5). Mais au-delà d'un certain seuil plus que la valeur c'est la variabilité qui est importante.

1.4.5 Matière azotées

On distingue 5 formes d'azote dans l'environnement (l'azote Organique, l'azote Ammoniacal, l'azote Gazeux, les nitrates les nitrites)



Figure 17 : les formes de l'azote dans l'eau

1.4.6 les matières phosphorées

Il ya deux types de phosphore (Le Phosphore Organique, Le Phosphore minéral).

1.4.7 Le PH

Le PH ou " potentiel hydrogène" est l'indice d'acidité du milieu .Sa valeur, exprimée sans unité, varie de 0 à 14.

- un produit neutre (eau pure) a un pH égal à (ou très proche de) 7,
- un produit acide (citron, vinaigre, acide sulfurique) a un pH inférieur à 7,
- un produit basique (lessive, Alkali, soude, chaux) a un pH supérieur à 7.

La détermination du pH peut être réalisée au moyen de papier pH. Mais cette mesure est généralement réalisée à l'aide d'un pH mètre (mesure potentiométrique entre une électrode de verre et une électrode de référence).

Le pH d'un effluent urbain classique est légèrement alcalin, de l'ordre de 7,5 et 8. Celui des effluents industriels peut être, par contre, extrêmement variable. Ainsi, A titre d'exemple, le pH d'un rejet de laiterie habituellement légèrement basique en valeur moyenne, peut passer de 4 à 10 en moins d'une heure à la suite du nettoyage à la soude des cuves de stockage.

Les teneurs en H₂S sont fonction des valeurs de pH Les rejets peuvent présenter des fluctuations importantes de pH au cours d'une même journée, notamment quand il s'agit d'effluents industriels. Comme on peut le remarquer, à certains moments de la journée, le pH des eaux usées est acide puis basique, ces variations peuvent affecter le bon fonctionnement de l'épuration biologique.

La régulation du pH en tête de bassin d'aération peut être réalisée par :

- *Ajout d'acide et base complémentaire

*Auto neutralisation dans un bassin tampon

1.4.8 La conductivité

La conductivité est une mesure de la capacité d'une solution à laisser passer un courant électrique.

Cette capacité dépend des sels solubles dans l'eau et de la température de mesure.

Unité : Siemens/cm ou (inverse de la résistivité).

La conductivité des eaux usées est très variable d'une région à l'autre.

Pour des eaux usées domestiques, on peut citer des valeurs moyennes de 900 à 1 300 siemens/cm. Il faut de plus noter que les traitements physiques ou biologiques n'ont que peu d'incidence sur ce paramètre.

Des conductivités plus faibles peuvent être du à des eaux d'infiltration ou à des eaux pluviales.

Des conductivités plus élevées peuvent être dues à l'infiltration d'eaux de mer, des raccordements industriels (fabrique d'anchois, de salaison ...), au salage des rues (dégel) ...

1.5 Composition moyenne d'un effluent domestique

PH =7,8 soit légèrement basique

Conductivité : 1 100 micro-siemens/cm

Demande biochimique en oxygène (DBO) : 300 mg d'oxygène par litre d'eaux usées

Demande chimique en oxygène (DCO) : 700 mg d'oxygène par litre d'eaux usées

N azote organique : 250 mg par litre d'eaux usées

N ammoniac : 60 mg de N par litre d'eaux usées

P (phosphore total) : 35 mg de P par litre d'eaux usées

P des ortho-phosphates : 30 mg de P par litre d'eaux usées

Charge : Exprimées en grammes par habitant et par jour, les valeurs moyennes des charges s'établissent comme suit :

_ DBO : 30 - 34

_ DCO : 75 - 80

_ MES : 25 - 30

_ NK : 8 - 9

_ PT : 3,5 - 4

Tableau 07 : Caractérisations des eaux usées le cas de l'ONA

Composants% MS	Décantation primaire	Biologique Cm>0,1	Aération prolongée	Lagunage	Chimique
Matière organiques	55-65	70-85	60-75	45-60	35-55
N total	25-3	4-6	4-5	2-3	1,5-2
P	1-1,5	2,5-3	2-2,5	1,5-2,5	1,5-3
K	0,2-0,3	0,2-0,3	0,2-0,3	0,2-0,3	0,1-0,2
Carbone	33-40	38-50	33-40	25-35	20-30
Calcium	5-15	5-15	5-15	5-15	5-30
Magnésium	0,4-0,8	0,4-0,8	0,4-0,8	0,4-0,8	1,7-4,5
Fer	1-3	1-3	1-3	1-3	3-15
Al	0,1-0,3	0,1-0,3	0,1-0,3	0,1-0,3	0,1-15
Pouvoir fermentescible	++	++	+	-	(++) (-)
Contamination bactériologique	++	++	+	+	(++) (-)
Production de boues	+	+	-	-	++
Concentration des boues en sortie de traitement d'eau	30-90 g/l	5-10 g/l	6-8 g/l	60-120 g/l en moyenne stratification	20-60 g/l

2. Production des boues :

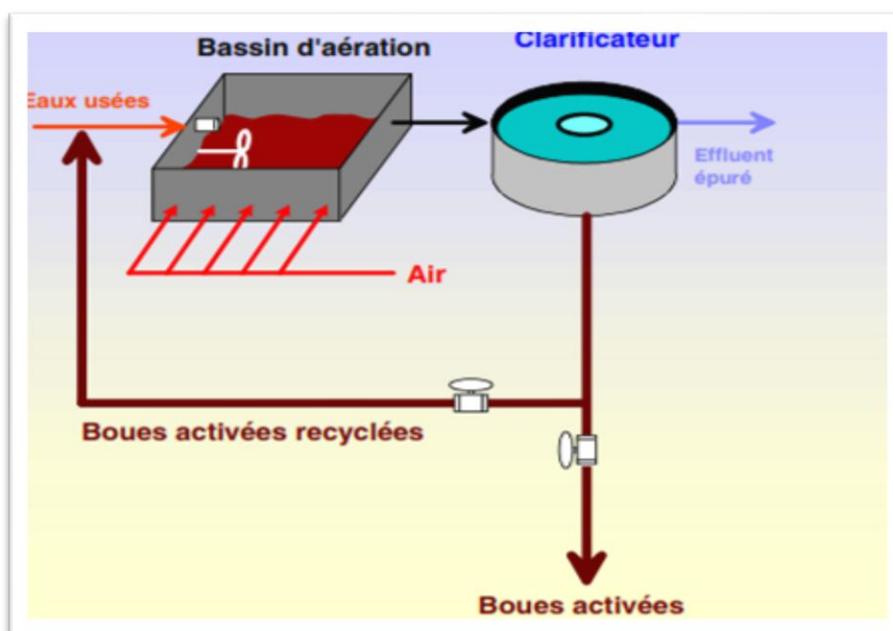


Figure 18 : Schéma de principe de production des boues

Sur le schéma (figure 18) nous avons présenté les éléments essentiels pour assurer le traitement des eaux usées par le procédé boues actives.

- L'arrivée d'eaux usées.
- Le BASSIN D'AERATION. Il peut être rectangulaire, circulaire ou annulaire.
- L'arrivée d'air.
- Le brassage de la boue.
- Le CLARIFICATEUR. Il peut être circulaire ou rectangulaire. A ce niveau s'effectue la séparation entre les boues et l'eau épurée.
- Le dispositif de RECIRCULATION des boues.
- Le dispositif d'EXTRACTION des boues.

Lors de l'épuration des eaux usées différents types de boues sont produits. Leurs origines et leurs caractéristiques sont listées ci-après :

Les boues primaires résultent de la décantation primaire des eaux usées, où les matières en suspension se déposent au fond du décanteur. La majorité des boues est issue de ce processus. Leur teneur en matière sèche (MS) est relativement élevée entre 2 et 4%.

Les boues secondaire ou boues biologiques sont issues du traitement biologique de l'eau, tels que les boues activés ou les lits bactériens. Leur teneur en MS est réduite suite à l'aération et la dégradation microbienne. Elle se situe entre 0.8 et 2% MS.

Les boues tertiaires ou boues physico-chimiques sont issues d'un traitement tertiaire des boues, comme par exemple la précipitation du phosphore.

Elles constituent une très petite partie de l'ensemble des boues. Leur teneur en MS est généralement inférieure à 1%.

Le mélange des boues est appelé boues mixtes. Leur teneur en MS varie entre 1 et 3 %, en fonction des traitements de chaque STEP.

La teneur en matière sèche et en matière organique des boues est une caractéristique importante pour la digestion anaérobie.

Elles déterminent principalement le potentiel de réduction du volume des boues et la production de biogaz, respectivement d'énergie. Plus la teneur organique d'une boue est élevée, plus son pouvoir méthanogène augmente. Suite à l'aération et l'âge plus avancé des boues secondaires, ces dernières ont un pouvoir méthanogène plus faible que les boues primaires (qui n'ont pas été aérées). Habituellement, les STEP méthanisent les boues mixtes.

2.1 Les paramètres caractéristiques des boues :

2.1.1 La charge massique C_m :

Elle caractérise l'équilibre biologique du traitement. Schématiquement, elle représente le rapport : $\frac{\text{nourriture}}{\text{biomasse}}$

Dans le réacteur biologique (bassin d'aération) elle est déterminée plus spécifiquement par le rapport :

$$C_m = \frac{\text{kg DBO}_5 \cdot \text{j}^{-1} \text{ (entrant sur le biologique)}}{\text{kg MVS (bassin d'aération)}} \quad (33)$$

$$C_m = \frac{\text{kg DOB}_5 \cdot \text{j}^{-1}}{\% \frac{\text{MVS}}{\text{MES}} \times V_{\text{BA}} \times [\text{MES}]} \quad (34)$$

$$C_m = \frac{\text{kg DBO}_5 \cdot \text{j}^{-1} \text{ (éliminé par le biologique)}}{\text{kg MVS (ensemble réacteur biologique et clarificateur)}} \quad (35)$$

Cette expression repose sur le fait que la quasi-totalité des boues va rencontrer dans l'espace de la journée la pollution entrante.

On peut calculer la charge massique avec plusieurs modes

- Le mode de calcul le plus utilisé en particulier par les constructeurs, est défini par relation suivante :

$$C_m = \frac{Q \times [\text{DBO}_5]}{(V_{\text{BA}} + 0,75 V_d) \times [\text{MVS}]_{\text{BA}}} \quad (36)$$

Avec :

Q : le débit journalier entrant dans le bassin d'aération ($\text{m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$)

$[\text{DBO}_5]$: concentration moyenne en DBO5 de l'influent à l'entrée du bassin d'aération ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

V_{BA} : volume du bassin d'aération (m^3)

$[\text{MVS}]_{\text{BA}}$: concentration en MVS des boues dans le bassin d'aération ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

- Le mode de calcul pris en compte par certains exploitants, est plus avant-gardiste. Il fait apparaître une estimation de la quantité de boue dans le clarificateur :

$$C_m = \frac{Q \times [\text{DBO}_5]}{V_{\text{BA}} \times [\text{MVS}]_{\text{BA}}} \quad (37)$$

Avec :

Vcl : volume utile du clarificateur (m³)

Dans la pratique, une évolution précise de la masse de boues dans le clarificateur reste très délicate.

Remarque :

Si cette concentration massique et élevé le temps de séjour dans le bassin d'aération est long, ce qui nécessite un grand volume de bassin, et de ce fait décantent lentement dans le clarificateur donc il faut prévoir une surface plus importante de décanteur aussi le dispositif d'aération est plus puissant (la consommation d'énergie sera également plus importante).

2.1.2. La charge volumique

Ce paramètre permet d'estimer la capacité du réacteur biologique à priori lors de la conception des ouvrages. Il représente le rapport suivant:

$$C_v = \frac{\text{kg DBO}_5 \cdot \text{j}^{-1} \text{ (entrant sur le biologique)}}{\text{m}^3 \text{ (réacteur biologique)}} \quad (38)$$

Cette notion sera aussi utilisée pour les traitements à cultures fixées, tels que lit bactérien, biofiltre ou pour les traitements de méthanisation.

On Calcul la charge volumique avec les formule suivant :

$$C_v = \frac{Q \times [\text{DBO}_5]}{V_{\text{BA}}} \quad (39)$$

Q : débit journalier d'eau brute alimentant l'étage biologique (kg.m⁻³)

[DBO⁵] : concentration en DBO₅ dans l'influent du réacteur biologique (kg.m⁻³)

V_{BA} : volume du bassin d'aération (m³)

2.1.3 le temps de séjour(ts)

De façon générale, c'est le temps de séjour hydraulique de l'eau dans un bassin (dessableur, décanteur primaire, bassin d'aération, clarificateur, ...) permettant le déroulement des phases de traitement souhaitées :

- sédimentation, tassement, séparation (pour les dessableurs et décanteurs),
- mise en contact, adsorption, assimilation, respiration, ... (pour le bassin d'aération).

Il dépend de deux facteurs :

- le volume du bassin V considéré (m³)
- le débit de l'effluent transitant q(m³.h⁻¹)

$$t_s \text{ (heure)} = \frac{V}{Q} \quad (40)$$

2.1.4 L'âge des boues A

L'âge des boues représente le temps de séjour des boues dans les ouvrages de traitement biologique. Celui-ci est bien évidemment beaucoup plus long que le temps de séjour de l'eau à traiter, du fait de la recirculation répétitive des boues décantées vers le bassin d'aération.

L'âge des boues détermine de nombreux aspects du traitement, tels que :

- taille et densité du floc biologique,
- degré de minéralisation (% MVS) de la boue biologique,
- présence de bactéries nitrifiantes,
- présence et diversité de la microfaune prédatrice de bactéries (Protozoaires, Rotifères, Nématodes, ...).

Associé à la température, l'âge des boues constitue le paramètre fondamental de dimensionnement des stations d'épuration devant éliminer l'azote par nitrification.

L'âge des boues dépend de deux facteurs :

- la quantité S_t des boues, exprimée en (kg MS), présentes dans le biologique,
- la quantité moyenne des boues en excès E , évacuées hors du procédé biologique, exprimée en (kg MS.j)

$$A \text{ (jour)} = \frac{S_t}{E} \quad (41)$$

Tableau 08 : Age des boues requis

DBO₅(kgO₂/l)	NGL(mg N/l)	Age(j)
30	-	=2
15	-	=4
-	20	>13j à 12°C
-	10	>18j à 12°C

Le mode de calcul le plus utilisé est défini par la relation :

$$A = \frac{[MES]_{BA} \times V_{BA}}{[MES]_E \times Q_E} \quad (42)$$

Avec :

q_E : Débit journalier (m³) d'extraction des boues en excès

$[MES]_{BA}$: Concentration (kg.m⁻³) en MeS des boues activées

V_{BA} : Volume (m³) du bassin d'aération

$[MES]_E$: Concentration (kg.m⁻³) en MeS des boues extraites.

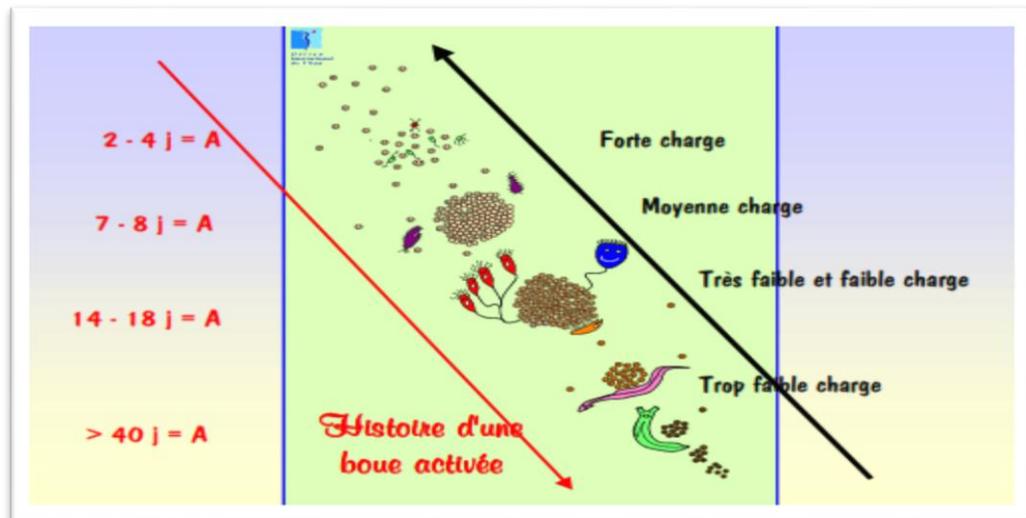


Figure 19 : histoire d'une boue active

2.1.5 L'indice de boue IB

Ce paramètre permet d'apprécier l'aptitude de la boue à la décantation. Cet indice représente le volume occupé par un gramme de boue, après 30 minutes de décantation dans une éprouvette transparente d'un litre.

Il dépend donc de deux éléments :

- le volume de boues décantées V_{30} exprimé en (ml.l^{-1})
- la concentration en MES des boues exprimée en (g.l^{-1})

$$Ib (\text{ml.g}^{-1}) = \frac{V_{30}}{[\text{MES}]} \quad (43)$$

V_{30} : c'est le volume décanté V_{30} mesuré, doit impérativement être inférieur à 300 ml, ce qui peut nécessiter une dilution de la boue par de l'eau épurée avant réalisation du test. Pour le calcul, il faut tenir compte de la dilution.

$$V_{30} = V_{30\text{mesuré}} \times \text{dilution} \quad (44)$$

3. Prélèvement des échantillons et préparation

La matière première dans l'état nature riche avec des composants organiques, les bactéries, et d'autres caractéristiques physiques, chimique, thermique,....

Pour cela Nous avons prélevés les boues primaires active aériennes humides avec un taux en matières sèches de 2% en respectant les normes international de prélèvement pour conserver les caractéristiques biologiques, chimiques, et thermochimiques, on remplira dans une bouteille en plastique de 5L qui est idéal pour se types de prélèvement, et on évité le contacte avec l'air dans le temps de déplacement entre la station l'ONA et laboratoire, dans ce temps de déplacement on mettre la bouteille dans un glaisière pour assurais la température entre 0 C° et 5C° sans oublié le temps de déplacement c'est 30 min .

Le pH de la solution a été mesurée a l'aide d'un pH mètre et elle a été mesuré de 7.16 dans une température de 22°. Nous avons besoin d'une quantité des boues bien concentras pour voir cette concentration nous prendre la partie des boues décantais après le 30min de décantation ce concentration est approchante à 10% de MS.

4. Description du prototype de digesteur biomasse

4.1 Matériel et méthodes

4.1.1 Matériel

- Cuve de fermentation bouteille en verre transparente de 2 – 2,25 L
- Bain-marie de volume 20cm³ en verre pour assurer une température bien constante.
- Des tuyaux à gaz transparent (tuyaux de sérum).
- Des vannes pour bien gérer le contrôle des prototypes.
- Deux thermomètres à mercure.
- 2 résistances à 9 niveaux pour rassurer l'échauffement du bain.
- Une bouteille en plastique de 1.25 L bien fermer hermétiquement remplie d'eau et équipé d'un système de tuyauterie pour mesurer le volume du gaz produit.
- Eprouvette gradué pour mesurer le volume du gaz.
- Seringue pour tester l'échantillon.

Matière premier c'est les boues primaires aériennes qui nous avons prélevés aux la station d'épuration l'ONA.

- 1 Seringue.
- 2 Bouchant (liège).
- 3 L'eau.
- 4 Les boues.
- 5 Bassin en verre.
- 6 plaque chauffante.
- 7 une vanne.
- 8 sortie de biogaz.
- 9 niveau d'eau.
- 10 l'eau .
- 11 Supporte .
- 12 Éprouvette

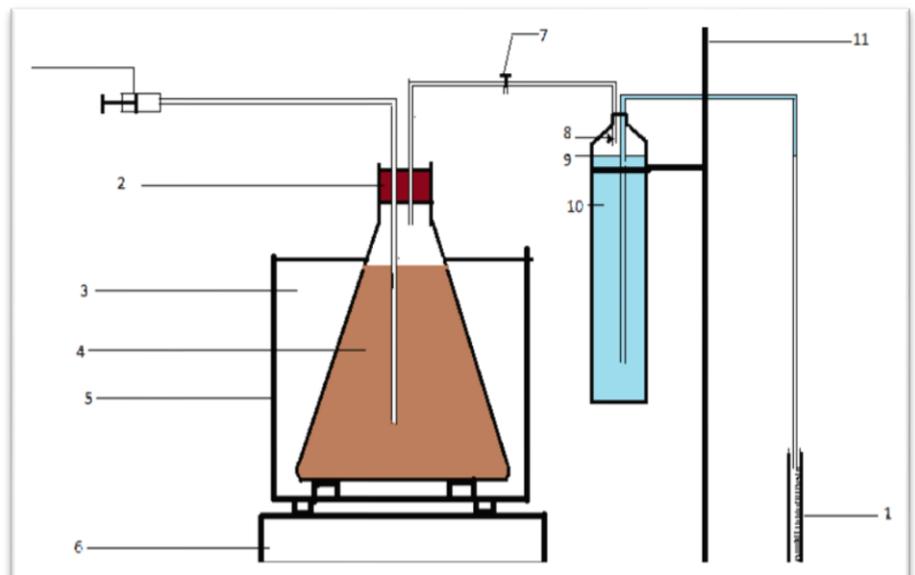


Figure 20 : schéma de prototype



Figure 21 : photo du digesteur.

4.1.2 Méthode

Préparation et lancement de la fermentation :

Pour prouver l'effet de la température sur la production on a réalisé deux prototype soumise à deux température différente $T=35^{\circ}$ et a $T=55^{\circ}$. Pour cela on a remplis le cuve par les boues fraiche extraite du bassin d'aération avec un volume générale de 2L qui contient 10% de la matière sèchent, on assurant anaérobiose par un bouchant de liège.

Ce cuve la mis dans un bain-marie qui est remplie à une hauteur d'eau de 18 cm exercé a deux température différente $T=35^{\circ}$, $T=55^{\circ}$, mis en dessous de deux résistances pour assurer la température de $T=35$ en fais réglé la résistance au niveau 1, et pour $T=55^{\circ}$ en la réglé au niveau 2 et sa dans une température ambiante de $T_a=20^{\circ} \pm 3^{\circ}$.

Le gaz produit est mesurée par la méthode des liquides [53] déplacée qui été réalisée par un système de mesure trop simple qui contient une bouteille de 1,5 L remplie de 1,25 L d'eau et relier avec le cuve ou se passe la production du biogaz qui arrive au système de mesure qui est par le temps fait une pression sur l'eau contenue dans la bouteille. De cela, le volume de l'eau poussée par le gaz est mesurée par une éprouvette graduées et se volume d'eau poussée c'est le volume de gaz produit.

Conclusion

Les boues qui nous avons prendre pour cette études c'est des boues d'épuration produire a partir des traitements des eaux usée dans la station d'épuration ONA Tlemcen, cette boues elle prendre des caractéristique biologique, thermochimique, physique, celons les normes international c-t-d des caractéristiques constant (une concentration massique, concentration volumique, teneur en matière organique sèche, DBO, DCO), les échantillons ont été prélevés en vue de leur caractérisation et en traitiez pour amélioré le concentration de 2% jusqu'a 10% . Le prototype qui nous avons réalisé c'est très simple relié avec un système de mesure du volume avec la méthode de liquides déplaces et alimenté avec une source de chaleur pour assuré la température.

La méthanisation des boues elle à besoin d'un rapport d'énergie pour la chaleur ce qui nous avons présenterons dans le chapitre suivant les calcule de l'énergie consommée et perdu, l'énergie produit net et déduire le rendement.

Cette étude au laboratoire sera complétée par une étude numérique en simulant les conditions de propagation à une grande échelle.

CHAPITRE IV

*Simulation numérique de
calcul de l'énergie net
produit par méthane*

Sommaire du chapitre

Introduction . . . . .	.83
1. Parti des calculs thermique et énergétique . . . . .	.83
1.1 Les transferts thermiques dans le digesteur. . . . .	.83
1.2 Transferts thermiques dans le digesteur description du transfert avec schéma . .	84
1.3 Bilan thermique . . . . .	.84
1.4 l'énergie équivalent de volume de biogaz produit . . . . .	.87
1.6 l'énergie net produite . . . . .	.87
2. Simulation de la distribution de la chaleur dans le dégesture.	87
2.1 Quick field.	87
2.2 les donnée de base pour la simulation . . . . .	.88
2.2 le maillage. . . . .	.88
Conclusion.	90

Introduction :

Après la simulation expérimentale de la production du biogaz à partir de la conversion biomasse des boues d'épuration des eaux résiduaires où nous avons obtenu un volume de biogaz appréciable après variation des paramètres physico chimiques (température, temps d'immersion, concentration de la boue, pH).

Ces résultats ont été obtenus dans un prototype de digesteur de laboratoire conçu en verrerie en conversion anaérobie fermée hermétiquement pour minimiser les pertes de gaz produit et plongé dans un Bain-marie pour diminuer les pertes de chaleur ou les échanges thermiques avec le milieu extérieure afin de s'approcher du contexte industrielle. Le digesteur est une cuve d'une forme bien déterminée qui contient les matériaux organiques valorisables, où se produit le biogaz par un procédé de conversion méthanogène conçue de manière à garder la matière organique en décomposition dans les conditions d'humidité et d'absence d'oxygène qui favorisent la croissance de cette production.

Les transferts thermiques définissent la propagation de la chaleur dans le prototype sous forme de conduction, de convection, ou de rayonnement.

Nous développerons dans ce chapitre une simulation numérique des transferts de chaleur dans le prototype de digesteur, on calculera la chaleur échangée avec le milieu extérieur (pertes au coté du digesteur) la quantité de chaleur nécessaire au chauffage, et on déduira l'énergie nette produite par méthanisation. On calculera ensuite l'énergie équivalente de volume de méthane produit et on terminera ce chapitre par une simulation de la distribution de la température dans le digesteur en utilisant un code de calcul (quick Field) pour voir la distribution de chaleur dans chaque point de digesteur et le gradient de température.

1. Parti des calculs thermiques et énergétiques :

Cette partie présentera les différents transferts de chaleur dans le digesteur et les équations nécessaire pour les calculs thermiques des quantités de chaleur fournir pour assurer la température d'immersion de prototype (digesteur) sans oublier les pertes avec le milieu extérieur et l'énergie perdue avec la vaporisation et le gaz déplacé.

1.1 Les transferts thermiques dans le digesteur :

Le transfert de chaleur ou pour employer l'expression actuelle, le transfert d'énergie thermique est une transmission de cette énergie d'une région à une autre; La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température des hautes vers les basses températures.[46] On reconnaît classiquement trois modes de transmission : la conduction, le rayonnement et la convection. La conduction thermique c'est l'échange de chaleur par

contact (solide-solide). Le rayonnement thermique c'est échange par radiation entre deux corps à une distance. Le troisième mode de transfert d'énergie calorifique qui est la convection c'est échange de chaleur entre un fluide et un solide Dans ce cas le phénomène thermique est compliqué par des déplacements de matière et au transfert de chaleur se superpose le transfert de masse.[47]

1.2 transferts thermiques dans le digesteur description du transfert avec schéma

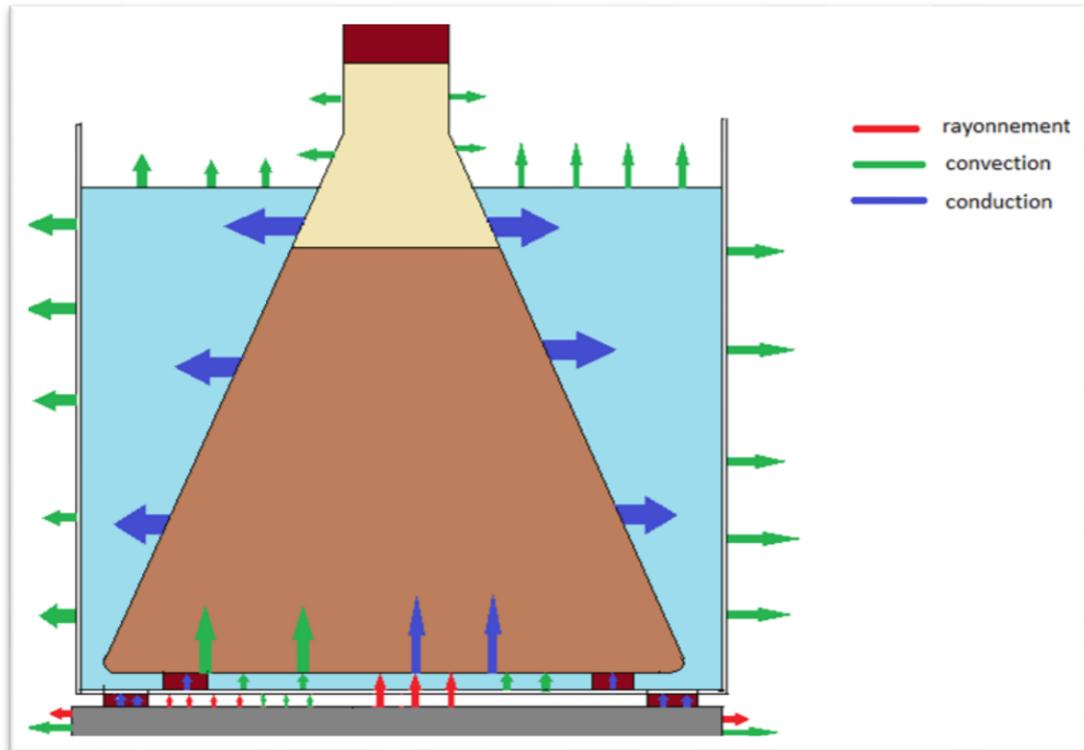


Figure 22 : schéma de principe de distribution des échanges de chaleur dans le prototype

1.3 bilan thermique

Dans cette étude, La chaleur totale nécessaire au maintien de système prototype d'expérience dans le laboratoire à une température désirée peut être exprimée par les équations (45): [48]

$$Q_t = Q_i + Q_d + Q_g + Q_w \quad (45)$$

Q_t : l'exigence totale de chaleur du digesteur ($J \cdot j^{-1}$)

Q_i : la chaleur nécessaire pour élever la suspension affluente à la température de digestion désirée ($J \cdot j^{-1}$)

Q_d : les pertes de chaleur par les murs du digesteur ($J \cdot j^{-1}$)

Q_g : les pertes de chaleur due à l'autoclave en laissant de gaz ($J \cdot j^{-1}$) [52]

Q_w : la perte de chaleur par évaporation ($J \cdot j^{-1}$)

- On Calcule la chaleur nécessaire pour élever la température de digestion Q_i avec l'équation (46)

$$Q_i = c m (T-T_a) \quad (46)$$

m : la masse total de la suspension doit être ajouté au digesteur (g)

T : température de fermentation en ($^{\circ}C$); $T_1= 55^{\circ}C$ et $T_2=35^{\circ}C$

T_a : est la température ambiante ($^{\circ}C$); quelle est variante pendant 20 jour comme nous montre dans se tableau de mesure.

Tableau 9 : variation de la température mesurée en fonction de temps (température ambiante)

jour	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ta	23	19		17	20	16	19	20	20		16	18	21	20	22	26		25	23	27

c : est la chaleur spécifique de la suspension affluente (J / g de $^{\circ}C$); peut être calculée avec l'équation (47).[47]

$$c= 4.17 (1- 0.00812MS) \quad (47)$$

MS : est la concentration de matière sèche en%. Dans notre cas a été mesurée de 10 %

- On Calcule la chaleur perdue par les murs du digesteur avec l'équation suivante :

$$Q_d = U S (T-T_a) \quad (48)$$

U : le coefficient de transfert de chaleur du plexiglas que nous utilisé dans cette étude

$U= 0.18W/m^2$. $U = 15,55 \text{ kJ / j m}^2 \text{ }^{\circ}C$.

S : surface qui elle à une contact avec l'air ambient (m^2) .

- On calcule la chaleur deplaces avec le gaz avec l'équation suivant : [48]

$$Q_g = (1676 + 1772. \frac{1-f}{f})(V.\gamma)(T - T_a) \quad (49)$$

γ : est la production de méthane volumétrique (m^3/ j); qu'on a déduire expérimentalement (voir le tableau 10) .

V : est volume utile du digesteur (m^3).

f : est la concentration du méthane (%) dans le biogaz produit qui a été fixée de 65 % [26]

Tableau 10 : les résultat de volume de biogaz produit

Temps en (jour)	Le volume de biogaz produit en (ml)	
	T= 35 C°	T= 55 C°
1		11
2	42	80
3	-	-
4	33	35
5	42	12
6	38	28
7	32	50
8	25	18
9	20.5	13
10	-	-
11	15.5	36
12	39.5	22
13	27	27
14	25.5	26
15	30	23
16	28	20
17	-	-
18	34	22
19	34	30
20	32	29

– Qw peut être calculée avec l'équation (50):

$$Q_w = W_w \cdot [H_v + C_v \cdot (T - T_a)] \quad (50)$$

Ww : est le débit massique de vapeur à partir de digesteurs (kg j^{-1}) ; peut être calculée avec équations (51)

$$W_w = 0.804 \times \frac{V \cdot \gamma \cdot X_w}{f(1 - X_w)} \quad (51)$$

où X_w est le numéro moléculaire de l'eau dans le biogaz calculé avec l'équation suivante

$$X_w = 1.27 \times 10^6 e^{\frac{-5520}{t+273}} \quad (52)$$

H_v : est chaleur latente de vaporisation (35 C°= 2418,638 kJ / kg ; 55°=2370,55 kJ/kg)

C_v : est la chaleur spécifique de la vapeur (1.886 kJ / kg C°).

Les résultats de calcul de la chaleur totale fournie sont donnés dans les figures 23, 24 (chapitre 5)

1.4 l'énergie équivalente de volume de méthane produit

Le but de la méthanisation est de produire un gaz combustible qui sera utilisé comme une source d'énergie ; on peut calculer cette énergie équivalente E par l'équation (53) :

$$E = P_{CH_4} \times PCI \quad (53)$$

PCI : le pouvoir calorifique inférieur du méthane vaut 9,94 kWh/m³ dans les conditions normales de température et de pression. A 65% de méthane il vaut 6,46 kWh/m³ .[49][45]

P_{CH_4} : la production du méthane qu'on peut calculer par l'équation (54) :

$$P_{CH_4} = MO \times Bo \quad (54)$$

Le potentiel de production de gaz (Bo) d'un substrat est le volume total de gaz produit par unité de matière organique traitée pour un temps de rétention infini ; il est fonction de la biodégradabilité du substrat , la constante Bo est de l'ordre de 0,5 m³/kg quelque soit la nature du substrat. La teneur en MO dans notre cas est de 100 g/L .[49]

3.L'énergie nette produite

Cette énergie est l'énergie qui reste si on utilise une partie de méthane produit pour le chauffage dans le même prototype de méthanisation ; ou on peut dire que c'est l'énergie équivalente au volume de biogaz produit moins l'énergie à fournir pour assurer le chauffage du digesteur utilisé dans notre travail ; on utilisera l'équation (55) pour les calculs.[48][49]

$$E_n = E - Q_t \quad (55)$$

2 . Simulation de la distribution de la chaleur dans le digesteur

2.1 Description du code de calcul QuickField

Le code de calcul utilisé pour la simulation est un système d'analyse par les éléments finis. C'est un milieu interactif orienté pour l'analyse thermique, électromagnétique, et le stress. Les types d'analyse standard incluent les transferts thermiques linéaire et non linéaire en régime permanent et transitoire de la chaleur et de la diffusion, l'électrostatique linéaire et non linéaire magnétostatique, magnétiques transitoires. [50]

2.2 les donnée de base pour la simulation

Pour simuler le prototype de laboratoire par un programme qui fonctionne par les éléments finis, il faut donner un dessin géométrique avec les dimensions réelles et en introduisant les conditions aux limites (les température, le flux,..)et les caractéristiques thermiques des surfaces et des volumes.[51]

Tableau 11: Données essentielles pour la résolution du système de simulation

Materiaux	Conductivité (j/m ² k)
Eau	0.613
Air	0.025
Boue	0.831
Boi	0.17
Verre	1.05

2.1 Le maillage

Dans une simulation numérique par la méthode des éléments finis en utilisant le code de calcul (Quick Field), la qualité en forme et en taille des éléments du maillage est importante, en raison de son effet sur la précision des solutions numériques et sur la convergence du schéma numérique utilisé lors du calcul. L'adaptation des maillages au comportement physique du phénomène étudié est un moyen de réduire les temps de calcul et d'améliorer la précision des résultats numériques. Le choix du bon maillage est ainsi très important car le système risque de ne pas converger si le maillage ne correspond pas à la complexité du système. Dans ce programme le maillage peut être automatique au bien manuel.

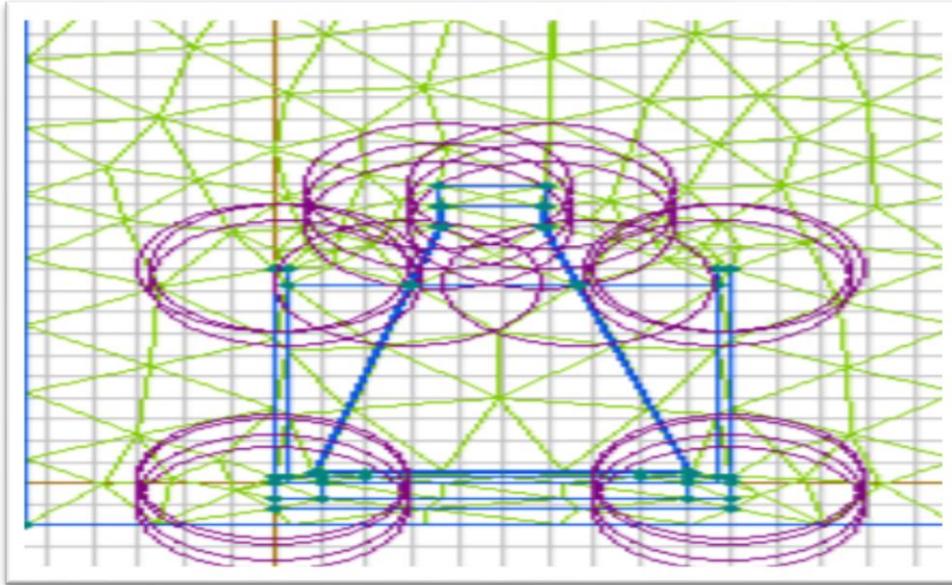


Figure 23: Maillage correspondant au système

Les résultats de la simulation de la distribution de la chaleur dans le digesteur seront donnés dans le chapitre suivant.

Conclusion

Dans cette simulation numérique, nous avons présentés deux parties :

La première est le calcul de l'énergie consommée sous forme de quantité de chaleur et l'énergie équivalente du méthane produit. La différence entre les deux énergies est l'énergie propre qui exprime le rendement.

La seconde est la distribution de la chaleur dans le digesteur en utilisant la méthode des éléments finis sous l'environnement QuickField. Nous avons pu modéliser la distribution de la chaleur à deux températures ($T=35^{\circ}$ et $T=55^{\circ}$) en considérant la même structure géométrique et ayant comme différence les températures de la plaque et les flux et en partant de la nature du problème (thermique), la construction de la géométrie, les conditions aux limites et le maillage.

Nous présenterons dans le chapitre suivant les différents graphes obtenus et les résultats de la simulation. Nous terminerons cette étude par une discussion sur l'influence de la variation de volume, la distribution de la chaleur et l'énergie consommée et produite et l'influence de la température sur les variables du système.

Référence bibliographique

[26] René MOLETTA Méthanisation de la biomasse 10/05/2008

[46] Phénomènes de transfert de chaleur et de masse ; Prof. H. Hofmann Laboratoire de Technologie des Poudres EPFL / IMX

[47] Notions de transfert thermique par convection ; Jacques HUETZ Directeur de Recherche au Centre National de la Recherche Scientifique et Jean-Pierre Maître de Conférences à l'École Centrale des Arts et Manufactures

[48] Thermal modeling of the completely stirred anaerobic reactor treating pig manure at low range of mesophilic conditions

[49] <http://hmf.en.hec.ch/fr/travaux/cd/beiert/4/HTML/biom3.html>(valorisation des boues de la station d'épuration)

[50] QuickField Finite Element Analysis System Version 5.1 User's Guide

[51] tableaux des données thermique sit

[52] Ashare et al. (1978) ont examiné en détail le calcul de Q_g .

CHAPITRE V

Résultats et discussion

Sommaire de chapitre

Introduction	92
1. Discussion des résultats expérimentaux	93
1.1 le volume de biogaz produit	93
1.2 Influence des paramètres physico chimique	94
1.2.1 L'effet de température	94
1.2.2 L'influence de concentration en matière organique	95
2 résultats de simulation	95
2.1 Transferts thermiques dans le digesteur	95
2.1.1 la quantité de chaleur nécessaire pour le chauffage Q_t.	96
2.1.2 L'influence de température ambiante	96
2.2 Valorisation énergétique du méthane produit	96
3 distribution de la température dans le digesteur	102
Conclusion	103

Introduction

L'étude a porté sur la conversion énergétique par biomasse spécifiquement la méthanisation anaérobie des boues d'épuration primaire active refusé après les traitements des eaux usées produites dans le système d'épuration des eaux résiduaires ONA Tlemcen. La méthanisation est un type de valorisation basé sur l'activité des microorganismes (les bactéries) dans un milieu sans oxygène et à une température comprise entre 20C° et 70C°.

La connaissance de la production d'énergie nette par fermentation anaérobie est importante pour une modélisation fiable et de l'efficacité du procédé et le rendement.

Pour suivre cette conversion au laboratoire nous avons utilisés pour l'apport thermique une source de chauffage par énergie fossile (plaque chauffante électrique) et on calculera la valorisation énergétique de cette consommation pour comparer avec l'énergie produite a partir des équations mathématiques présentées dans la partie simulation numérique. La distribution de la chaleur dans le prototype de digesteur de laboratoire en opérant à l'aide de deux températures à T=35C°et à 55C° sous environnement Quick Field. Ces deux températures ont été choisies pour avoir le maximum de la conversion et de l'activité bactérienne respectivement mésophiles et thermophiles.

Dans ce chapitre on discutera les résultats obtenus par la simulation expérimentale du volume de biogaz produit dans les deux températures en considérant l'effet de la température ambiante et la température dans le prototype sur la production, la consommation énergétique, le temps d'immersion ; l'effet de la concentration MS et MO, la nature et l'activité des boues sur la production de méthane et la nature de biogaz.et les résultats de la simulation numérique obtenus par le code de calcul Quick Field de la distribution de la température, chaleurs consommées et l'énergie équivalente de volume du biogaz produit.

1. Volume du biogaz produit :

1.1. Description

Le prototype de conversion biomasse a été monté dans le laboratoire de recherche LAEPO pôle universitaire Imama – Tlemcen. Le volume produit du biogaz a été mesuré en utilisant la méthode des volumes déplacés []. Les figures (26) et (27) représentent l'évolution du volume en fonction du temps pour les deux températures considérées $T=35^{\circ}\text{C}$ et $T=55^{\circ}\text{C}$ ou la production du biogaz n'est pas uniforme en raison du climat d'environnement et de l'activité des microorganismes.

La période de production dans le digesteur 1 à une température de 35° pendant 20 jours, l'inflammabilité du gaz produit a été à partir du septième jour avec une production maximale de 40ml/jour ; tandis que dans le digesteur 2 à une température de 55°C l'inflammabilité a été obtenue à partir du 4ème jour avec un volume maximale de 50 ml /jour

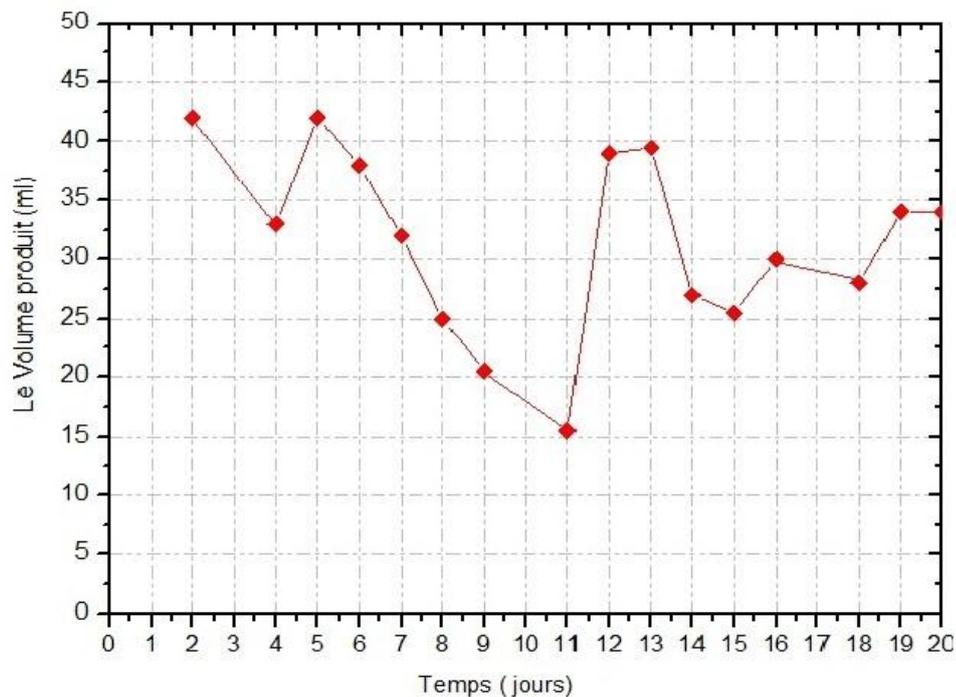


Figure 25 : résultats expérimentaux du volume produit on fonction de temps pour une température $T=35^{\circ}\text{C}$

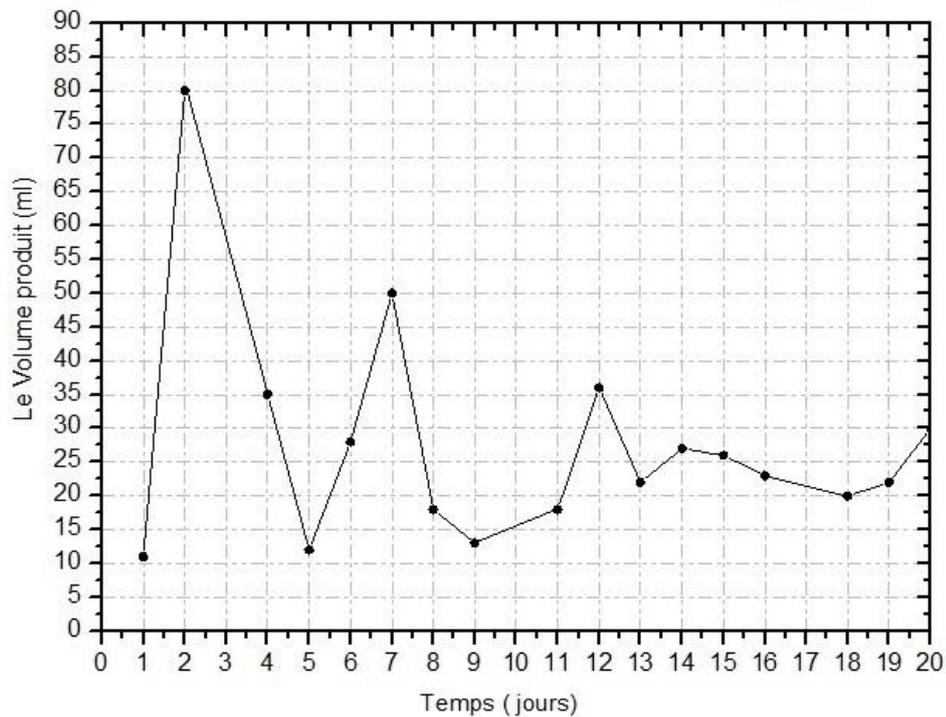


Figure 27 : résultats expérimentaux du volume produit en fonction du temps pour une température $T=55^{\circ}\text{C}$

1.2. Influence des paramètres physico chimique :

1.2.1 Effet de la température :

Dans l'ensemble de l'expérience traitée, on a supposé que la teneur du méthane dans le biogaz produit est de 65% [26] pour les deux températures considérées. On a remarqué également que la température n'a pas une influence sur le pourcentage du méthane dans le gaz produit mais elle a une influence sur l'activité des microorganismes dans chaque étape de développement car les bactéries présents dans les boues d'épuration primaire active sont des microorganismes actifs pour être transformés en présence de la chaleur et de l'humidité. Les bactéries qui travaillent au début sont des agents méthanogènes organisés en groupes où chacun exerce une fonction spécifique. Les bactéries hydrolytiques commencent à désagréger la matière organique complexe en petites molécules simples. Les bactéries présipermol et les bactéries fermentatives transforment les molécules produites en produit intermédiaire tel que (l'alcool, acide organique, acide gras volatil et l'acide acétique, H_2 et CO_2). Ensuite un autre groupe de bactéries appelées acétogène commence à transformer les alcools et les acides organiques en acide acétique en plus de H_2 et une petite quantité de CO_2 . Dans ce point des deux actions des bactéries correspond à la formation de méthane. Les microorganismes méthanogènes acétiques élastique transforment l'acide acétique en

méthane et CO_2 avec 65% de CH_4 l'autre groupe de microorganismes appelé méthanogène-hydrogène-otrophe utilise le $\text{H}_2 + \text{CO}_2$ pour produire 30% de CH_4 ; dans cette étape il y a une production de H_2 où on a besoin d'autre type de bactérie ce sont les sulfato - réductrice qui transforment le soufre contenu dans la matière primaire avec H_2 en hydrogène sulfuré ; finalement on obtient méthane + CO_2 et hydrogène sulfurique et le H_2O ce mélange est appelé biogaz. Après cette présentation des étapes de travail des bactéries on peut déduire que la température a une influence indirecte sur le volume produit. C'est le facteur qui dirige l'activité des microorganismes et le temps réactionnel

1.2.2 Influence de la concentration en matière organique :

La concentration des boues en matières organiques c'est un paramètre très important dans la conversion méthanogène par ce que la méthanisation c'est la transformation de ces matières en un gaz donc si la concentration est grande la production est élevée mais sans dépasser les limites car il faut la présence de l'eau (milieu humide); dans notre travail nous avons pris une teneur en matières sèches de 100g/l c'est une concentration importante donc c'est un paramètre positif pour avoir un volume supérieur.

1.2.3 Influence du temps réactionnel

Les résultats ont montré que le temps d'immersion influe sur le processus de méthanisation. Plus le temps est prolongé, plus le volume varie et la matière organique sèche pour les deux températures diminue.

2. Bilan thermique

2.1. Transferts thermiques dans le digesteur :

En générale toute sorte de source d'énergie qu'elle soit émettrice ou réceptrice il y a un flux de chaleur qui transmet cette énergie et dépend du gradient de température. La chaleur s'écoule des hautes températures vers les basses températures sous forme de conduction de rayonnement et de convection.

Dans le système du digesteur, la production d'énergie nette (E_n) serait la différence de valeur entre la chaleur de méthane produit (E) et de la chaleur totale (Q_T) qui exprime la quantité d'énergie nette produite. Puisque on a une différence de température dans le prototype et le milieu ambiant les phénomènes de transferts thermiques sont comme suit :

De bas en haut de notre prototype on a une résistance thermique (plaque chauffante électrique) qui assure le gradient de température c'est notre source émettrice où la chaleur se distribue avec l'effet de la conduction sur sa surface. Le flux provoque une sorte de convection libre entre la plaque chauffante et la surface inférieure du bain marin et la même

chose pour les fluides (eau, boues, air ambiant) ou il y a une convection libre avec un coefficient de convection différent pour chaque fluide suivant la chaleur exercée et le type de fluide, avec une conduction dans les quatre parois latérales plus la plaque inférieure du bain avec une épaisseur de $e = 0.005\text{m}$ et une conductivité thermique bien spécifique et même celle du digesteur il y a une conduction que soit la surface émergée dans le bain ou bien celle qui est en contact avec l'air ambiant avec une épaisseur $e = 0.002\text{ m}$ (figure 22).

Ces modes expriment les différents échanges et les pertes calculées, Comme la chaleur nécessaire pour élever la suspension affluente à la température de digestion désirée, les pertes de chaleur par les murs du digesteur, les pertes de chaleur due à l'autoclave, la perte de chaleur par évaporation.

2.2 Quantité de chaleur nécessaire pour le chauffage Q_t :

D'après les calculs on a remarqué qu'il y a une consommation d'énergie (Q_T) pratiquement importante dans une marge de 70- 180 (kJ/j) pour l'ensemble de la période février - mars 2014 (figure 24). La production d'énergie calculée à la température de $T = 35\text{ °C}$ (tableau).montre que la chaleur nécessaire pour élever la suspension affluente au travail de température (Q_i) représente 95% de la chaleur totale, les pertes de chaleur à travers la surface du prototype (Q_d) représente 4.3% de la chaleur totale (Q_T) nécessaire, et les pertes de chaleur (Q_g) et (Q_w) représente 1.4%. Les résultats ont montré que les jours

(1, 5, 8, 9, 13, 14, 15, 18, 19, 20) ou il y avait des températures ambiantes de 20 °C jusqu'à 30 °C (Q_i) diminue. Ce résultat peut être expliqué par l'approche de valeur des températures ambiantes et la température opérationnelle au niveau du digesteur de 35 °C , donc on réduit l'énergie consommée qui est dans notre cas une source de chaleur électrique.

La stabilité dans la chaleur en minimisant les pertes à travers les murs du digesteur pour un intervalle entre 3 – 14(kJ/jr) et les pertes due à l'autoclave en laissant le gaz par évaporation varie d'une énergie trop faible autour 1×10^{-7} à 6×10^{-5} (kJ/jr).

Pour la température 55 °C on a obtenu les mêmes résultats que la température 35 °C avec une augmentation dans la valeur de Q_i juste pour atteindre la température désirée pour le digesteur. La chaleur Q_i varie de 220 – 325 (KJ/jr), ce qui implique une augmentation dans les pertes par rapport aux murs du digesteur dans une marge de 10 - 21.5 (KJ/jr), mêmes principes pour Q_w et Q_g qui varie entre 4×10^{-7} - 4×10^{-4} (Kj/jr).

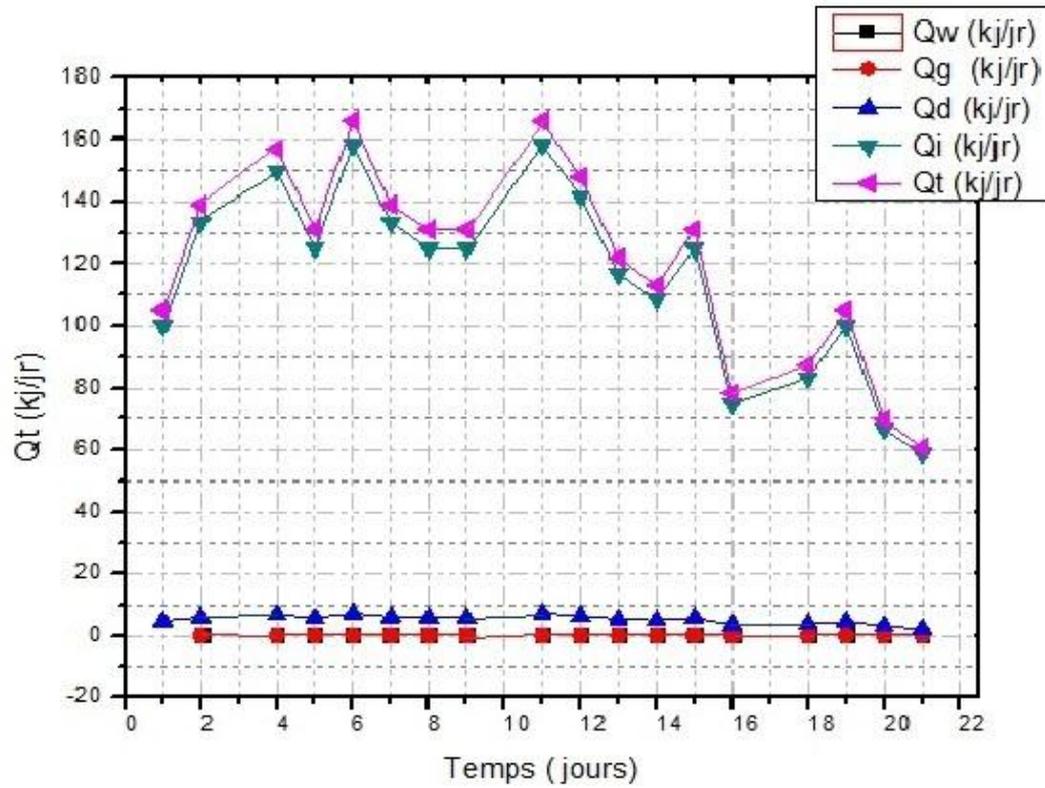


Figure 24 : quantité de chaleur totale consommée pour T=35C°

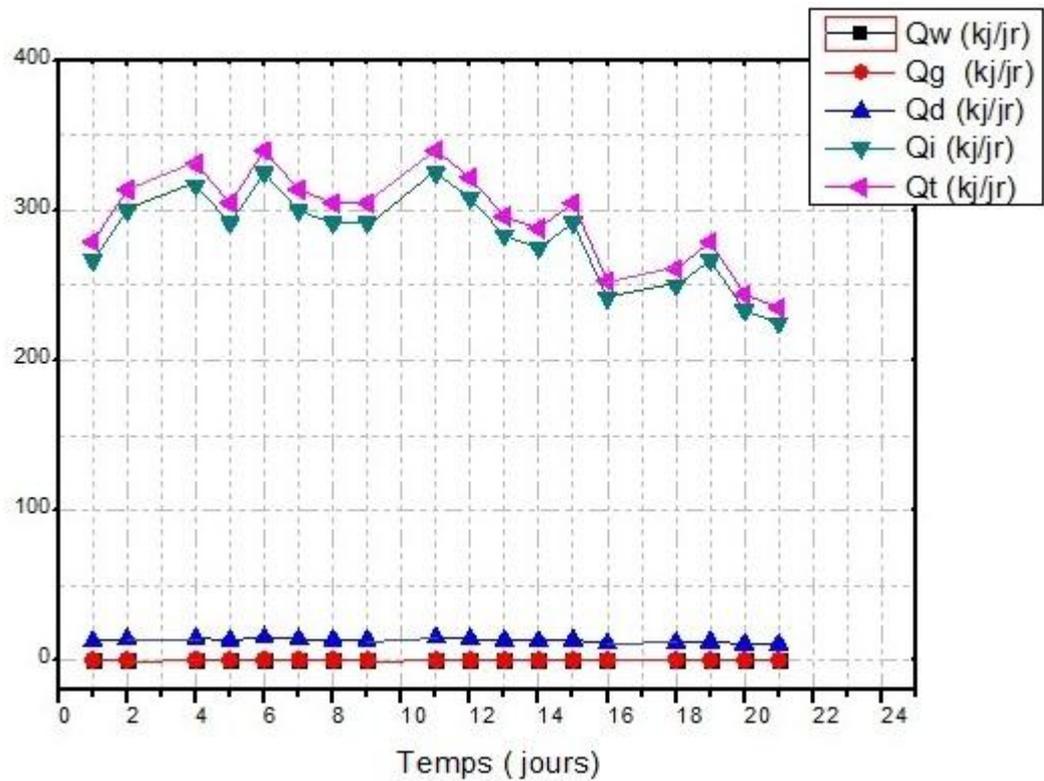


Figure25: quantité de chaleur totale consommée pour T=55C°

2.3 Influence de la température ambiante :

Les résultats ont montrés que les pertes d'énergie dans le prototype de digestion des boues d'épuration : les pertes par convection et par conduction dans le système sont décrites comme des formes d'énergie consommatrice. La différence de température ambiante et l'absence d'isolation thermique sont les causes de ces pertes empêchant le fonctionnement stable du prototype de production de biogaz.

Afin de limiter l'influence de la température ambiante, les matériaux du digesteur doivent être choisis de manière à améliorer l'isolation thermique comme le béton, polymère...

2.4 Valorisation énergétique du méthane produit

La valorisation énergétique du méthane produit dépend de plusieurs paramètres de fonctionnement : température ambiante, température du digesteur, le volume de biogaz, MOS (matière organique sèche), énergie nette.

Dans notre cas, la MOS a été estimée à 0.1kg/l sur la quantité prélevée après un prétraitement de concentration ; qui nous permet de choisir la température optimale pour étudier les transferts thermiques et le volume du biogaz produit, et d'obtenir le maximum de production nette d'énergie.

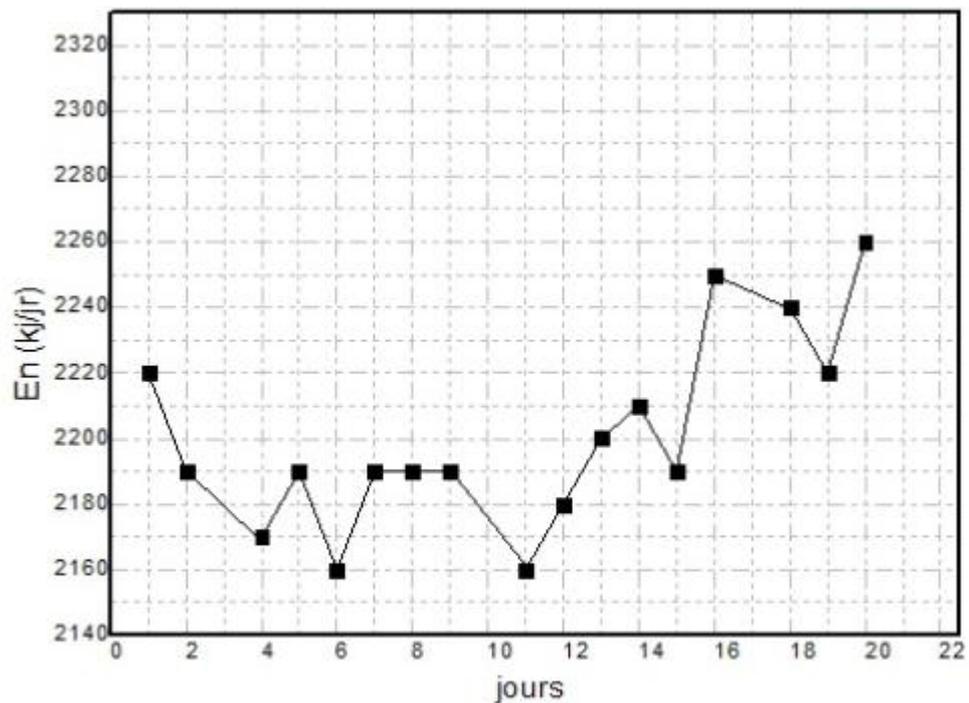


Figure 26 : quantité d'énergie nette produite à T = 35°C°

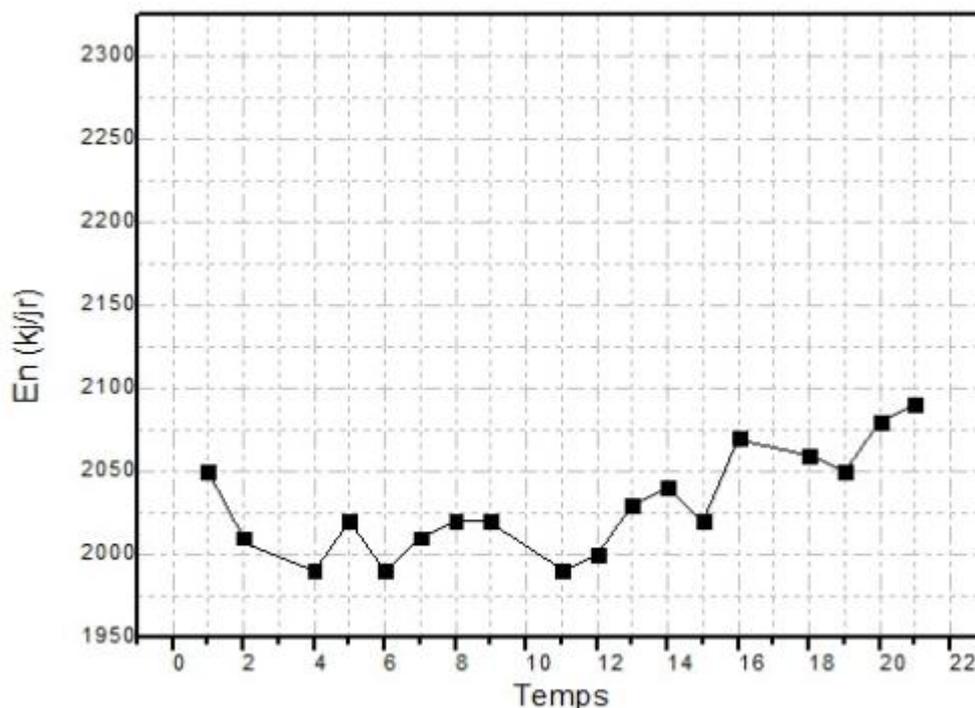


Figure 27 : quantité d'énergie nette produite à T = 55°C

Les résultats ont montrés que les valeurs de l'énergie nette produite augmentent avec l'augmentation de la température ambiante au-delà de 20°C. Une valeur maximale a été obtenue pour l'énergie nette de 2260 (kJ/jr) avec un volume de biogaz produit de 34ml/jr pour une température au niveau de digesteur de 35°C et une valeur maximale de 2180 kJ/jr et un volume de biogaz de 30ml/jr pour une température au niveau du digesteur de 55°C à partir du 20ème jour pour une température ambiante de 28°C. (Figure 26 – 27)

Il est à noter également que le volume de gaz produit influe sur l'énergie nette. Le volume de gaz déplacé est accompagné par une chaleur dégagée dues au mouvement des atomes du gaz et au phénomène de décomposition de la matière organique (Q_w et Q_g). La valeur de cette énergie est négligeable par rapport à l'énergie de chauffage fournie (Q_i) mais influe sur l'énergie nette produite. Plus le volume du biogaz produit augmente plus la valeur de l'énergie nette augmente.

Cependant l'énergie nette diminue lorsque le digesteur fonctionne à des températures ambiantes très basses de l'ordre de 16°C, ce qui implique que les transferts thermiques échangés avec le milieu extérieur augmentent et le biogaz produit dépendra de la quantité de matière organique introduite dans le digesteur et de la température du digesteur (35°C). A cette température, le processus de méthanisation se produit à vitesse lente s'accompagnant de la décomposition de la matière organique et la production d'un volume

de biogaz qui varie en fonction du temps. Ce qui implique que l'énergie nette varie avec le volume de biogaz produit, la température ambiante et l'énergie consommée.

A la température du digesteur de 55°C, le processus de méthanisation se produit à vitesse accélérée s'accompagnant par une décomposition de la matière organique ayant pour conséquence la production du biogaz à un temps réduit. Ce qui implique que l'énergie nette est réduite.

Selon les figures 26 et 27, pour une température au niveau du digesteur de 35°C, la valeur de l'énergie nette E_n pour une période de vingt jours varie dans un intervalle $2.16 \times 10^3 - 2.31 \times 10^3$ (kJ / j), tandis qu'à la température de 55°C cet intervalle est de $1.99 \times 10^3 - 2.30 \times 10^3$ (kJ/jr) ce qui montre l'influence de la température ambiante, l'énergie ou la chaleur dégagée par le volume produit dans l'intervalle de température considéré.

Le pouvoir calorifique PCI ou bien l'énergie donnée par le biogaz en combustion est calculable [53] pour le méthane produit cette valeur est de l'ordre de 2.3256×10^3 kJ lui permettant d'être utilisé comme source d'énergie même pour le prototype.

Afin de préserver la continuité de l'énergie nette, il est nécessaire d'introduire des modifications au fonctionnement du digesteur :

- Alimentation en continu de la matière organique manuellement pour avoir la disposition des microorganismes au sein du digesteur
- Isolation du système de prototype afin de minimiser les pertes d'énergie en choisissant des matériaux adéquats (polymères, verres traités...) pour remplacer le dispositif en verre simple.
- Procéder au remplacement de la source de chaleur par plaque chauffante électrique par une source de chaleur par gaz naturel ou par énergie solaire (panneau photo thermique)
- Valorisation par biomasse des autres types de déchets organiques comme les déchets agricoles, les ordures ménagères ou encore par la combinaison de plusieurs nuances de déchets où le processus de méthanisation serait différent et la composition de la matière organique serait plus riche.

3. Distribution de la température dans le digesteur :

Après avoir déterminé le bilan énergétique montrant les flux de chaleur thermique échangé entre le digesteur et le milieu environnant, on pourra donner par simulation numérique en utilisant le code de calcul Quick Field 6.0 une cinématique de la chaleur échangé.

On introduira les valeurs de températures ambiantes, les résultats obtenue dans le bilan énergétique, l'épaisseur du digesteur et du bain marie, les caractéristique des matériaux du prototype, les fluides (air, eau, eau mixée avec les boues).

On considéra pour la simulation numérique les valeurs obtenues pour le 5^{ème} jour avec la température du digesteur de 35°C et les valeurs du 7^{ème} jour avec la température du digesteur de 55°C où le volume du biogaz produit est maximum et inflammable.

Les résultats de la simulation numérique de la distribution de la température dans le digesteur sont donnés dans les figures 28 et 29

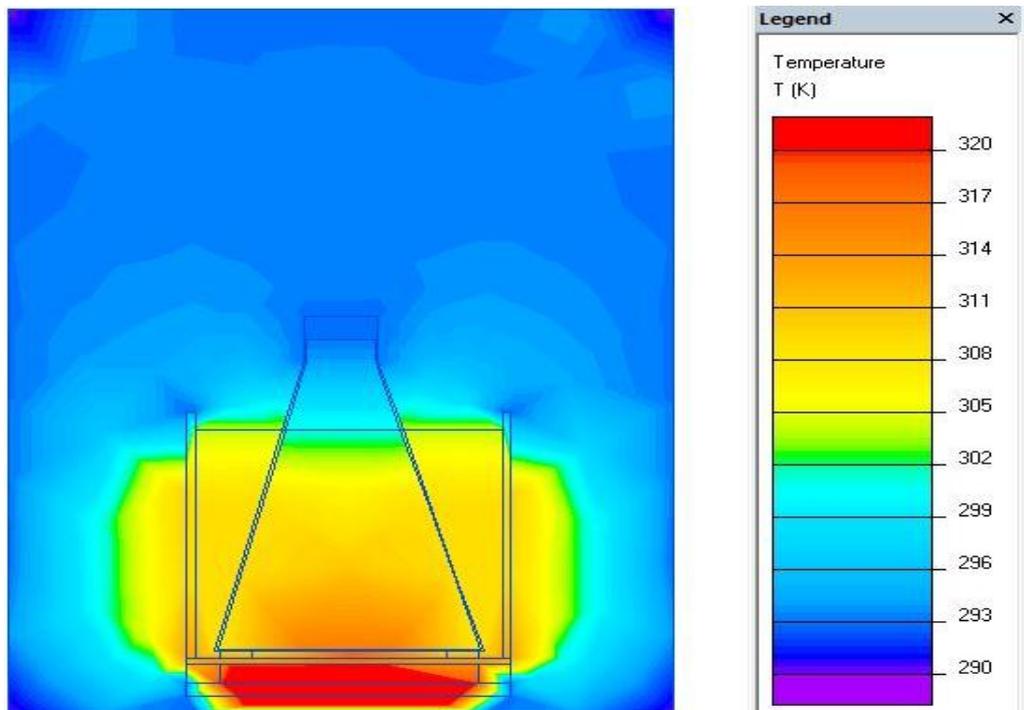


Figure 28 : distribution de la température dans le prototype de digesteur biomasse à la température de 35°C

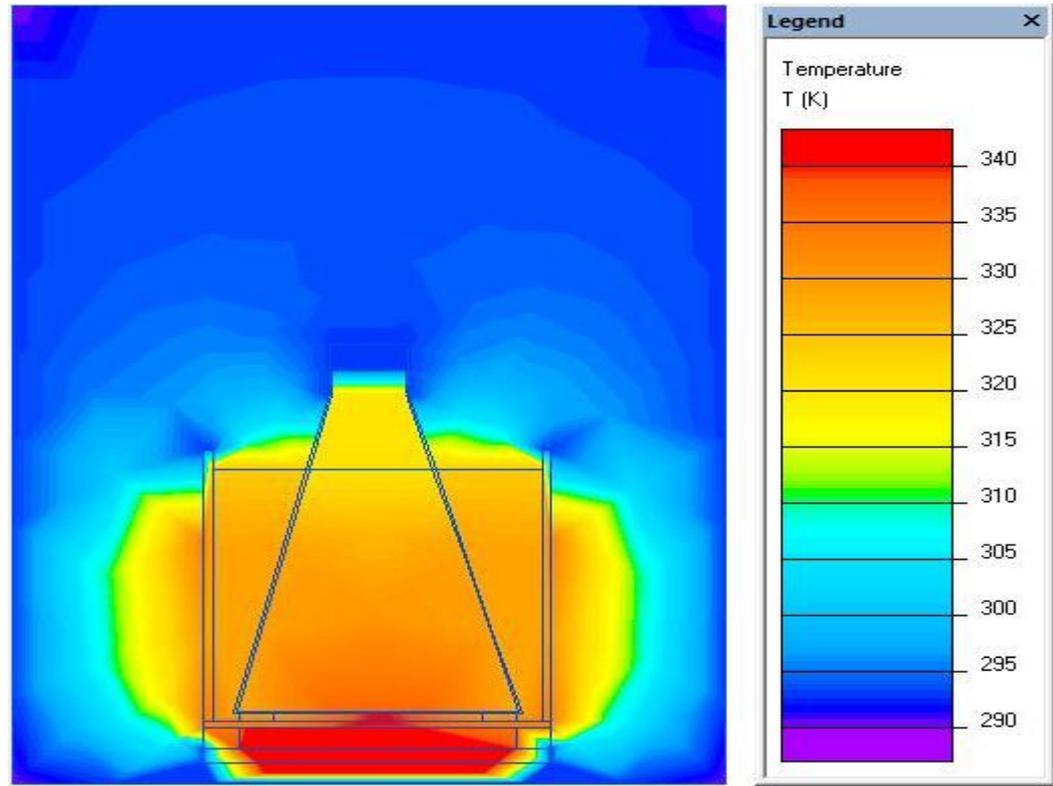


Figure 29 : distributions de la température dans le prototype de digesteur biomasse à la température de 55°C

Les résultats de la simulation numérique montrent que la distribution de la température au niveau du digesteur n'est pas uniforme pour l'intervalle de température considéré. La température maximale est concentrée à la source de chaleur et diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la source vers les parois et vers le milieu extérieur. Les pertes de chaleur sont plus importantes à la température de 55°C qu'à la température de 35°C où le gradient de température est plus important particulièrement lorsque la température ambiante est basse ce qui confirme nos résultats obtenus dans la simulation expérimentale.

Conclusion

Le volume du biogaz produit varie dans l'intervalle de température considéré et dépend de plusieurs facteurs :

- Température au niveau du digesteur où les résultats sont meilleurs à la température de 35°C qu'à la température de 55°C où le processus de méthanisation s'effectue à vitesse lente à cette température et l'activité microbiologique est intense
- Concentration en matière organique sèche où on a admis dans le prototype du digesteur une concentration de 0.1 Kg/l
- Dimensionnement du digesteur
- Temps d'immersion où les résultats ont montrés que plus le temps augmente plus le volume du biogaz produit augmente.

Les transferts thermiques dans le digesteur s'effectuent selon les modes : par convection avec l'air ambiant, l'eau du bain marie, l'eau mixée avec la boue au niveau du digesteur et le biogaz déplacé, par conduction au niveau des parois la terreux et par rayonnement au niveau de la source émettrice de chaleur ou résistance thermique (plaque chauffante électrique) qui assure le gradient de température ou la chaleur se distribue avec l'effet de la conduction sur sa surface

Ces modes expriment les différents échanges et les pertes calculées, Comme la chaleur nécessaire pour élever la suspension affluente à la température de digestion désirée, les pertes de chaleur par les murs du digesteur, les pertes de chaleur due à l'autoclave, la perte de chaleur par évaporation.

L'énergie fournie pour assurer une température constante au niveau du digesteur dépend des pertes de chaleurs avec le milieu extérieur. Les pertes de chaleur sont plus importantes à la température de 55°C qu'à la température de 35°C où le gradient de température est important particulièrement lorsque la température ambiante est basse.

Les résultats ont montrés que les valeurs de l'énergie nette produite augmentent avec l'augmentation de la température ambiante au-delà de 20°C. Une valeur maximale a été obtenue pour l'énergie nette de 2260(kJ/jr) avec un volume de biogaz produit de 34ml/jr pour une température au niveau de digesteur de 35°C et une valeur maximale de 2180 kJ/jr et un volume de biogaz de 30ml/jr pour une température au niveau du digesteur de 55°C à partir du 20ème jour pour une température ambiante de 28°C. Cependant l'énergie nette diminue lorsque le digesteur fonctionne à des températures ambiantes très basses de l'ordre de 16°C, ce qui implique que les transferts thermiques échangés avec le milieu extérieur augmentent et le biogaz produit dépendra de la quantité de matière organique introduite dans le digesteur et de la température du digesteur.

Les résultats ont montrés que la distribution de la température au niveau du digesteur n'est pas uniforme pour l'intervalle de température considéré. La température maximale est concentrée à la source de chaleur et diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la source vers les parois et vers le milieu extérieur. Les pertes de chaleur sont plus importantes à la température de 55°C qu'à la température de 35°C où le gradient de température est plus important ce qui confirme nos résultats obtenus dans la simulation expérimentale.

***Conclusion générale
et perspectives***

Conclusions et perspectives

L'étude a porté sur la conversion énergétique par biomasse et production du biogaz par processus de méthanisation anaérobie des boues d'épuration primaire refusés après traitement des eaux résiduaires urbaines produites dans le système d'épuration ONA Tlemcen. La méthanisation est une biodégradabilité et une valorisation basée sur l'activité des microorganismes (les bactéries) dans un milieu en absence d'oxygène à une température choisie dans l'intervalle de température 20°C - 70°C où l'activité bactérienne est active. La production du biogaz combustible a un pourcentage de méthane entre (50% – 70%)

Pour suivre cette conversion au laboratoire un prototype de digesteur a été réalisé au laboratoire de recherche LAEPO de l'université de Tlemcen. L'apport thermique a été réalisé par une source de chauffage par énergie électrique (plaque chauffante). Les essais ont été réalisés au laboratoire en considérant deux températures au niveau du digesteur $T=35^{\circ}$ et $T=55^{\circ}$ et qui ont été choisies pour avoir le maximum de la conversion et de l'activité bactérienne respectivement mésophiles et thermophiles en tenant compte de la variation des paramètres d'influence (température ambiante, temps d'immersion, concentration de la matière organique, matériaux de conception du digesteur).

Des mesures de volume du biogaz produit (méthane) ont été effectuées en utilisant la méthode des volumes déplacés qui ont été utilisés dans le calcul du bilan énergétique. La distribution de la température dans le prototype de digesteur a été déterminée en utilisant le code de calcul Quick Field.

Les résultats ont montrés que le volume du biogaz produit dépend des paramètres physico chimiques et la concentration de la matière organique initiale. La période de production dans le digesteur à une température de 35° pendant 20 jours, l'inflammabilité du gaz produit a été à partir du septième jour avec une production maximale de 40ml/jour ; tandis que avec la température de 55°C l'inflammabilité a été obtenue à partir du 4ème jour avec un volume maximale de 50 ml /jour. Ces résultats ont été obtenus en tenant compte de l'activité bactérienne qui est beaucoup plus intense à la température de 35°C qu'à la température de 55°C où le processus de méthanisation s'effectue à vitesse lente.

La concentration des boues en matières organiques influe sur la conversion méthanogène. Les résultats ont montrés que si la concentration est élevée la production du biogaz sera élevée.

Le temps d'immersion influe sur le processus de méthanisation. Plus le temps est prolongé, plus le volume varie et la matière organique sèche diminue.

Conclusions et perspectives

Le volume du biogaz produit varie dans l'intervalle de température considéré et dépend de plusieurs facteurs :

- Température au niveau du digesteur où les résultats sont meilleurs à la température de 35°C qu'à la température de 55°C où le processus de méthanisation s'effectue à vitesse lente à cette température et l'activité microbiologique est intense
- Concentration en matière organique sèche où on a admis dans le prototype du digesteur une concentration de 0.1 Kg/l
- Dimensionnement du digesteur
- Temps d'immersion où les résultats ont montrés que plus le temps augmente plus le volume du biogaz produit augmente.

Les calculs thermique sur le bilan énergétique comprenant : l'énergie consommée pour assurer la température de digestion des boues, les pertes de chaleur vers le milieu extérieur, l'énergie nette produite.

Une valeur maximale a été obtenue pour l'énergie nette de 2260(kJ/j) avec un volume de biogaz produit de 34ml/j pour une température au niveau de digesteur de 35°C et une valeur maximale de 2180 kJ/j et un volume de biogaz de 30ml/jr pour une température au niveau du digesteur de 55°C à partir du 20ème jour pour une température ambiante de 28°C. Cependant l'énergie nette a diminuée lorsque le digesteur fonctionne à des températures ambiantes très basses de l'ordre de 16°C, ce qui implique que les transferts thermiques échangés avec le milieu extérieur augmentent et le biogaz produit dépendra de la quantité de matière organique introduite dans le digesteur et de la température du digesteur.

Les résultats de la simulation numérique sous environnement Quick Field ont montrés que la distribution de la température au niveau du digesteur n'est pas uniforme pour l'intervalle de température considéré. La température maximale est concentrée à la source de chaleur et diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la source vers les parois et vers le milieu extérieur. Les pertes de chaleur sont plus importantes à la température de 55°C qu'à la température de 35°C où le gradient de température est plus important ce qui confirme nos résultats obtenus dans la simulation expérimentale.

Il est à noter que dans cette étude, on n'a pas tenu compte de l'isolation thermique du système de prototype de digestion des boues. En perspectives, des résultats meilleurs pourront être atteints en améliorant le système d'isolation par le choix de matériaux isolants en polymères, ou en verres isolant ou autres ayant une conductivité thermique faible pour remplacer le verre utilisé.

Concernant la concentration des boues où l'activité bactérienne en dépende une alimentation en continu pourra améliorer les résultats où le digesteur fonctionnera avec des

Conclusions et perspectives

vives. Pour augmenter le rendement en biogaz produit, un mélange de matières organiques est envisageable où la boue sera constituée de mélange de boues à des concentrations différentes ou des boues qui seront mixées avec d'autres types de déchets organiques comme les déchets agricoles, les ordures ménagères ou les déchets de l'industrie du bois et l'industrie papetière.

L'apport de chaleur pourra être obtenu en utilisant des sources de chaleur des énergies renouvelables comme l'énergie solaire (panneau solaire photothermique) pour remplacer la source de chaleur électrique (plaque chauffante) ou une chaleur qui sera obtenue par la combustion d'une partie du biogaz produit. La stabilité de la température au niveau de digesteur dans le cas où elle sera élevée par rapport à l'intervalle de température où l'activité bactérienne est intense ($\geq 70^{\circ}\text{C}$) pourra être obtenue en installant des échangeurs de chaleur à l'entrée du digesteur qui seront reliés à d'autres systèmes énergétiques.

Les résultats de la production du biogaz obtenus en laboratoire pourront être généralisés à grande échelle industrielle où la conception du digesteur sera étudiée. Des modèles de conception des digesteurs pourront être réalisés en choisissant des matériaux adéquats pour l'isolation thermique et des matériaux empêchant les interactions de corrosion avec le milieu extérieur environnant ou au contact des boues comme l'emploi des aciers inoxydables ou les polymères traités.

Pour augmenter l'isolation thermique, on pourra proposer un système de digesteur enfouis dans le sol à une distance de 4 à 5 m où la température d'après les données géothermiques est de 22°C en permanence dans le sol permettant de diminuer le gradient de température entre le milieu extérieur et la température de digesteur. L'apport thermique pourra être fourni par l'énergie géothermique comme les puits géothermiques ou par énergie solaire en installant des capteurs thermiques.

Références bibliographiques

- [1] Casimir TOGBE Etude cinétique de l'oxydation de constituants de biocarburants et composés modèles – Formation de THÈSE dirigée par polluants, Paris, 27 Octobre 2010.
- [2] la valorisation de biomasse (Mars 2007) Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par Hugues DE CHERISEY – Consultant agronome, Bordeaux Claude ROY – Coordinateur (Contrat N°0701C0007)
- [3] Biomasse – technologie PDF (technique d'ingénieure)
- [4] Biocarburants par Étienne POITRAT Ingénieur à l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) Direction de l'Agriculture et des Bioénergies
- [5] Kamal HADJ ALI Ingénieur IAP « Etude cinétique de l'oxydation et de l'auto inflammation en milieu gazeux homogène pauvre et ultra pauvre de carburants de substitution issus de la biomasse »2010.
- [6] D. Ballerini Les biocarburants: Etat des lieux, perspectives et enjeux du développement. Editions Technip, Paris, 2006.
- [7] SCHMITT. E et al. Converting lignocellulosic solid waste into ethanol for the State of Washington: An investigation of treatment technologies and environmental impacts. Bioresource Technology, 2012.
- [8] OGIER (J.-C.), BALLERINI (D.), LEUGUE (J.P.), RIGAL (L.)Et POURQUIÉ (J.). Production d'éthanol à partir de biomasse ligno-cellulosique. Oil & Gas Science And Technology. Revue De l'IFP,(1999).
- [9] FITZPATRICK (M.), CHAMPAGNE (P.), CUNNINGHAM (M.), WITHNEY (R.). – A Biorefinery processing perspective: Treatment Of lignocellulosic materials for the production of value-added products. Bioresource Technology, 2010.
- [10] TEYMOURI (F.), LAUREANO-PEREZ (L.), ALIZADEH (H.) Et DALE (B.E.). Optimization Of the ammonia fiber explosion (AFEX) Treatment parameters for enzymatic hydrolysis of corn stover. Bioresource Technology, déc. 2005.
- [11] Biocarburants de seconde génération et bioraffinerie François BROUST , CIRAD PERSYST, Philippe GIRARD , CIRAD. Kasetsart , CIRAD PERSYST, Unité Biomasse Énergie, Montpellier 2013
- [12] MOSIER (N.), WYMAN (C.), DALE (B.E.), ELANDER (R.), LEE (Y.Y.), HOLTZAPPLE (M.) et LADISCH (M.). – Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. Bioresource Technology, avr. 2005.

Références bibliographiques

- [13] CHUM (H.L.), DOUGLAS (L.J.), FEINBERG (D.A.) et SCHROEDER (H.A.). Evaluation of the Pretreatment of Biomass for Enzymatic Hydrolysis of Cellulose. Rapport technique NREL/TP-231-2183, Golden (1985).
- [14] LEE (J.) Biological conversion of lignocellulosic Biomass to ethanol. J.Biotechnol, (1997).
- [15] MIELENZ (J.R.).Ethanol production from biomass: technology and commercialization status. Curr. Op. Mircobiol., 4, p. 324-329 (2001).
- [16] HASUNUMAA (H.), et al. A review of enzymes and microbes for lignocellulosic biorefinery and the possibility of their application to consolidated bioprocessing technology. Bioresource Technology, 2012.
- [17] HAMELINCK (C.N.). Outlook for advanced biofuels. (2004).
- [18] SUN (Y.) et CHENG (J.). – Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production a review. Biore source Technology,(2002).
- [19] LOISON (R.). Gazéification du charbon [J5410], Archives, Techniques de l'Ingénieur (1986).
- [20] MILNE (T.), EVANS (R.) et ABATZOGLOU (N.). Biomass gasifier “tars”: their nature, Formation, and conversion.
- [21] KNOEF (H.). – Handbook Biomass Gasification. BTG biomass technology group BV, The Netherland (2005).
- [22] MATSUMURA (Y.), et al. – Biomass gasification in near- and super-critical water: Status and prospects. Biomass and Bioenergy, October 2005.
- [23] D. GAYA, production de Biométhane 3^{ème} génération, le 25 octobre 2013.
- [24] João Alberto Lima Amarante, biomethanisation des déchets putrescibles minicipaux technologies disponibles et enjeux pour le QUÉBEC, Canada, 2010
- [25] Anaerobical Digestion (s.d.). Municipal Solid Waste (MSW) Biogas Potential in China. In Anaerobic Digestion, Mars 2010).
- [26] René MOLETTA Méthanisation de la biomasse 10/05/2008 .
- [27] Julien BOLLON Etude des mécanismes physiques et de leur influence sur la cinétique de méthanisation en voie sèche : essais expérimentaux et modélisation, Lyon, 2013.
- [28] Anthony Boulanger, Préparation d'un déchet ménager pour l'optimisation du potentiel et de la cinétique méthanogène, Paris, 23 février 2011
- [29] Orphan, House et al. 2001; Michaelis, Seifert et al. 2002; Nauhaus, Boetius et al. 2002; Girguis, Orphan et al. 2003; Knittel, Losekann et al. 2005.
- [30] Hattori, Kamagata et al. 2000; Nusslein, Chin et al. 2001.
- [31] Clancy, Venkataraman et al. 1992; Uberoi and Bhattacharya 1995; Maillacheruvu and Parkin 1996.

Références bibliographiques

- [32] Orphan, V. J., C. H. House, et al. (2001). "Methane-consuming archaea revealed by directly coupled isotopic and phylogenetic analysis."
- [33] Caractérisation des eaux usées DFE/CNFME/L:\utilisat\JP\F07\DOCPDA~1\Caractérisation des EU.doc\05/04/2005
- [34] caractérisation des eaux (Garnier. 2003)
- [35] caractérisation des eaux (Thomas.1995 ; Bouziani., 2000).
- [36] caractérisation des eaux (Coin, 1981)
- [37] caractérisation des eaux (Cardot, 1999)
- [38] Les prétraitements.doc\05/04/2005 (Desjardins, 2007)
- [39] Les prétraitements (www.veoliaeaust.com, 2008)
- [40] www.senat.fr, 2006
- [41] prétraitement (Murat, 1981)
- [42] les Normes NFEN 872 d'avril 1996 et NFT 90 105 - 2 de janvier 1997
- [43] détermination des matières en suspension, (avril 1996)
- [44] DFE/CNFME/L:\utilisat\JP\F07\DOCPDA~1\Traitement par boues activées RP F7.doc\05/04/2005 NF EN 1899 de mai 1998 et NF EN ISO 9408 d'octobre 1999.
- [45] Norme NFT 90-101 de février 2001 par Office International de l'Eau
- [26] René MOLETTA Méthanisation de la biomasse 10/05/2008
- [46] Phénomènes de transfert de chaleur et de masse ; Prof. H. Hofmann Laboratoire de Technologie des Poudres EPFL / IMX
- [47] Notions de transfert thermique par convection ; Jacques HUETZ Directeur de Recherche au Centre National de la Recherche Scientifique et Jean-Pierre Maître de Conférences à l'École Centrale des Arts et Manufactures
- [48] Thermal modeling of the completely stirred anaerobic reactor treating pig manure at low range of mesophilic conditions
- [49] sit
- [50] QuickField Finite Element Analysis System Version 5.1 User's Guide
- [51] **tableaux des données thermique sit**
- [52] Ashare et al. (1978) ont examiné en détail le calcul de Qg.
- [53] T.chaslerie (techniques de bioconversion : la biométhanisation), rapport technique, institut universitaire de technologie 2002.