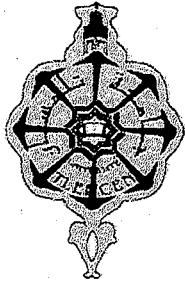


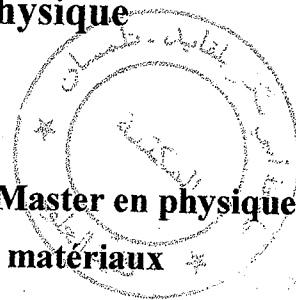
MS/531.6-42/02

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Université Tlemcen Aboubekr Belkaid  
Faculté des Sciences  
Département de physique



Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de Master en physique  
Option : Energétique et matériaux



*Thème*

---

# Traitement des Déchets : Production du Biométhane

---

**Présenté par :** Mr. SERIR Khalid

**Soutenu le 30 juin 2013 devant la commission d'examen**

<b>Président :</b>	Pr. A. CHERMITTI	M.C.A Université de Tlemcen
<b>Encadreur :</b>	Dr. D. KHERBOUCHE	M.C. école préparatoire de technologie Université de Tlemcen
<b>Examineurs:</b>	Dr. C. ZIDANI	M.C. Université de Tlemcen
	M <sup>me</sup> I. CHIKH-BLED	M.C. Université de Tlemcen

**Année Universitaire 2012/2013**

# REMERCIEMENTS

20 MAI 2014

8304



*J'exprime mes gratitude, mes reconnaissances et mes sincères remerciements à Madame Dr. D. KHERBOUCHE M.C. école préparatoire de technologie à l'Université de Tlemcen pour m'avoir encadré tout le long de mon projet. La patience, le soutien et le temps trop précieux m'ayant été accordé, s'est avéré concluant, et m'a été finalement d'un grand apport.*

*Il y'a lieu de remercier également madame C.ZIDANI et I.CHIKH-BLED des mètres de conférences à l'Université de Tlemcen pour avoir examiné ce mémoire.*

*Toutes mes considérations à mes dignes et respectables Professeurs qui méritent autant d'égard, pour m'avoir donné le meilleur d'eux-mêmes afin d'arriver à ce stade du savoir.*

*Merci à mes parents et mes frères et ma sœur.*

Bibliothèquesciences



BFST8304

# Sommaire

Introduction Générale.....	1
<i>Chapitre I Les Energies Renouvelables</i>	
Introduction .....	4
I. Contexte énergétique mondial ; demande énergétique mondiale.....	5
II. Les énergies non-renouvelables .....	8
III. Les énergies renouvelables.....	9
<b>1. L'énergie solaire</b> .....	<b>10</b>
<b>1. L'énergie éolienne</b> .....	<b>12</b>
<b>2. L'énergie hydraulique</b> .....	<b>14</b>
<b>3. La géothermie</b> .....	<b>15</b>
<b>4. La biomasse</b> .....	<b>16</b>
Conclusion.....	17
Bibliographie.....	18
<i>Chapitre II La biomasse</i>	
Introduction.....	21
I. Définition.....	22
II. Caractéristique de la biomasse .....	22
III. Valorisation énergétique de la biomasse .....	24
III.1 Les conversions biochimiques .....	24
<b>III.2 Les conversions thermochimiques</b> .....	<b>27</b>
<b>III.2.1 La combustion directe</b> .....	<b>27</b>
✓ La combustion directe .....	28
✓ Les étapes de combustion .....	28
✓ Les émissions de polluants atmosphériques liés à la combustion.....	29
<b>III.2.2 La pyrolyse</b> .....	<b>30</b>
<b>III.2.3 La gazéification</b> .....	<b>33</b>
<b>a. Objectifs</b> .....	<b>33</b>
<b>b. Les principales réactions chimiques de la gazéification</b> .....	<b>33</b>

<b>c. Le traitement des gaz</b> .....	<b>36</b>
<b>d. Les applications de la gazéification</b> .....	<b>38</b>
✓ La combustion directe.....	38
✓ La combustion dans les moteurs.....	38
• Les turbines à gaz .....	38
• Les piles à combustible.....	38
<b>e. Avantages de la gazéification</b> .....	<b>39</b>
Conclusion.....	40
Bibliographie.....	41
<i>Chapitre III La production du biogaz à partir de la biométhanisation</i>	
Introduction.....	43
<b>I. Mécanisme de la digestion anaérobie</b> .....	<b>44</b>
<b>a) L'hydrolyse</b> .....	<b>44</b>
<b>b) L'acidogénèse</b> .....	<b>45</b>
<b>c) L'acétogénèse</b> .....	<b>45</b>
<b>d) La méthanogénèse</b> .....	<b>45</b>
<b>II. Les facteurs influençant la digestion anaérobie</b> .....	<b>47</b>
• <b>La température</b> .....	<b>47</b>
▪ <b>Le pH</b> 48	
▪ <b>Nature du substrat</b> .....	<b>49</b>
▪ <b>Métaux lourds</b> .....	<b>49</b>
▪ <b>Les substances inhibitrices</b> .....	<b>49</b>
<b>III. Les différents types de digesteurs</b> .....	<b>49</b>
<b>a. le procédé Batch</b> .....	<b>50</b>
<b>b. Le système continu infiniment mélangé</b> .....	<b>50</b>
<b>IV. Produits issus de biométhanisation</b> :.....	<b>51</b>
<b>1) digestat</b> : .....	<b>51</b>
<b>2) Biogaz</b> 51	

V. Biogaz.....	52
1) Définition.....	52
2) Composition.....	52
3) Valorisation énergétique.....	53
4) Utilisations et avantages.....	54
Conclusion.....	55
Bibliographie.....	56
<i>Chapitre IV Purification du biogaz produit obtenu à partir de la méthanisation</i>	
Introduction.....	101
I. Matériels et Méthodes de purification.....	102
I.1. Matériel utilisé.....	102
I.2. Méthode utilisé.....	103
II. Conditions opératoires lors de l'analyse des échantillons.....	103
III. Résultats et discussions.....	103
III.1. Détermination du % molaire a partir des chromatogramme.....	103
<b>III.2. Résultats expérimentaux.....</b>	<b>104</b>
➤ NaOH : 105	
Témoin.....	105
Concentration du NaOH.....	107
➤ Pour L'eau :.....	108
➤ Pour L'acétone :.....	110
➤ Pour lait de chaux :.....	111
Concentration du lait de chaux.....	113
➤ Pour KOH.....	113
Concentration du KOH(potasse).....	116
IV. Discussions et interprétations des résultats.....	116
Conclusion.....	117
Bibliographie.....	118
Conclusion Générale.....	122

## La liste des figures

Figure I. 1 : Production d'électricité par habitant et par région du monde en 2007 (en kWh par habitant).....	6
Figure I. 2: Part de chaque énergie dans la production d'énergie primaire renouvelable en UE (2008).....	7
Figure I. 3 : Production annuelle nette d'électricité dans le monde.....	7
Figure I. 4 : Production annuelle nette d'électricité par des énergies renouvelables dans le monde[2] .....	8
Figure I. 5: Les énergies renouvelables [5].....	9
Figure I. 6: Les énergies renouvelables[6].....	10
Figure I. 7: L'énergie solaire.....	11
Figure I. 8: L'énergie éolienne.....	13
Figure I. 9 : L'énergie hydraulique .....	14
Figure I. 10: La géothermie.....	16
Figure I. 11 : La biomasse.....	16
Figure II. 1 : Modèles de prédiction du pouvoir calorifique supérieur de ces cultures ont été construits à partir des PCS individuels de chaque constituant.....	23
Figure II. 2 :Le procédé de la fermentation alcoolique[7] .....	26
Figure II. 3 : Produits issus de la pyrolyse de biomasse et leurs utilisations. ....	31
Figure II. 4: Principales réactions intervenant dans la gazéification.....	36
Figure III. 1: Représentation schématique des différentes étapes de la digestion anaérobie de composés organiques (B = bactéries) (Paing, 2001). ....	46
Figure III. 2 : Intensité de la fermentation en fonction de la température [7].....	48
Figure III. 3 : Production de gaz en fonction de la température .[7].....	48
Figure III. 4: Diagramme du procédé Batch [9].....	50
Figure III. 5 : diagramme du système continu infiniment mélangé[9].....	51
Figure III. 6 : les voies potentielles de valorisation du biogaz.....	54
Figure IV. 1: dispositif expérimental de l'épuration [1] .....	102
Figure IV. 2 : Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec le NaOH d'une concentration de 1mol/l à 4mol/l.....	107

Figure IV. 3 : Taux d'élimination du CO <sub>2</sub> dans le biogaz suivant les différents concentrations : cas du NaOH .....	108
Figure IV. 4 : Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec l'eau d'une concentration de 2mol/l. ....	109
Figure IV. 5 : Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec l'acétone d'une concentration de 2mol/l. ....	110
Figure IV. 6 : Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec le lait de chaux d'une concentration de 1mol/l à 3mol/l. ....	112
Figure IV. 7 : Taux d'élimination du CO <sub>2</sub> dans le biogaz suivant les différentes concentrations : cas du lait de chaux .....	113
Figure IV. 8: Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec le KOH d'une concentration de 1mol/l à 3mol/l. ....	115
Figure V. 9 : Taux d'élimination du CO <sub>2</sub> dans le biogaz suivant les différentes concentrations: cas du KOH.....	116
Figure IV. 10 : Evolution de % de CO <sub>2</sub> dans le biogaz en fonction du nombre de passages dans les trois solutions (lait de chaux, NaOH, KOH): de même concentration (3mol/l). .	119

## la liste des tableaux

Tableau II. 1 : composition élémentaire.....	23
Tableau II. 2: Tableau récapitulatif des conditions opératoires des différentes transformations thermochimiques.....	27
Tableau II. 3: Emissions de CO, NO <sub>2</sub> et SO <sub>2</sub> lors de production de chaleur en kg/TJ (ou mg/MJ).....	29
Tableau II. 4 : Différents types de pyrolyse.....	30
Tableau II. 5 : Principaux types d'oxydants.....	34
Tableau II. 6: Qualité des gaz nécessaires pour la production d'électricité et la synthèse de méthanol ... (n.l. = non limité).....	37
Tableau II. 7: taux de réduction des différents systèmes d'épuration des gaz.....	38
Tableau III. 1: Composition du biogaz.....	53
Tableau IV. 1: Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec le NaOH d'une concentration de 1mol/.....	105
Tableau IV. 2: Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec le NaOH d'une concentration de 2mol/l.....	105
Tableau IV. 3: Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec le NaOH d'une concentration de 3mol/l.....	106
Tableau IV. 4: Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec le NaOH d'une concentration de 4mol/l.....	106
Tableau IV. 5 : Tableau récapitulatif de résultats (NaOH).....	107
Tableau IV. 6 : Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec l'eau d'une concentration de 2mol/l.....	109
Tableau IV. 7: Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec l'acétone d'une concentration de 2mol/l.....	110
Tableau IV. 8: Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec lait de chaux d'une concentration de 1mol/l.....	111
Tableau IV. 9: Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec lait de chaux d'une concentration de 2mol/l.....	111



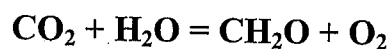
Tableau IV. 10: Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec lait de chaux d'une concentration de 3mol/l.....	112
Tableau IV. 11 : Tableau récapitulatif de résultats (lait de chaux).....	113
Tableau IV. 12: Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec le KOH d'une concentration de 1mol/l.....	114
Tableau IV. 13: Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec le KOH d'une concentration de 2mol/l.....	114
Tableau IV. 14: Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec le KOH d'une concentration de 3mol/l.....	115
Tableau IV. 15 : Tableau récapitulatif de résultats (KOH).....	116
Tableau IV. 16: Le % du CO <sub>2</sub> dans le biogaz en fonction dans les 3 expériences dans les trois solutions (lait de chaux, NaOH, KOH): de même concentration (3mol/l).....	118

## ***Introduction Générale***

---

La biomasse est l'ensemble des déchets industriels, agricoles et matière végétale dérivée de la photosynthèse, réaction entre le CO<sub>2</sub> dans l'air, l'eau et la lumière du soleil; qui est la source de toute les énergies sur terre que se soit fossile ou renouvelable.

La photosynthèse réalise la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique selon la formule simplifiée:



- Dans le premier chapitre nous décrivons le soleil et nous porterons un très grand intérêt aux énergies renouvelables car ils ont des enjeux environnementaux et économiques.

Nous citons les propriétés et les différents types de biomasse qui es divisé essentiellement en deux division : c'est biomasse sèche et humide ; chaque division sera orienté vers un mode de conversion précis. La biomasse sèche sera dirigée vers les conversions thermochimiques et la biomasse humide vers les conversions biochimiques.

Ces modes de conversions seront présentés dans deux chapitres:

- Dans le deuxième chapitre nous nous intéressons aux conversions thermochimiques de la biomasse: combustion, pyrolyse et gazéification. Ils sont des modes de dégradation de la matière sèche sous l'effet de la température. Nous étudions seulement la pyrolyse et la gazéification.

La pyrolyse se déroule en absence total d'oxygène, le matériau initial est ainsi décomposé en une fraction solide, en liquide et en gaz. La gazéification consiste à décomposer en présence d'un gaz réactif (air,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ , etc...) le matériau initial pour obtenir des produits gazeux. A la différence de la pyrolyse, la gazéification du bois met enjeu des réactions d'oxydation partielle du matériau initial. Les produits gazeux obtenus sont principalement composés de  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  et  $CH_4$ . Les températures de gazéification sont supérieures à  $800^\circ C$  et peuvent atteindre plus de  $1300^\circ C$  en fonction du solide utilisé et du procédé employé.

- Dans le troisième chapitre nous nous intéressons La production du biogaz à partir de la biométhanisation. Mais elles peuvent être contrôlées de façon à obtenir un combustible facilement exploitable. Deux filières de conversion biochimique de la biomasse sont particulièrement intéressantes:

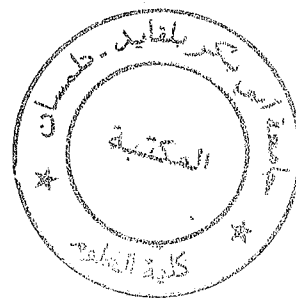
La fermentation alcoolique qui utilise des levures pour dégrader la matière organique par voie aérobie. Et la biométhanisation qui consiste à la biodégradation de matières organiques en absence d'air, sous l'action des bactéries, conduisant à la production d'un gaz, le biogaz.

Nous nous intéressons surtout à la méthanisation parce que nous constatons qu'elle a beaucoup plus d'avantages que la fermentation alcoolique et aussi elle ne nécessite pas des produits chimiques au cours de la dégradation.

- Dans le quatrième chapitre ~~Dans le cinquième chapitre~~ après avoir produit le biogaz à partir de la méthanisation de la biomasse au CDER ; nous purifions ce gaz avec différents solution (lait de chaux;  $NaOH$ ;  $KOH$ ; l'eau et l'acétone) pour l'absorption du  $CO_2$  dans le biogaz produit; afin de comparer entre elles, et de choisir la solution la plus efficace pour une absorption meilleur

→ (Centre de d.v. des engins renouvelés)

Donc notre but c'est essayer de diminuer le pourcentage du CO<sub>2</sub> dans le biogaz pour obtenir un gaz le plus riche possible en méthane.



*Chapitre I*

---

---

## *Les Energies Renouvelables*

### Introduction

---

L'énergie est l'un des moteurs du développement des sociétés, la civilisation industrielle s'est bâtie autour de l'exploitation de charbon à la fin du XIXème siècle, puis du pétrole et le gaz et le nucléaire au milieu du XXème siècle, alors que les menaces sur le climat sont pour une grande part dues à leur utilisation et que la consommation d'énergie ne cesse d'augmenter. Les énergies renouvelables apparaissent dans ce contexte une alternative intéressante pour préserver à la fois le confort des êtres humains et la qualité de l'air[1].

Depuis passablement d'années, de plus en plus de pays cherchent des solutions pour limiter leur dépendance par rapport aux énergies fossiles, lesquelles, selon leur utilisation très intensive actuelle, sont estimées ne durer plus qu'environ 100 ans. Ces réserves d'énergies fossiles ne sont pas seulement épuisables rapidement mais elles sont aussi de plus en plus difficiles d'accès et engendreront des coûts d'exploitation de plus en plus

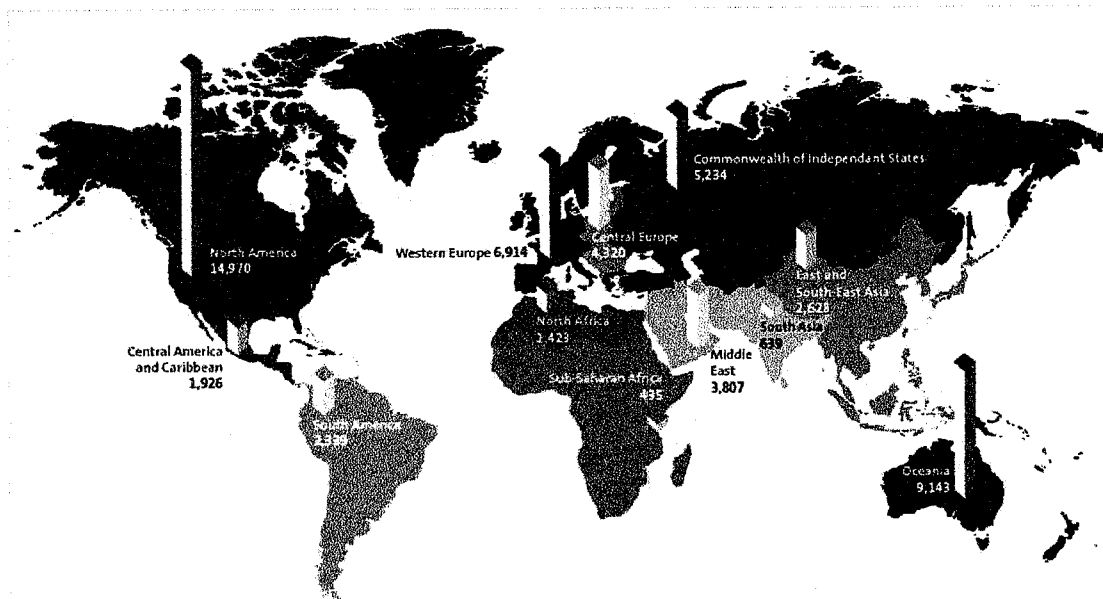
élevés ; par conséquent, leur prix augmentera fortement ces prochaines années[2]. Cette situation a incité au développement d'autres sources d'énergies, renouvelables, pour produire de l'électricité ou pour chauffer de l'eau.

Le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux sont autant de ressources naturelles capables de générer de l'énergie grâce aux technologies développées par les hommes. Ces sources d'énergies renouvelables permettent d'obtenir, après transformation[3], de l'énergie mécanique, de l'électricité et de la chaleur ou un combustible. Couplées à une utilisation rationnelle de l'énergie, elles permettent de réduire la consommation de combustibles d'origine fossile ou fissile, et par conséquent de réduire les impacts environnementaux et socio-économiques de nos besoins en énergie.

Les énergies renouvelables regroupent un grand nombre de systèmes différents selon la ressource valorisée et la forme d'énergie obtenue. Ces dernières années, les évolutions observées concernent aussi bien l'amélioration des rendements de transformation et la diminution du prix de revient de l'énergie utile produite que la qualité du service énergétique et un confort accru à l'exploitation.

## **I. Contexte énergétique mondial ; demande énergétique mondiale**

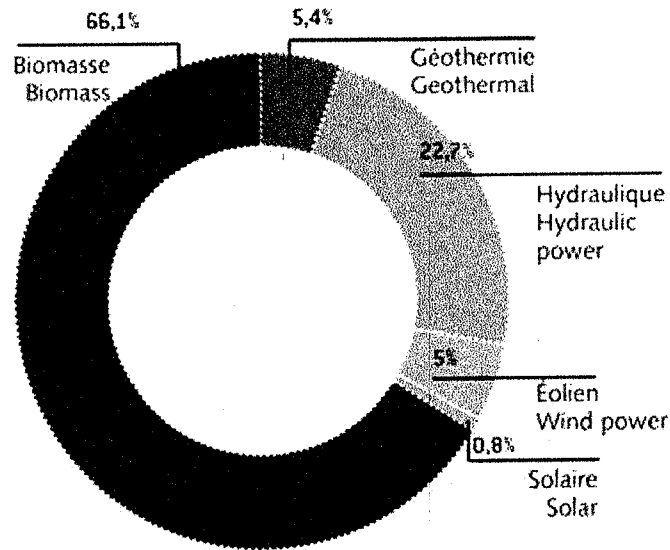
L'électricité est devenue indispensable pour le développement économique dans le monde, mais reste cependant très inégale au niveau de la planète (Fig). Les pays industrialisés ont besoin de plus en plus d'énergie au fur et à mesure que des avancées technologiques ont lieu. Mais l'augmentation de leur demande reste faible vis à vis des pays émergents, ainsi l'Amérique du Nord avec une consommation qui atteint 15 000 kWh/hab possède la croissance la plus faible de l'ordre de 0,6% alors que des régions comme l'Afrique du Nord ou encore l'Asie atteignent 5 voire 6%.[4]



**Figure I. 1 :** Production d'électricité par habitant et par région du monde en 2007 (en kWh par habitant).

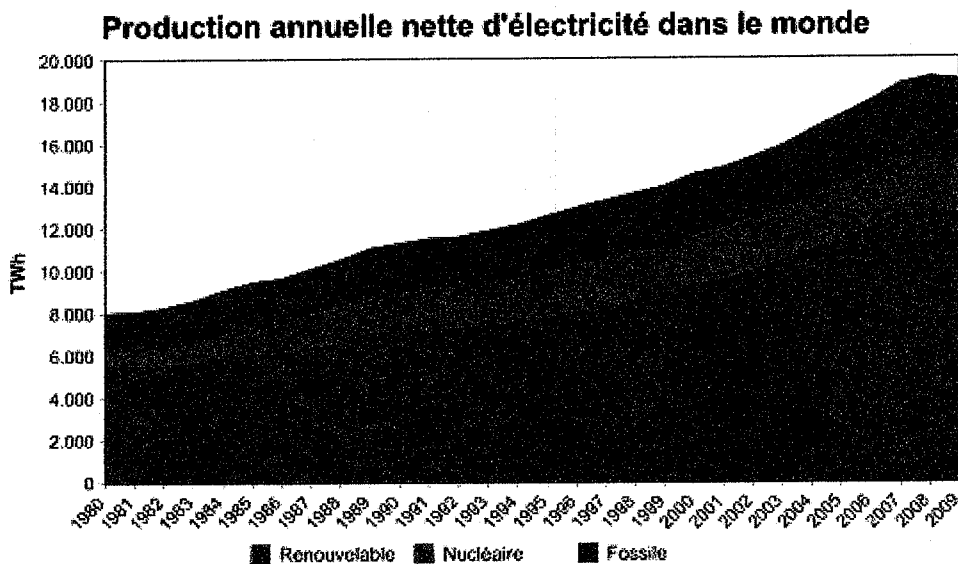
En parallèle, on observe que la diminution de la consommation d'énergie polluante qui produit une quantité considérable de gaz à effet de serre est devenue un enjeu politique majeur depuis ces dernières décennies. Les investissements portent ainsi sur des énergies où l'impact environnemental est plus faible. Actuellement, la place des énergies renouvelables gagne du terrain avec une augmentation de 6,2% par an contre 1,5% pour les énergies fossiles et fossiles.

Ces différentes énergies sont encore inégalement réparties (Fig. ) mais les investissements ne sont pas les mêmes suivant le secteur d'activité. Ainsi les secteurs de l'hydraulique et de la géothermie ne montrent pas d'évolution (environ 1-2%) de la production énergétique depuis la fin des années 90, alors que d'autres secteurs comme la biomasse, l'éolien et le solaire voient leur production énergétique évoluer de 12 à plus de 40% par an.



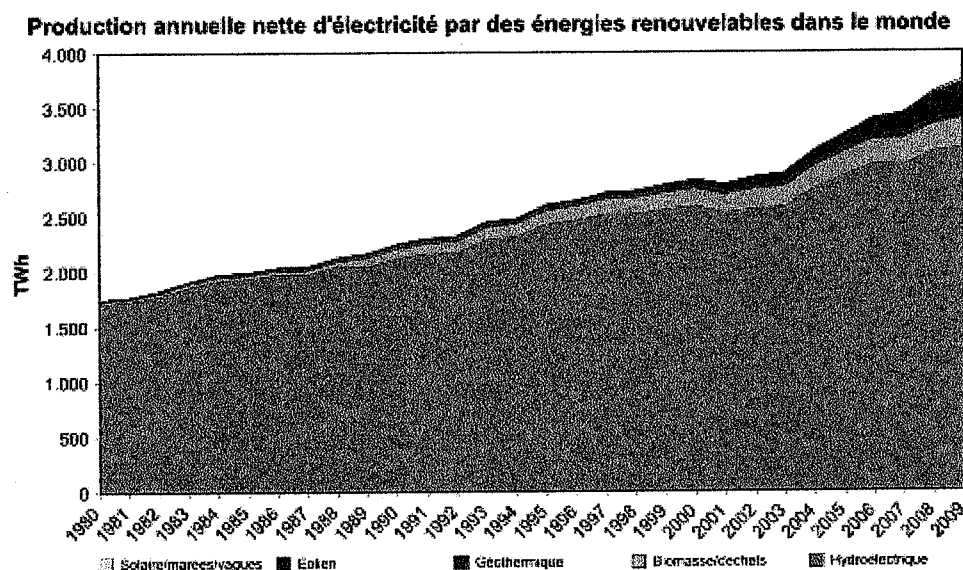
**Figure I. 2:** Part de chaque énergie dans la production d'énergie primaire renouvelable en UE (2008).

Pour rattraper le retard pris par rapport aux objectifs de Rio de Janeiro et Kyoto, l'ONU a proposé en 2011 un nouvel objectif pour que 30 % de l'énergie utilisée en 2030 soit produite grâce à des énergies renouvelables comme les éoliennes<sup>3</sup>.



**Figure I. 3 :** Production annuelle nette d'électricité dans le monde [reference]





**Figure I. 4 :** Production annuelle nette d'électricité par des énergies renouvelables dans le monde[2]

## II. Les énergies non-renouvelables

Les énergies non-renouvelables sont des énergies épuisables à l'échelle de l'homme, c'est-à-dire qui ne se renouvellent pas assez rapidement voire pas du tout.

Les sources d'énergie non-renouvelables découlent principalement des hydrocarbures, c'est-à-dire le gaz naturel, les huiles ou le pétrole.

Les énergies non-renouvelables peuvent être classées en deux catégories :

- d'un côté, les énergies dites fossiles, qui proviennent principalement du charbon, du mazout, du gaz naturel et du pétrole. Ces énergies fossiles sont dites non-renouvelables car elles ont une vitesse de régénération très lente. De plus, la consommation intensive actuelle de ces énergies pourrait en provoquer l'épuisement définitif à moyen terme.

- de l'autre coté, les énergies nucléaires, qui sont non-renouvelables car la matière première en est l'uranium. Or, les gisements de ce dernier sont limités.

### III. Les énergies renouvelables



**Figure I. 5:** Les énergies renouvelables [5]

Par opposition aux énergies fossiles et fissiles qui sont des énergies de stock, les énergies renouvelables sont des énergies de flux : elles se régénèrent en permanence au rythme du soleil et de ses dérivés (le vent, les cours d'eau, les vagues, les courants marins, la chaleur naturelle et la croissance de la biomasse), ainsi que des marées et de la chaleur naturelle de la terre.

Les énergies renouvelables regroupent un grand nombre de systèmes différents, selon la source d'énergie valorisée et la forme d'énergie obtenue. Les principales filières d'énergies renouvelables présentes en Belgique sont reprises dans la liste ci-après.

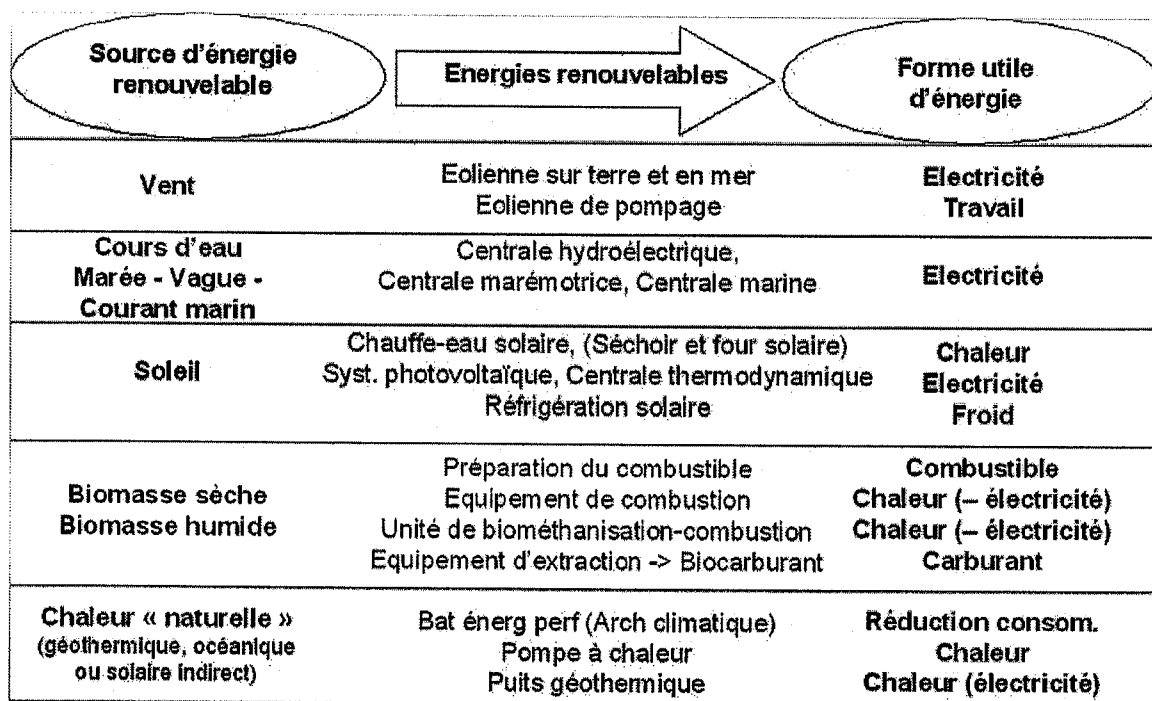


Figure I. 6: Les énergies renouvelables[6]

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement.

Cependant, le caractère aléatoire des sources impose des règles particulières de dimensionnement et d'exploitation des systèmes de récupération d'énergie.

### 1. L'énergie solaire

Le soleil est la principale source des différentes formes d'énergies renouvelables disponibles sur terre. L'énergie solaire a directement pour origine l'activité du Soleil. Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique dans lequel on trouve notamment les rayons cosmiques, gamma, X, la lumière visible, l'infrarouge, les micro-ondes et les

ondes radios en fonction de la fréquence d'émission. Tous ces types de rayonnement électromagnétique émettent de l'énergie[7].

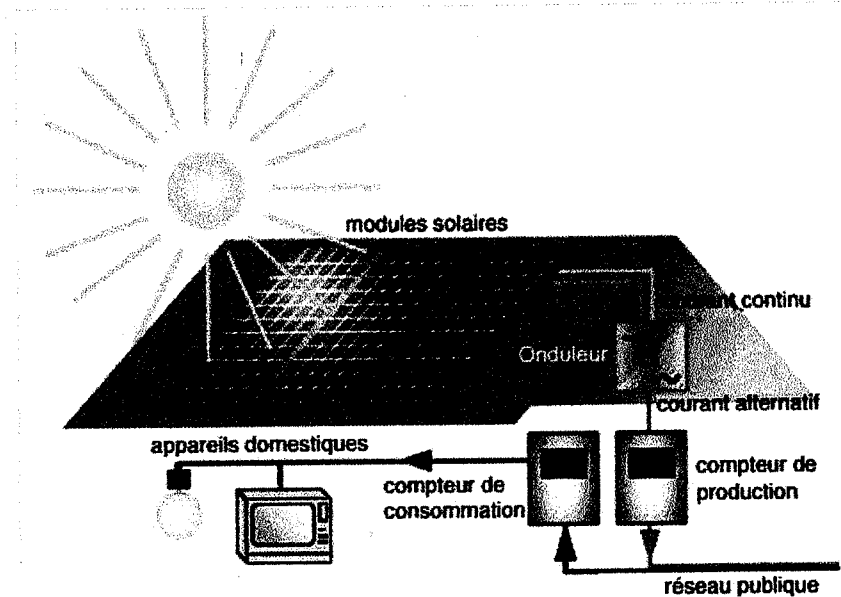


Figure I. 7: L'énergie solaire

Un panneau solaire est un dispositif destiné à récupérer une partie de l'énergie du rayonnement solaire pour la convertir en une forme d'énergie utilisable par l'homme.

On distingue deux types de panneaux solaires : les panneaux solaires thermiques, appelés *capteurs solaires thermiques* ou simplement capteurs solaires, qui convertissent la lumière en chaleur récupérée et utilisée sous forme d'eau chaude ; les panneaux solaires photovoltaïques, appelés *modules photovoltaïques* ou simplement panneaux solaires, qui convertissent la lumière en électricité[8].

Dans les deux cas, les panneaux sont habituellement plats, d'une surface approchant plus ou moins le  $m^2$  pour faciliter et optimiser la pose. Les panneaux solaires sont les composants de base de la plupart des équipements de production d'énergie solaire.

Les panneaux solaires thermiques sont actuellement plus rentables économiquement que les modules photovoltaïques grâce à un prix beaucoup moins élevé et un rendement élevé avoisinant les 80 %, même si l'énergie qu'ils permettent de récupérer est obtenue sous une forme de moindre valeur (eau chaude à température sanitaire au lieu d'électricité).

D'une manière générale, on considère que la totalité de la surface des toitures existantes, correctement exposées et couvertes de panneaux, pourrait suffire à satisfaire la totalité des besoins mondiaux en électricité.

Comme beaucoup de processus industriels, la fabrication des panneaux solaires présente des risques pour l'environnement, notamment en matière de réchauffement climatique. Cette fabrication (plus transport, pose, etc.) nécessite en outre de l'énergie. Les fabricants cherchent à réduire au maximum les coûts et les besoins en matériau (silicium notamment), ce qui a incidemment pour effet de réduire la consommation d'énergie sur le cycle de vie du panneau, réduisant la durée de remboursement de l'énergie investie.

### 1. L'énergie éolienne.

L'activité solaire est la principale cause des phénomènes météorologiques. Ces derniers sont notamment caractérisés par des déplacements de masse d'air à l'intérieur de l'atmosphère. C'est l'énergie mécanique de ces déplacements de masse d'air qui est à la base de l'énergie éolienne. L'énergie éolienne consiste ainsi à utiliser cette énergie mécanique. Des voiliers ont été utilisés dès l'Antiquité, comme en témoigne la Barque solaire de Khéops[9]. Jusqu'au milieu du 19ème siècle, l'essentiel des déplacements nautiques à moyenne et longue distance ce sont faits grâce à la force du vent. Un dérivé terrestre n'ayant d'usage que sportif a été rendu possible par les techniques modernes : le char à voile.

L'énergie éolienne a aussi été vite exploitée à l'aide de moulins à vent équipés de pales en forme de voile. Ces moulins utilisent l'énergie mécanique pour actionner différents équipements. Les meuniers utilisent des moulins pour faire tourner une meule à grains. Aujourd'hui, ce sont les éoliennes qui prennent la place des moulins à vent.

Les éoliennes transforment l'énergie mécanique en énergie électrique, soit pour l'injecter dans un réseau de distribution soit pour être utilisé sur place (site isolé de réseau de distribution).

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie directement tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur *ad hoc* comme une éolienne ou un moulin à vent.

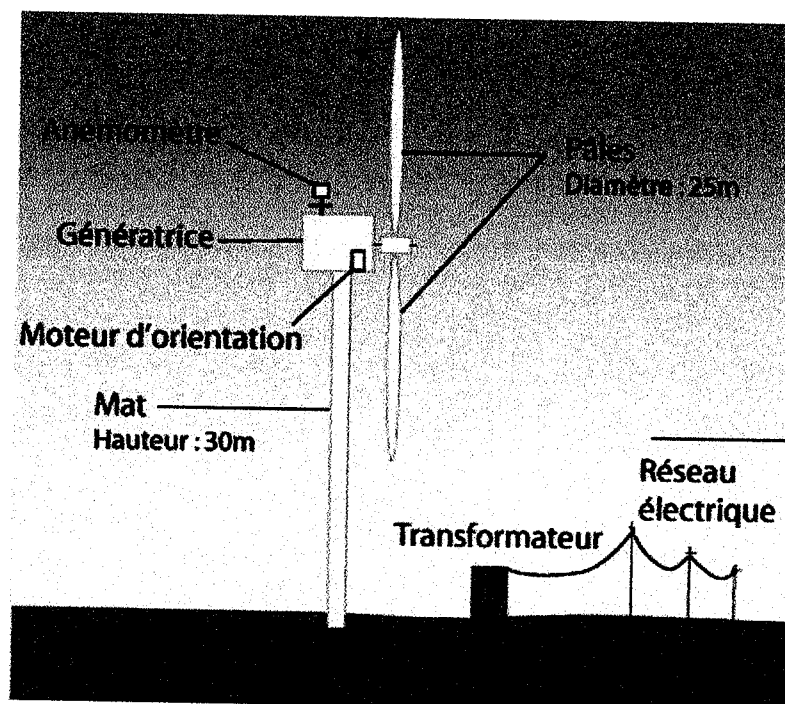


Figure I. 8: L'énergie éolienne

L'énergie éolienne peut être utilisée de plusieurs manières :

- Conservation de l'énergie mécanique: le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (Navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin.

Transformation en force motrice (pompage de liquides, compression de fluides...).

- Production d'énergie électrique ; l'éolienne est alors couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif [10, 11].

- Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

## 2. L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique ou hydro-électricité est une manifestation indirecte de l'effet du soleil et est apparue au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle. Elle utilise les mouvements de l'eau sous toutes ses formes pour faire tourner une turbine qui entraîne un générateur électrique[12].

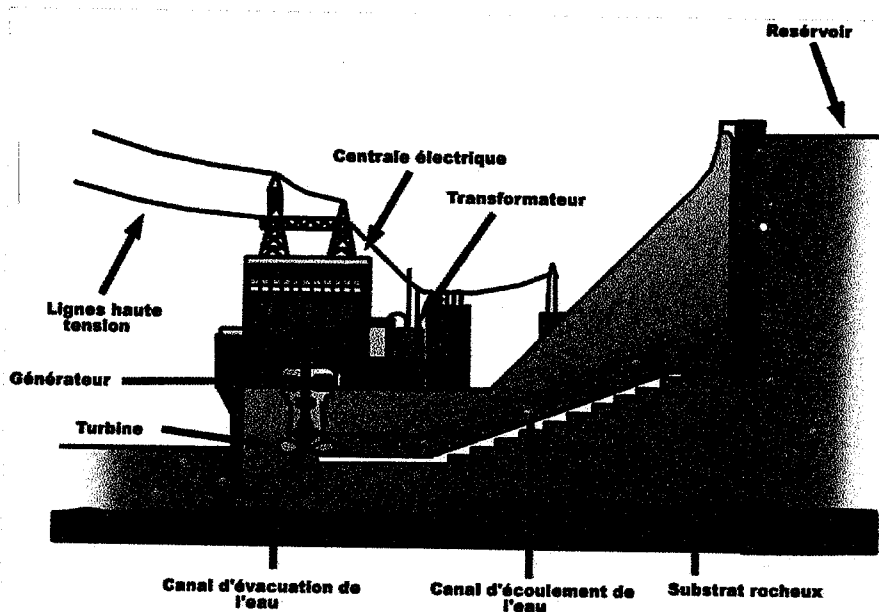


Figure I. 9 : L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique apparaît lorsqu'il y a un déplacement de fluide, en particulier de l'eau bien que l'huile soit aussi utilisée pour produire de l'énergie[13]. Le déplacement des fluides crée un travail mécanique, donc par conséquent de l'énergie; l'eau d'un courant fait tourner une turbine, puis ce mouvement peut être utilisé pour produire de l'électricité au moyen d'une dynamo (loi d'induction de Faraday). De plus, certaines centrales hydrauliques utilisent l'énergie des marées, l'énergie des vagues ou encore l'énergie des courants marins pour produire de l'électricité.

Il est à remarquer qu'il y a une différence entre l'énergie hydraulique dans le cas d'un cours d'eau et celui d'une chute d'eau. En effet, dans le premier cas, l'énergie est cinétique, car l'électricité est générée grâce au mouvement de l'eau, alors que dans le cas de la chute d'eau, l'énergie est dite potentielle car il y a une différence de position entre le

début et la fin de la chute par rapport au sol (bien que l'énergie potentielle soit transformée en énergie cinétique, et c'est cette dernière qui fait tourner la dynamo).

L'énergie hydraulique peut également être convertie en énergie hydroélectrique pour la production d'électricité, que cela soit via une centrale hydroélectrique ou marémotrice.

L'énergie hydroélectrique est une énergie électrique obtenue par conversion de l'énergie hydraulique des différents flux d'eau (fleuves, rivières, chutes d'eau, courants marins ...).

L'énergie cinétique du courant d'eau est transformée en énergie mécanique par une turbine, puis en énergie électrique par un alternateur.

L'énergie hydroélectrique est une énergie renouvelable. Elle est aussi considérée comme une énergie propre, bien qu'elle fasse parfois l'objet de contestations environnementales, soit en raison de son emprise foncière, soit plus récemment sur son bilan carbone

L'énergie marémotrice est issue des mouvements de l'eau créée par les marées, causées par l'effet conjugué des forces de gravitation de la Lune et du Soleil et récupérées en mer par des turbines marémotrices.

Aujourd'hui, de toutes les énergies renouvelables, c'est l'énergie hydraulique qui est la plus utilisée.

### **3. La géothermie**

La géothermie est l'exploitation de la chaleur stockée issue du sous-sol. L'utilisation des ressources géothermiques se décompose en deux grandes familles : la production d'électricité et la production de chaleur (elle peut aussi être utilisée pour les besoins de climatisation). Elle est essentiellement développée dans les zones volcaniques et dans les zones à activités tectoniques et représente 5,4% de la production d'électricité renouvelable mondiale [12, 14]. L'évolution de la production est relativement faible vis à vis des autres secteurs énergétiques avec une progression de 4% par an en moyenne.



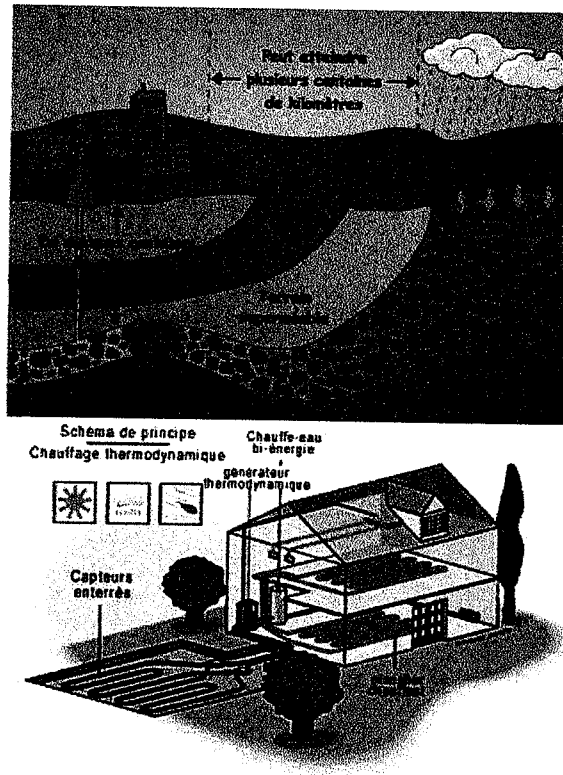


Figure I. 10: La géothermie

#### 4. La biomasse

La biomasse, ensemble de la matière vivante, concerne les produits organiques végétaux et animaux utilisés pour l'énergie ou l'agriculture.

Nous connaissons déjà le simple bois de feu en tant que plus ancienne source d'énergie. Les déchets ligneux sont aussi de la famille des bois et font partie de la « biomasse sèche ». D'un autre côté nous avons la « biomasse humide » [15], déchets organiques agricoles, agro-alimentaire ou urbaine. Le tout peut être transformé en énergie ou engrais.



Figure I. 11 : La biomasse

La biomasse utilise des matériaux d'origine biologique employés comme combustibles pour la production de chaleur, d'électricité ou de carburant. Elle comprend trois familles principales :

- La biomasse solide : Le bois est la principale ressource ligneuse, mais il faut également prendre en compte d'autres matières organiques telles que la paille, les résidus solides des récoltes, les grappes de maïs, la bagasse de la canne à sucre, les grignons d'olives.
- Le biogaz : Ce sont les matières organiques qui libèrent le biogaz lors de leur décomposition selon un processus de fermentation (méthanisation). On l'appelle aussi « gaz naturel renouvelable » ou encore « gaz de marais », par opposition au gaz d'origine fossile. C'est un gaz combustible qui peut être directement capté dans les centres d'enfouissement des déchets ou produit dans des unités de méthanisation[16]. Il est issu des sous-produits de l'industrie agro-alimentaire, des boues des stations d'épurations, des lisiers, ou encore des déchets agricoles qui sont ensuite méthanisés dans des unités industrielles.
- Les biocarburants : Ils existent sous forme d'éthanol, de biodiesel, d'huile végétale,... et peuvent être utilisés purs ou comme additifs aux carburants classiques. Cette catégorie de biomasse reste cependant très peu utilisée pour la production d'électricité car sa principale vocation reste la carburation automobile.

La biomasse représente la plus grande part des énergies renouvelables avec une production énergétique qui atteint 66%. Sa progression annuelle est légèrement moins marquée avec une croissance moyenne entre 1997 et 2011 de 12,3%.

---

## Conclusion

---

### *Verbes au passé*

Dans ce premier chapitre, nous présentons l'importance de l'énergie et l'augmentation de sa consommation. Ces facteurs poussent les chercheurs et les industries à faire des recherches approfondies sur la production d'énergie par plusieurs voies.

Nous décrivons les énergies renouvelables qui ont le vent en derrière depuis que quelques années.

Après nous nous somme intéressés aux énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables ont beaucoup d'enjeux économiques et surtout environnementaux. Son utilisation ou plutôt sa conversion en énergie dégage moins de pollution que les énergies fossiles.

Notre étude approfondie concerne la biomasse; qui est une forme reconnue d'énergie renouvelable et est considérée comme un moyen efficace de lutter contre le réchauffement climatique, en remplaçant l'utilisation des combustibles fossiles.

## ***Bibliographie***

---

1. Commission of the European Communities. Directorate-General for Energy., *Bilans énergétiques*, La Commission: Brussels. p. v.
2. Mali. Stratégie énergie domestique., *Le bulletin d'informations sur l'énergie domestique au Mali*, Bamako: SED. v.
3. Elhadji Mahamane, M.L., Permanent Inter-State Committee for Drought Control in the Sahel., and Programme régional de promotion des énergies domestiques et alternatives au Sahel., *Bois-énergie, lutte contre la pauvreté et environnement au Sahel / [Elhadji Mahamane, Mahamane Lawali ... et al.]*. Les publications du PREDAS. 2005, Burkina Faso: CILSS : Programme régional de promotion des énergies domestiques et alternatives au Sahel. 27 p.
4. France. Bureau de documentation minière. [from old catalog], *Annuaire, mines, sidérurgie, carburants, énergie atomique*.
5. DawnNews TV. and LC Purchase Collection (Library of Congress), *Plan B : solar energy, wind energy, biofuels, consumer level solutions*. Investigative reporting. 2011, Karachi: DawnNews. 1 videodisc of 1 (DVD-R) (ca. 120 min).
6. United Nations. Economic Commission for Europe., *Annual bulletin of electric energy statistics for Europe and North America = Bulletin annuel de statistiques de l'énergie électrique pour l'Europe et l'Amérique du Nord = Ezhegodny\*i*

- b\*ulleten' statistiki \*elektro\*energii dlia Evropy i Severno\*i Ameriki*. 1994, United Nations: New York. p. v.
7. Belgium. Services de programmation de la politique scientifique., *L'Energie photovoltaïque : état de la recherche, 1984*. 1984, Bruxelles: Direction opérationnelle du Programme national R-D énergie. 208 p.
  8. Labouret, A. and M. Viloz, *Solar photovoltaic energy*. IET renewable energy series. 2010, Stevenage: Institution of Engineering and Technology. xi, 372 p.
  9. Wood, T.B. and N.C. Ross, *The financial cost of wind energy : a multi-national case study*. 2012, New York: Nova Science Publishers. ix, 166 p.
  10. Richards, J., *Wind energy*. Energy choices. 2010, New York: Marshall Cavendish Benchmark. 32 p.
  11. Jensen, P.H. and International Solar Energy Society., *Wind energy pocket reference*. ISES pocket reference. 2007, London?: Earthscan. 81 p.
  12. United Nations. Secretary-General 1961- (Thant) and United Nations. Department of Economic and Social Affairs., *New sources of energy and energy development; report on the United Nations Conference on New Sources of Energy: solar energy, wind power, geothermal energy, Rome, 21 to 31 August, 1961*. United Nations Document E/3577/rev 1 ST/ECA/72. 1962, New York,: United Nations. v, 65 p.
  13. Golusin, M., S. Dodic, and S. Popov, *Sustainable energy management*. ix, 391 pages.
  14. Sayigh, A.A.M., *Comprehensive renewable energy*. 8 volumes.
  15. Santarelli, M., et al., *Biomass-to-electricity: Analysis and optimization of the complete pathway steam explosion – enzymatic hydrolysis – anaerobic digestion with ICE vs SOFC as biogas users*. Bioresource Technology, 2012. 123(0): p. 430-438.
  16. Saeid, A., et al., *Biomass of enriched by biosorption process as a new feed supplement for swine*. J Appl Phycol, 2013. 25(2): p. 667-675.

*Chapitre II*

---

*La biomasse*

---

**Introduction**

---

Pendant longtemps, la biomasse, qui désigne l'ensemble de la matière organique d'origine végétale et animale, 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. Puis vint la révolution industrielle au XIX<sup>e</sup> 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. La lutte contre le réchauffement climatique a en effet permis de redécouvrir les bienfaits de cette ressource.

L'énergie tirée de la biomasse est notamment considérée comme renouvelable. De plus, son bilan carbone est théoriquement favorable vis-à-vis de l'effet de serre, puisque le gaz carbonique émis dans l'atmosphère n'est autre que celui absorbé auparavant par la plante lors de sa croissance. Autre intérêt : sa diffusion pourrait permettre de réduire les problèmes de dépendance énergétique. Il faut cependant tenir compte de l'énergie nécessaire à l'agriculture, aux transports et à la transformation de la biomasse.

## I. Définition

Dans le domaine de l'énergie, le terme de biomasse regroupe l'ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie.

Elles peuvent être utilisées soit directement (bois énergie), soit après une \*méthanisation de la matière organique (biogaz) ou de nouvelles transformations chimiques (biocarburant). Elles peuvent aussi être utilisées pour le compostage[1].

Issue des forêts et/ou de l'agriculture la biomasse représente un potentiel énergétique important et donc une alternative réaliste aux énergies fossiles. L'énergie tirée de la biomasse peut dans la plupart des cas être considérée comme une énergie renouvelable

## II. Caractéristique de la biomasse

- **Composition chimique élémentaire et composés inorganiques, impacts sur la combustion**

Composition élémentaire (CHON) permet d'estimer l'efficacité de la combustion :

- Contenu énergétique (taux de C et de H),
- Emissions de gaz et particules polluants, corrosifs et dangereux (NO<sub>x</sub>, HCl, HAP, COV, dioxines...).
- Composition des cendres et la production de mâchefers.

Cultures fourragères riches en chlore et en azote et susceptibles d'engendrer corrosion et gaz polluants.

Certaines cultures fourragères riches en K<sub>2</sub>O et P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (températures de fusion basses) catalyseur de mâchefers.[2]

- ✓ **Composition chimique élémentaire et composés inorganiques, impacts sur la combustion**

- Composition élémentaire (CHON) permet d'estimer l'efficacité de la combustion :

Biomasse	C	H	N	S	Cl	Cdr	P205	K <sub>2</sub> O
	(% massique mat. sèche)						(% massique)	
Bois	49,00	5,70	0,40	0,10	0,10	2,90	4,50	9,50
Froment (paille)	44,33	5,32	0,57	0,14	0,50	6,21	2,13	17,07
Herbe	45,11	4,90	2,01	0,15	1,09	9,93	8,70	35,20
Maïs (tige)	47,09	5,97	0,74		0,05	1,73	5,69	30,25
Miscanthus	48,49	5,42	0,56	0,05	0,21	3,46	2,78	19,41
Tournesol	50,50	5,90	1,30	0,10	0,40	6,90	3,64	30,01

Tableau II. 1 : composition élémentaire

- Composition élémentaire du bois et de biomasses lignosillulosiques agricoles.
- ✓ Structurelle élémentaire (cellulose, hémicellulose et lignine) impacts sur la combustion

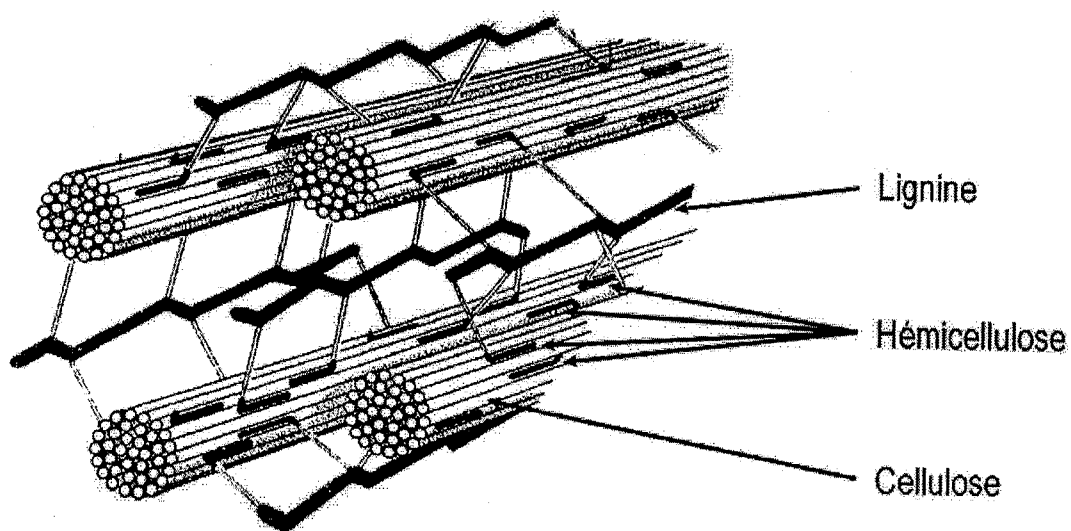


Figure II. 1 : Modèles de prédiction du pouvoir calorifique supérieur de ces cultures ont été construits à partir des PCS individuels de chaque constituant.



✓ **Structurelle élémentaire (cellulose, hémicellulose et lignine) impacts sur le bioéthanol de deuxième génération**

- Le potentiel théorique de production de bioéthanol de deuxième génération amélioré par des teneurs élevées en cellulose et en hémicelluloses, et par des teneurs basses en lignine et en cendres
- Le bioéthanol provient de la fermentation des monosaccharides issus de l'hydrolyse de la cellulose et des hémicelluloses,
- La lignine affecte l'hydrolyse et a également une action inhibitrice sur les microorganismes responsables de la fermentation.

✓ **Structurelle élémentaire, composition élémentaire, C/N impacts sur la production de biogaz**

- La production de biogaz fonction de la qualité des nutriments qui compose la matière organique: glucide < protéine < lipide
- La teneur en lignine réduit l'accessibilité de la matière organique
- C/N = 25 et 32 optimal
  - C/N < 25 : fermentation inhibée.
  - C/N > 32 : méthanisation inhibée.

### **III. Valorisation énergétique de la biomasse**

#### **III.1 Les conversions biochimiques**

##### **A. Fermentation méthanique (biométhanisation)**

Procédé de dégradation de la biomasse en l'absence d'oxygène et à l'abri de la lumière par l'action combinée de micro-organismes en trois grandes étapes.

Plus de détail chapitre 3.[3]

### B. Fermentation alcoolique

Elle utilise des levures pour dégrader la matière organique par voie aérobie. Deux familles de biocarburants sont actuellement développées:

- les esters d'huiles végétales (ester de colza incorporé dans le gazole ou le fioul domestique, ester de tournesol actuellement testé pour être incorporé dans un premier temps au fioul)[4];
- l'éthanol, produit à partir de blé et de betteraves, incorporable dans le supercarburant sans plomb sous forme d'Ethyl Tertio Butyl Ether (ETBE)[5].

La fermentation alcoolique ne concerne que certaines catégories de biomasses. Il s'agit principalement des sous produits à forte teneur en glucides, surtout les amidons et les sucres libres. Il est également possible d'utiliser certains résidus végétaux tels que les rafles de maïs ou encore les papiers-cartons. Le traitement de biomasses lignocellulosiques exige toutefois une opération de prétraitement destinée à éliminer la lignine, généralement par hydrolyse alcaline, ce qui conduit à des surcoûts importants [1].

Le principe de la fermentation se décompose en trois opérations principales dans des installations de type industriel:

- **hydrolyse:** hydrolyse enzymatique par macération dans une solution contenant une ou plusieurs enzymes hydrolytiques. Nous travaillons à 50°C, parfois jusqu'à 80-90°C, en milieu acide. Nous obtenons après neutralisation et filtration un sirop de sucre et des résidus[6].
- **fermentation:** le sirop est introduit dans le fermenteur puis inoculé à l'aide d'une culture de levures. Nous opérons classiquement à 30-40°C. Des recherches sont effectuées pour travailler avec des souches thermophiles et à hautes pressions afin de permettre une extraction continue de l'alcool produit.
- **distillation:** c'est l'opération classique de récupération de l'alcool éthylique produit par vaporisation. Il convient de noter qu'elle engendre un investissement de la même importance que celui du fermenteur. Finalement, nous obtenons d'une part de l'alcool éthylique, valorisable comme carburant de substitution ou comme produit de base pour l'industrie chimique. Les autres co-produits sont un effluent et un résidu solide.

La fermentation alcoolique est surtout développée pour traiter les résidus végétaux de l'industrie sucrière, notamment les mélasses qui contiennent encore 50% de glucides. C'est ainsi que nous estimons que 3,5 à 4 tonnes de mélasse peuvent permettre la production d'une tonne d'alcool éthylique.

Les applications sont celles couvertes par les moteurs classiques (transport, agriculture, industrie, électrification) et les brûleurs de chaudières ou de séchoirs.

Equivalence en volume des huiles végétales : 1,1 litres pour 1 litre de fioul/gazole

Equivalence en volume de l'éthanol 95 : 1,6 litres pour 1 litre d'essence.

Les huiles végétales sont utilisables dans les moteurs Diesel à injection indirecte après quelques adaptations simples. Les moteurs diesel à injection directe doivent être modifiés (piston, injection).

Les esters (méthyliques ou éthyliques) d'huiles végétales sont utilisables dans tout type de moteurs Diesel.

L'aspect financier n'est qu'un complément à l'abord économique de ce type de projet " Bioénergie et développement local ".

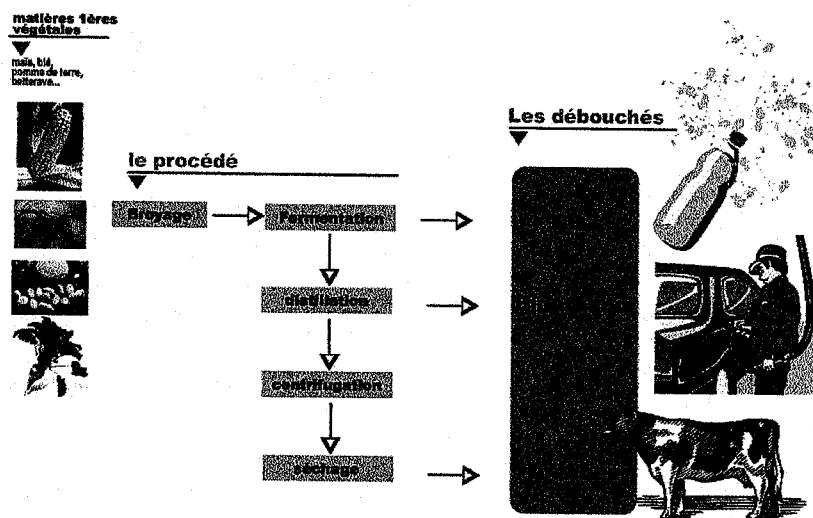


Figure II. 2 :Le procédé de la fermentation alcoolique[7]

### III.2 Les conversions thermochimiques

La biomasse sèche est orientée vers les conversions thermochimiques. Nous distinguons Trois modes qui sont : la combustion, le pyrolyse et la gazéification.

Le **tableau II.2** précise pour chaque transformation les conditions en température et atmosphère ainsi que les produits obtenus. Seule la pyrolyse et la gazéification sont étudiées dans ce chapitre.

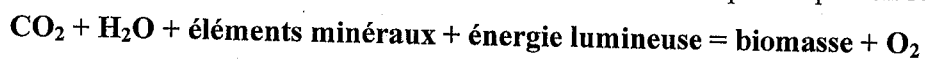
Transformations thermochimiques	Température	Atmosphère	Produits
Pyrolyse	< 700°C	Inerte (absence de O <sub>2</sub> )	Solide carboné (charbon) + liquide (goudrons) +gaz
Gazéification	>800°C	Gaz réactif air, O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, etc..	Essentiellement mélange gazeux H <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> et CH <sub>4</sub>
Combustion	>900°C	O <sub>2</sub> (air)	CO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O

**Tableau II. 2:** Tableau récapitulatif des conditions opératoires des différentes transformations thermochimiques

#### III.2.1 La combustion directe

Pour que la combustion soit possible, il faut réunir en même temps une matière combustible, un corps comburant (oxygène, air...) qui, se combinant, produit la combustion et une énergie pour le démarrage de la réaction chimique de combustion. La conversion thermochimique est adaptée aux caractéristiques du bois. Elle permet de valoriser tous les composants du bois et utilise une matière première sèche.[8, 9]

La production photosynthétique est décrite sommairement par l'équation suivante :



Les utilisations de la biomasse comme combustible s'inscrivent dans le cycle naturel du carbone :

**Combustion biomasse =  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Cendres} + \text{énergies}$**

### ✓ La combustion directe

Au cours de la combustion directe, le bois est décomposé par la chaleur dans le foyer en gaz et en charbon de bois. Le contact avec l'air comburant provoque l'oxydation des gaz chauds et la gazéification du charbon de bois en gaz combustibles. Environ 80 à 90% du poids du bois est transformé en gaz durant cette phase.

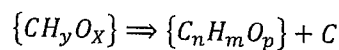
Les gaz combustibles issus du bois sont les suivants : monoxyde de carbone (CO), hydrogène ( $\text{H}_2$ ) et hydrocarbures ( $\text{C}_m\text{H}_n$ ). Ces gaz doivent être brûlés dans la chambre de combustion, sans quoi ils polluent l'atmosphère. Le but de la combustion est donc de convertir totalement l'énergie chimique du bois en chaleur, par oxydation.

### ✓ Les étapes de combustion

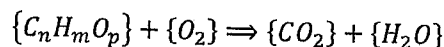
La combustion du bois se divise en différentes étapes relevant de divers processus chimiques et physiques. La combustion des matières solides comprend des réactions hétérogènes: la gazéification de la matière solide, et des réactions homogènes : la phase d'oxydation

Les équations correspondantes :

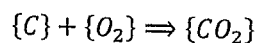
Dévolatilisation



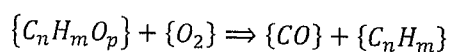
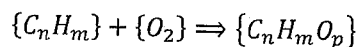
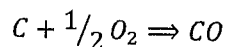
Combustion en phase gazeuse



Combustion en phase solide



(réactions incomplètes)



### ✓ Les émissions de polluants atmosphériques liés à la combustion

L'utilisation de combustible fossile provoque un accroissement de la concentration du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dans l'atmosphère. Par contre la combustion du bois garantit des rejets dans l'atmosphère avec moins de polluants que la plupart des combustibles fossiles. [10]. Lors de la combustion du bois, nous distinguons deux types de pollutions produites: les émissions polluantes globalement au niveau planétaire (gaz à effet de serre) et les émissions polluantes au niveau local (poussières)[11]. La combustion du bois émet peu de l'oxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) par rapport aux énergies fossiles comme le fuel et le charbon, elle en émet toutefois plus que le gaz naturel. (Cf. Tableau II.2).

D'autres produits sont malheureusement formés lors de la combustion, qui ont un impact direct sur la qualité de l'air et peuvent présenter un caractère de toxicité immédiate ou induire à long terme l'apparition de composés secondaires toxiques ou nuisibles à l'environnement dont ils constituent une charge polluante. Pour la combustion, il s'agit principalement: du monoxyde de carbone CO. Les appareils modernes de chauffage au bois permettent une combustion complète avec de faibles émissions de polluants grâce à une température de combustion élevée, un temps de séjour élevé dans la zone chaude, un bon mélange entre les gaz combustibles produits lors de la pyrolyse et l'air comburant, un excès d'air faible.

	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	
Chaudière Fioul	140	40	10	50	78000	5
Chaudière Gaz Naturel	0	40	5	50	52000	0
Chaudière Charbon	340	70	10	4500	104000	60
Chaudière à bois bûches traditionnelle	10	50	1000	6000	0	70
Chaudière à bois bûche moderne	10	42	9	366	0	14
Chaudière à bois décheté	10	45	2	16	0	4

**Tableau II. 3:** Emissions de CO, NO<sub>2</sub> et SO<sub>2</sub> lors de production de chaleur en kg/TJ (ou mg/MJ).

Les poussières ont un impact localement sur l'environnement, mais depuis quelques années des progrès techniques ont été fait pour améliorer la combustion et traiter les fumées au niveau de l'habitat individuel et collectif (traitement des fumées avec séparateur cyclonique, séparateur à manche ou électro-filtre, combustion étagée, ...).

SO<sub>2</sub> : Dioxyde de soufre, CO : Monoxyde de carbone, NO<sub>x</sub> : Oxydes d'azote,  
CO<sub>2</sub> : Dioxyde de carbone. C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> : composés organiques volatiles,

## II.2.2 La pyrolyse

La pyrolyse est, par définition, la décomposition de la matière organique sous l'effet de la chaleur en absence d'oxygène. Elle est encore appelée carbonisation, lorsque l'objectif est la production du charbon de bois, ou dévolatilisation lorsqu'elle est considérée comme première étape de la combustion[12].

Sous l'effet du chauffage, entre 300 et 700 °C, des matières volatiles se forment à l'intérieur de la particule à partir de l'hydrogène, de l'oxygène et du carbone présents dans le combustible solide, puis sont évacuées. La biomasse se transforme alors, d'une part, en une partie solide appelée le « coke » (charbon) et, d'autre part, en une partie gazeuse (gaz de pyrolyse) constituée de gaz condensables (eau, goudrons) et de gaz incondensables (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>)[13].

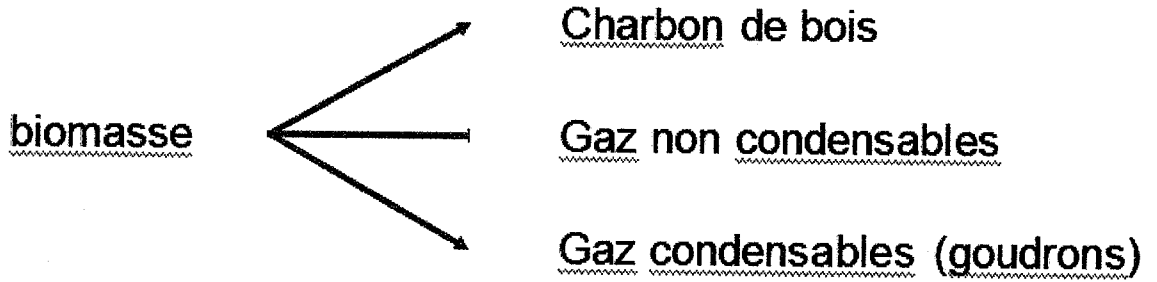
On distingue trois types de pyrolyse différents en fonction de leur gamme de températures et de leur vitesse de chauffe.

Type	Niveaux de température	Vitesse de chauffe	Produits majoritaires
Pyrolyse lente	400-600°C	1-10°C/min	Coke (30-40%) Volatiles (60-70%)
Pyrolyse rapide	600-800°C	10-50°C/min	Volatiles (75-80%) Coke (20-25%)
Pyrolyse flash	600-900°C	>50°C/min	Volatiles (80-90%) Coke (10-20%)

Tableau II. 4 : Différents types de pyrolyse

**a. Objectifs**

La pyrolyse a pour objectif de décomposer la biomasse en une fraction solide et une fraction gazeuse



La pyrolyse sera nommée différemment selon le produit recherché

Pyrolyse flash	obtention de gaz condensables
Carbonisation (lente)	obtention de charbon de bois

**b. Utilisation des sous produits de pyrolyse**

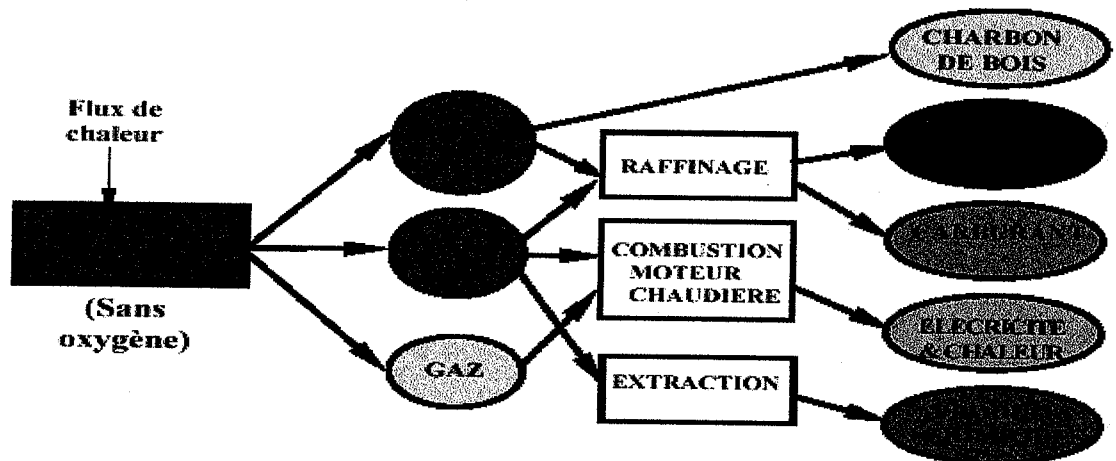


Figure II. 3 : Produits issus de la pyrolyse de biomasse et leurs utilisations.



### c. Influence de la taille des particules

La taille des particules a une influence considérable sur le temps de pyrolyse et sur la composition des gaz.[14, 15]

#### Petites particules

- Pyrolyse rapide
- Production préférentielle de goudrons

#### Grosses particules

- Pyrolyse lente
- Production de gaz non condensables

#### Influence de la taille des particules : exemple

Ces résultats ont été obtenu par simulations numériques 1D sur une particule, ils ne reflètent pas la réalité d'un lit de particules.

Taille	Temps	Gaz	Goudrons
(m)	(s)	(%)	(%)
0.005	100	17	83
0.01	200	20	80
0.03	700	31	69
0.05	1400	43	57

### d. Influence de la nature de la biomasse

La fraction volatile (VM) réellement libérée lors de la pyrolyse dépend des conditions exactes de celle-ci

	Humidité (intrinsèque) (%)	VM (%)	FC (%)	Ash (%)
Bois	20	82	17	1
Paille (blé)	16	59	21	4
Paille (orge)	30	46	18	6
Charbon bitumineux	11	35	45	9

### II.2.3 La gazéification

#### a. Objectifs

Convertir un vecteur d'énergie peu maniable et à la mise en œuvre difficile en un vecteur maniable et efficace. Ce vecteur peut être le gaz, un liquide ou l'électricité.

Dans tous les cas, la transformation commence par le passage d'un vecteur solide à un vecteur gazeux. [16]

La gazéification est donc la conversion de la biomasse en un gaz combustible. Cette transformation est envisagée comme un processus auto thermique sans apport externe d'énergie

#### b. Les principales réactions chimiques de la gazéification

La gazéification désigne un processus de transformation thermochimique de la biomasse qui se déroule généralement en quatre étapes élémentaires [17]:

- Une phase de séchage intégrée ou non au réacteur de gazéification.
- Une phase de pyrolyse qui produit, sous l'effet de la chaleur et absence d'agent oxydant, des matières volatiles (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O et hydrocarbure gazeux appelés « goudrons ») et du charbon essentiellement constitué de carbone fixe.

- Une phase de combustion, parfois appelée oxydation partielle, où à l'aide d'un agent oxydant (air, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) les matières volatiles produites lors de la phase de pyrolyse sont oxydées pour fournir la chaleur nécessaire à l'ensemble du procédé et où une partie des goudrons sont craqués thermiquement.
- Une phase de gazéification proprement dite, étroitement liée à la phase de combustion qui, par des réactions thermochimiques complexes converti le carbone fixe en un gaz combustible riche en CO et H<sub>2</sub> appelé « gaz de synthèse » ou « syngaz » en anglais.

### La pyrolyse

#### L'oxydation ou combustion

Cette opération consiste à brûler une partie des gaz de pyrolyse de façon à fournir :

- La chaleur nécessaire aux trois autres phases.
- Des produits de réaction, type CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O<sub>vap</sub>, qui vont réagir ensuite avec le coke lors de la phase de réduction.

Le choix de l'oxydant est fondamental pour la conception du gazogène et dépend de l'utilisation finale du gaz. C'est essentiellement lui qui fixe le pouvoir calorifique du gaz final à la sortie du gazogène.

Oxydant	PCI <sub>syngaz</sub>	Commentaires
Air	≅ 4 à 6 MJ.Nm <sup>-3</sup>	Procédé autothermique
Vapeur d'eau	≅ 12 à 18 MJ.Nm <sup>-3</sup>	Procédé globalement endothermique
O <sub>2</sub> pur	12 à 18 MJ.Nm <sup>-3</sup>	Procédé autothermique mais coût de production de l'oxygène prohibitif pour une utilisation commerciale
H <sub>2</sub>	40 MJ.Nm <sup>-3</sup>	Procédé globalement très endothermique

**Tableau II. 5 : Principaux types d'oxydants**

De part sa simplicité d'utilisation, l'air est de très loin le plus employé en pratique, notamment dans le cas des gazogènes à lit fixe. La vapeur d'eau est parfois employée comme additif pour améliorer le PCI du syngaz, mais est peu utilisée comme unique oxydant dans les installations de faible puissance.

### La réduction

Les gaz formés lors de l'oxydation partielle passent ensuite dans la zone de réduction. Le coke de pyrolyse y est converti en gaz combustibles à travers une compétition de réactions chimiques. Dans le cas idéal, la globalité des gaz de pyrolyse est convertie en dioxyde de carbone et en vapeur d'eau lors de l'oxydation partielle. Si l'oxygène est absent, alors seulement deux réactions hétérogènes endothermiques sont présentes en compte.

- $C + H_2O + \text{Chaleur} \Rightarrow CO + H_2$                       Gazéification à la vapeur d'eau
- $C + CO_2 + \text{Chaleur} \Rightarrow 2CO$                       Gazéification au dioxyde de carbone

**Ces deux réactions, notamment celle de la gazéification à la vapeur d'eau sont prépondérantes pour la production du gaz combustible et méritent une attention particulière.** La réaction de gazéification du charbon de bois au dioxyde de carbone a une cinétique 2 à 5 fois plus lente que la réaction de gazéification à la vapeur d'eau.

Or, en réalité, tous les gaz de pyrolyse n'ont pas réagi avec l'oxygène lors de l'oxydation partielle. Leur présence augmente le nombre de réactions en compétition.

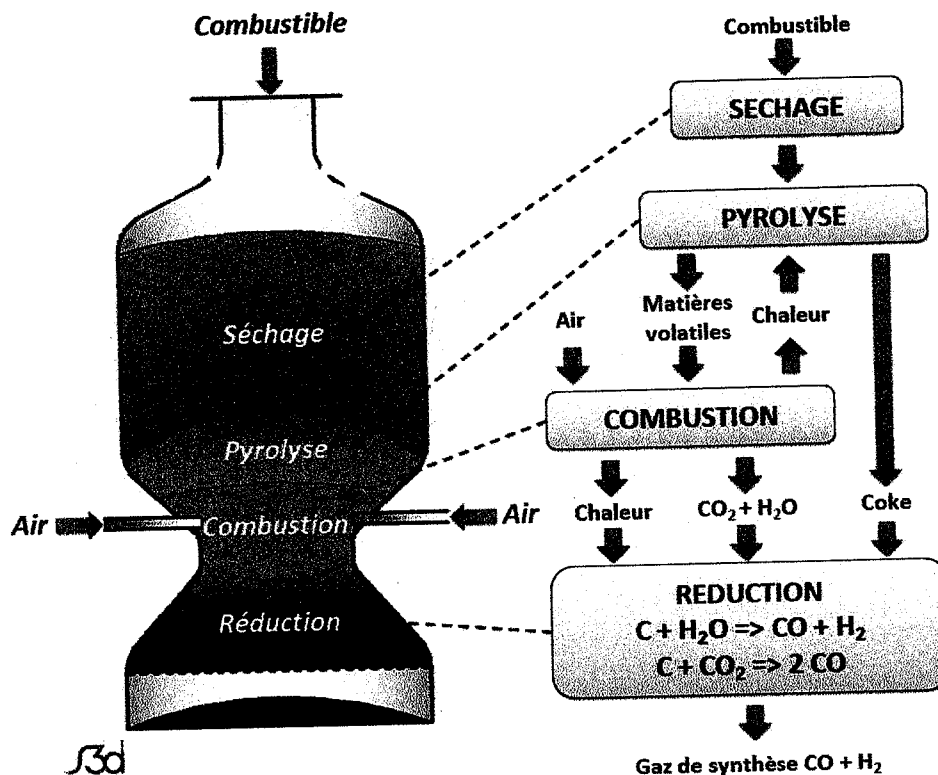


Figure II. 4: Principales réactions intervenant dans la gazéification.

### c. Le traitement des gaz

Les gaz de gazéification sont généralement chargés de nombreux éléments gênants (poussières, goudrons, alcalins, cendres, etc. ...) qu'il est nécessaire d'éliminer avant valorisation énergétique. La qualité des gaz, qui est la résultante de l'ensemble des réactions intermédiaires citées précédemment, va être dépendante de la conception même du réacteur de gazéification mais aussi de la matière première.

En fonction du type d'application, les spécifications seront différentes, le tableau II.4 donne les teneurs admises par diverses techniques de valorisation des gaz de gazéification par rapport à ces principaux polluants[18].

	Unités	Moteurs thermiques	Turbine à gaz	Synthèse méthanol
Pouvoir calorifique minimum	MJ/Nm <sup>3</sup>	<b>Le plus</b>	<b>4-6</b>	-
Température maximum	°C	<b>bas</b>	<b>450-600</b>	<b>&lt;0.02</b>
Particules	mg/Nm <sup>3</sup>	<b>&lt;50</b>	<b>&lt;5</b>	<b>&lt;0.1</b>
Taille de particules	µm	<b>&lt;10</b>	<b>0 ou</b>	<b>&lt;0.1</b>
Coudrons	mg/Nm <sup>3</sup>	<b>&lt;100</b>	<b>vapeur</b>	<b>&lt;0.1</b>
Alcalins métalliques	mg/Nm <sup>3</sup>	<b>na</b>	<b>20-1000</b>	<b>&lt;0.1</b>
NH <sub>3</sub>	ppb	<b>n.l</b>	<b>n.l</b>	<b>&lt;1</b>
HCl	mg/Nm <sup>3</sup>	<b>n.l</b>	<b>&lt;1</b>	<b>&lt;12,(n.l)</b>
Composés soufrés (H <sub>2</sub> S ;COS)	mg/Nm <sup>3</sup>	<b>n.l</b>	<b>&lt;1</b>	
CO <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>		<b>n.l</b>	
	%vol			

**Tableau II. 6:** Qualité des gaz nécessaires pour la production d'électricité et la synthèse de méthanol ... (n.l. = non limité)

- La séparation des particules ou poussières
- Elimination des goudrons
- L'élimination des alcalins

Le **tableau II.5** rassemble les caractéristiques d'utilisation des différents systèmes d'épuration ainsi que le taux de réduction envisageable (Hasler).

	Temp.	Particules	Goudrons	NH <sub>3</sub>	HCl	H <sub>2</sub> S
Craquage catalytique	900 °C	n.d	>95%	n.d	n.d	n.d
Filtre céramique	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Filtre à monche	App. 200°C	60-85%	0-25%	n.d	n.d	n.d

Filtre à lit stable	10 - 20 °C	70 - 95%	60 - 95%	>95%	90%	80 - 95%
Four de lavage	50 - 60 °C	70 - 90%	10 - 25%	n.d	n.d	n.d
Venturi	n.d	n.d	50 - 90%	n.d	n.d	n.d
Atomiseur rotatif	<100%	95 - 99%	n.d	n.d	90%	>95%
Dépoussiéreur électrostatique	40 - 50 °C	>90%	0 - 60%	n.d	n.d	n.d

Tableau II. 7: taux de réduction des différents systèmes d'épuration des gaz.

La qualité des gaz constitue le principal verrou technologique actuel de la gazéification

#### d. Les applications de la gazéification

Le gaz produit par gazéification de la biomasse est un mélange de CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et d'hydrocarbures lourds plus ou moins dilués avec de la vapeur d'eau et de l'azote. Son pouvoir calorifique (PCI) varie de 3,5 à 6 MJ/Nm<sup>3</sup> selon le procédé et les agents de gazéification utilisés (air, oxygène, vapeur d'eau,...). Selon ses caractéristiques (PCI, composition,...) il peut être utilisé de façon forte différente. Ne seront retenues ci-après que les options relatives à la production d'électricité même si les applications thermiques sont assez largement éprouvées.

##### ✓ La combustion directe

Le gaz peut être brûlé dans une chaudière produisant de la vapeur haute température et haute pression valorisée dans un groupe turbo-alternateur pour produire de l'électricité. L'avantage de cette solution par rapport à la combustion directe est la possibilité d'un contrôle plus efficace de la combustion de la matière première et des émissions. chlore dans les gaz (selon les combustibles) qui pourrait provoquer des corrosions.

##### ✓ La combustion dans les moteurs

- Les turbines à gaz
- Les piles à combustible

### e. Avantages de la gazéification

La technologie de gazéification offre l'opportunité d'utiliser les équipements modernes de production d'électricité tels que les turbines à gaz pour la cogénération de chaleur et d'électricité infiniment plus performantes que les solutions traditionnelles peu efficaces issue des cycles à vapeur. Ses principaux avantages peuvent être résumés ainsi

- Rendement électrique élevé avec les turbines à gaz et les moteurs, même sur de petites puissances Cette amélioration des rendements permet une augmentation de tailles des installations biomasse sans accroître le rayon d'approvisionnement ce qui a un impact significatif sur les coûts d'investissements et d'approvisionnement.
- diminution significative des coûts de réduction des émissions du fait des faibles volumes de gaz mis en jeu par rapport à la combustion. La gazéification est une technique d'autant plus intéressante que l'on attache un grand intérêt aux problèmes de pollution et d'environnement. En effet, au delà de l'aspect substitution, avec ces procédés il est possible de mieux contrôler les émissions.



---

## Conclusion

---

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés à la biomasse et ses caractéristiques. Les caractéristiques de biomasse nous permettent de choisir le mode de conversion qui convient.

Les conversions énergétiques de la biomasse sont divisées en deux catégories : les conversions thermochimiques et les conversions biochimiques ; selon le type de biomasse (sèche et humide).

Nous avons présenté les deux voies de conversions biochimiques de la biomasse qui sont ; fermentation alcoolique et fermentation méthanique. La fermentation alcoolique nous produit de l'éthanol et la fermentation anaérobique nous produit le biogaz qui est un gaz riche en hydrogène.

Nous avons présenté les trois voies de conversions thermochimiques de la biomasse qui sont : la combustion, la pyrolyse et la gazéification.

La pyrolyse de la biomasse c'est le dégradation de la matière sèche en absence d'oxygène sous une température qui atteint environ 900 °C; nous obtenons du charbon, du gaz et principalement l'huile de pyrolyse qui peut être valorisé dans plusieurs domaines comme combustible.

La gazéification est un ensemble de réactions en présence de l'air (oxygène, vapeur d'eau,...) et sous une grande température environ 800 °C qui nous donne à la fin un gaz riche en hydrogène. Nous avons épuré ce gaz: éliminons le goudron, la poussière et les métaux alcalins. Nous pouvons donc après ces opérations d'épuration l'utiliser dans la combustion que ce soit direct ou dans les moteurs; dans une TAG et aussi dans une pile à combustible.

## ***Bibliographie***

---

1. Kaltschmitt, M., H. Hartmann, and H. Hofbauer, *Energie aus Biomasse : Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2., neu bearbeitete und erw. Aufl. ed. 2009, Heidelberg ; New York: Springer. xxxi, 1030 p.
2. Denmark. Strukturdirektoratet., *Biomasse til non-food formål : slutrapport for forskningsprogrammet*. 1999, Denmark: Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri, Strukturdirektoratet. 67 p.
3. 4503154 *Anaerobic digestion of organic waste for biogas production: Robert Paton assigned to Biorganic Energy Inc*. *Biotechnology Advances*, 1985. 3(1): p. 137.
4. Tsigie, Y.A., et al., *Bioethanol production from Yarrowia lipolytica Polg biomass*. *Bioresour Technol*, 2012.
5. Ho, S.H., et al., *Bioethanol production using carbohydrate-rich microalgae biomass as feedstock*. *Bioresour Technol*, 2013. 135: p. 191-8.
6. Zhou, W., et al., *Lipid production by Rhodosporidium toruloides Y2 in bioethanol wastewater and evaluation of biomass energetic yield*. *Bioresour Technol*, 2013. 127: p. 435-40.

7. Yue, Z., et al., *Development of a new bioethanol feedstock – Anaerobically digested fiber from confined dairy operations using different digestion configurations*. Biomass and Bioenergy, 2011. **35**(5): p. 1946-1953.
8. *Research Watch: Combustion phenomena*. Environ Sci Technol, 2000. **34**(15): p. 356A.
9. *Research Watch: Combustion diagnostics*. Environ Sci Technol, 2000. **34**(9): p. 227A.
10. Balakrishnan, K., et al., *Air pollution from household solid fuel combustion in India: an overview of exposure and health related information to inform health research priorities*. Glob Health Action, 2011. **4**.
11. Bienstock, D., R.L. Amsler, and E.R. Bauer, Jr., *Formation of oxides of nitrogen in pulverized coal combustion*. J Air Pollut Control Assoc, 1966. **16**(8): p. 442-5.
12. Abubakar, Z., A.A. Salema, and F.N. Ani, *A new technique to pyrolyse biomass in a microwave system: effect of stirrer speed*. Bioresour Technol, 2013. **128**: p. 578-85.
13. Suo, L., X. Sun, and W. Jiang, *Effect of pretreatment on biomass residue structure and the application of pyrolysed and composted biomass residues in soilless culture*. PLoS One, 2013. **8**(5): p. e64550.
14. Agrawal, A. and S. Chakraborty, *A kinetic study of pyrolysis and combustion of microalgae *Chlorella vulgaris* using thermo-gravimetric analysis*. Bioresour Technol, 2013. **128**: p. 72-80.
15. Fine, P.M., G.R. Cass, and B.R. Simoneit, *Chemical characterization of fine particle emissions from fireplace combustion of woods grown in the northeastern United States*. Environ Sci Technol, 2001. **35**(13): p. 2665-75.
16. Ahrenfeldt, J., H. Knoef, and GasNet., *Handbook biomass gasification*. 2005, Enschede, Netherlands: BTG Biomass Technology Group. xxii, 378 p.
17. Badeau, J.-P. and A. Levi, *Biomass gasification : chemistry, processes, and applications*. Renewable energy Research, development and policies series. 2009, Hauppauge, N.Y.: Nova Science Publishers. xiv, 474 p.
18. Fuente-Cuesta, A., et al., *Biomass gasification chars for mercury capture from a simulated flue gas of coal combustion*. J Environ Manage, 2012. **98**: p. 23-8.

## *Chapitre III*

---

# *La production du biogaz à partir de la biométhanisation*

## Introduction

---

La digestion anaérobie a été découverte il y a plus de trois siècles. C'est en 1630 que des scientifiques ont pour la première fois constaté qu'un gaz inflammable pouvait se dégager d'une matière organique en décomposition, les chinois ont testé la fermentation méthanique des les années 1800. Cette méthode de production d'énergie a longtemps été passée sous silence.[1]

→ [Ref.]  
En 1808, un chimiste anglais HUMPHREY DAVY, avait récolté une qualité de gaz inflammable, contenant du méthane, mais ce savant ne l'avait pas signé car il s'était intéressé à la fertilisation des sols et non à la composition du biogaz.

Soixante ans plus tard, REISET, membre de l'académie des sciences (France), a signalé la présence du CH<sub>4</sub> dans le fumier[2].

La méthanisation est utilisée depuis plus d'un siècle pour traiter les boues de stations d'épuration urbaines. Ainsi, en 1889, la ville d'Exeter au Royaume-Uni utilisait le biogaz issu de ses stations d'épuration urbaines pour éclairer ses rues. Dans les années 1940, puis à nouveau au cours de la crise du pétrole de 1973 à 1985, cette technologie a été appliquée aux déjections d'élevage, puis dans les années 1970, elle a été développée pour le traitement des effluents des industries agroalimentaires, papetières et chimiques.

L'usine de méthanisation d'Amiens (80), la première au monde, construite en 1988, est restée pendant plus de 10 ans la plus importante usine au monde de méthanisation de déchets ménagers. Actuellement, elle traite 100000 tonnes de déchets par an.

### **I. Mécanisme de la digestion anaérobie**

La digestion anaérobie est un processus microbiologique de conversion de la matière organique, faisant intervenir essentiellement des populations bactériennes, ainsi que des protozoaires et quelques champignons anaérobies. On l'observe dans des biotopes variés, naturels ou artificiels, tels que les marais, les sédiments de lac, le rumen des herbivores ou encore les digesteurs de station d'épuration.

Le principe de la digestion anaérobie est décrit comme la conversion de la matière organique en biomasse et en biogaz, composée essentiellement de méthane ( $\text{CH}_4$ ) et de gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ). La digestion anaérobie d'un produit organique complexe comporte quatre métabolismes différents à savoir : l'hydrolyse, l'acidogènes, l'acétogénèse et la méthanogènes. Cela est illustré par la figure I-1 (Paing, 2001)[3, 4].

#### **a) L'hydrolyse**

Les polymères organiques sont convertis en molécules plus simples (monomères) solubles, sous l'action d'exoenzymes hydrolytiques (cellulases, protéases, lipases) produites par des bactéries fermentaires, anaérobies strictes ou facultatives.

L'hydrolyse n'est pas un mécanisme obligatoire de la fermentation méthanique, mais une étape obligatoire pour la solubilisation des complexes organiques insolubles non disponibles pour les micro-organismes.

**b) L'acidogénèse**

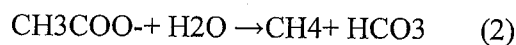
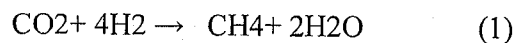
Les produits de l'hydrolyse sont fermentés en composés organiques simples à courte chaîne (2 à 6 carbonés) par des bactéries acidogènes, anaérobies strictes ou facultatives. Cette étape aboutit à un mélange d'acides gras volatils (A.G.V.) et de composés neutres (alcools).

**c) L'acétogénèse**

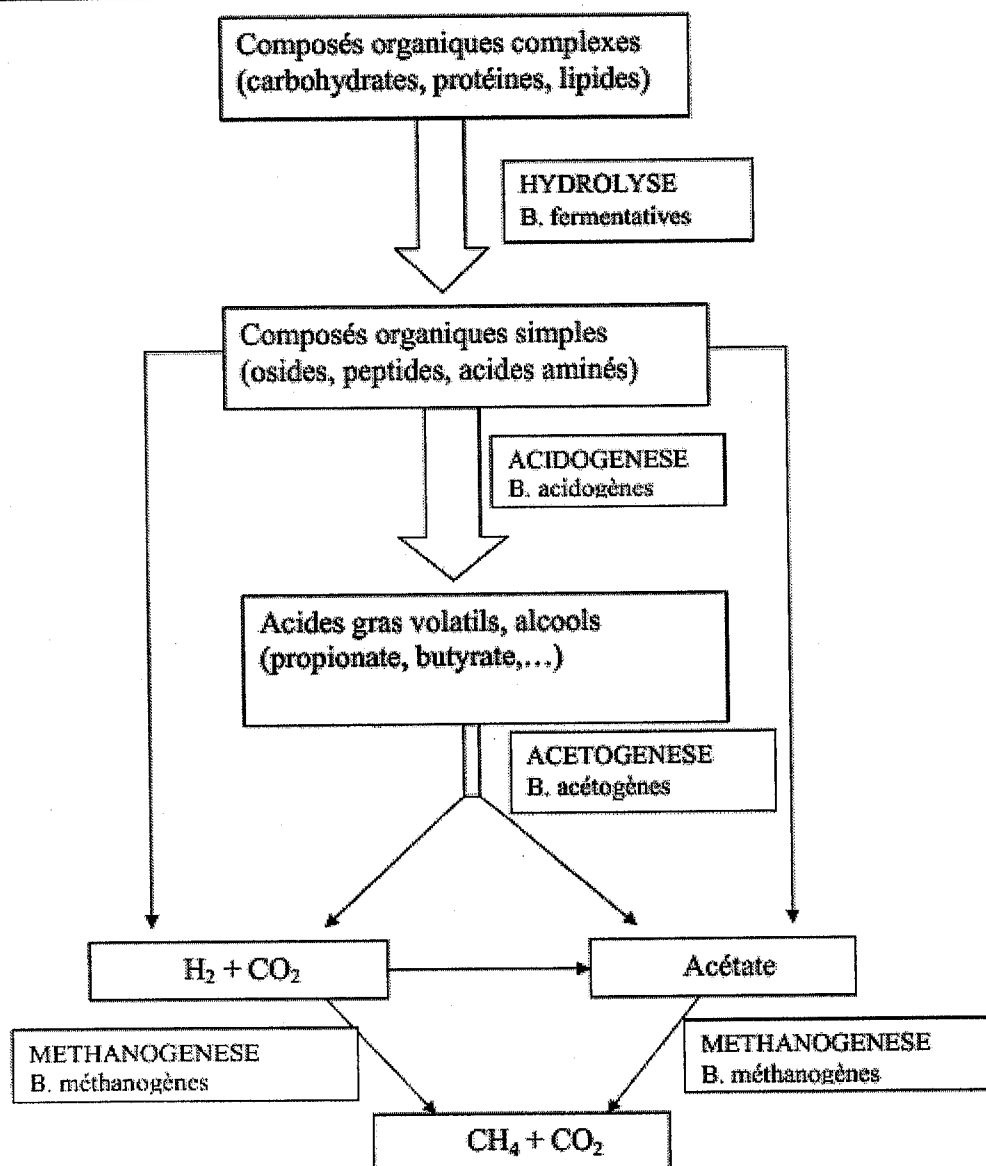
Cette étape est réalisée par des bactéries acétogènes productrices d'hydrogène et conduit à la formation d'acétate, de CO<sub>2</sub> et d'hydrogène (H<sub>2</sub>). Ces réactions de déshydrogénation sont thermodynamiquement défavorables et ne sont possibles qu'à de très faibles pressions partielles en hydrogène. L'action des bactéries acétogènes dépend donc de l'activité des bactéries méthanogènes consommatrices d'hydrogène. On peut noter également l'activité des bactéries homoacétogènes qui permettent la formation d'acétate à partir du CO<sub>2</sub> et de l'H<sub>2</sub>.

**d) La méthanogénèse**

Les deux principales voies de la fermentation de CH<sub>4</sub> sont la réduction du CO<sub>2</sub> (méthanogènes hydrogénotrophique) et la décarboxylation de l'acide acétique (méthanogènes acétoclastique) qui représente environ 70% de la formation de méthane, elles peuvent être décrites par les réactions suivantes :



Ces réactions sont réalisées par des bactéries méthanogènes hydrogénotrophes et des bactéries méthanogènes acétoclastes strictement anaérobies. La méthanogénèse réalisée à partir de CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> est beaucoup plus énergétique que celle faite à partir de l'acétate et présente donc des temps de réaction plus courts. Le temps de reproduction des bactéries méthanogènes acétoclastes est relativement long (généralement supérieur à 20 jours) et ces bactéries sont très sensibles aux facteurs environnementaux. Il en résulte que la méthanogénèse est souvent l'étape limitante de la digestion anaérobie.



**Figure III. 1 :** Représentation schématisée des différentes étapes de la digestion anaérobie de composés organiques (B = bactéries) (Paing, 2001).

La digestion anaérobie de la matière organique conduisant à la formation de CH<sub>4</sub> et de CO<sub>2</sub> est donc un processus complexe qui nécessite la coexistence de différents types de bactéries. Pour une vision globale de la digestion anaérobie, on peut distinguer deux phases principales :

**Phase I : Fermentation acide = Hydrolyse + Acidogénèse**

**Phase II : Méthanisation = Acétogénèse + Méthanogénèse**

La phase de fermentation acide (également appelée fermentation méthanique primaire) conduit à la formation de produits intermédiaires, essentiellement des acides gras volatils, qui servent de substrat pour la phase de méthanisation (ou fermentation méthanique

principale). La cinétique de la digestion anaérobie dépend fortement du type de substrat. Pour la dégradation des composés organiques complexes, l'hydrolyse est l'étape limitant, notamment pour la solubilisation (aussi appelée liquéfaction) des composés solides (boues, matières en suspension). Pour la dégradation des composés organiques simples, l'acidogénèse est plus rapide que la méthanogénèse, qui est alors l'étape limitant[5].

Selon Speece and Mc Carty, 1962 in Binod (2004), la digestion anaérobie peut être regroupée en 3 étapes : l'hydrolyse, l'acidogène et la méthanogènes. La première et la deuxième étape représentent la phase où la DBO reste quasiment constante. La troisième étape est la phase de la réduction de la DBO car au cours de cette phase, la formation de méthane uniquement engendre la diminution de la DBO ou la DCO qui est transformée en méthane ou en gaz carbonique lors du processus de la digestion anaérobie.

Le méthane n'étant pas très soluble quittera alors le milieu liquide et on assiste alors effectivement à une diminution de la DBO correspondant à ce composé, comme on le verra par la suite.

## II. Les facteurs influençant la digestion anaérobie

Plusieurs facteurs environnementaux peuvent influencer le processus d'évolution de la digestion anaérobie, à savoir :

- **La température [6]**

Les différents groupes bactériens de la digestion anaérobie sont sensibles à la température, car des changements brutaux de température peuvent entraîner un déséquilibre du processus qui pourrait entre autre ralentir une étape par rapport à une autre (les bactéries méthanogènes sont plus sensibles aux baisses de température que les bactéries fermentaires et acidogènes), (Cha. et Noike, 1997 cité par Paing, 2001).



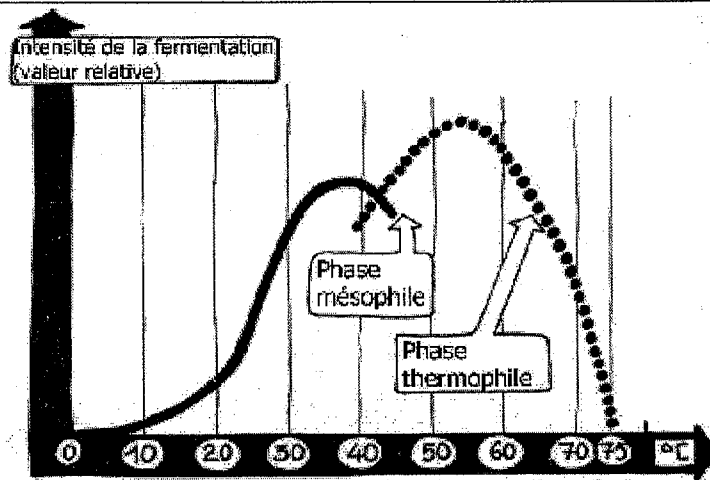


Figure III. 2 : Intensité de la fermentation en fonction de la température [7]

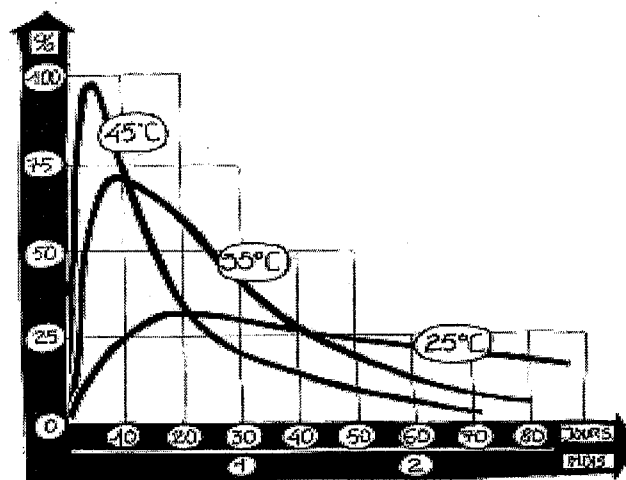


Figure III. 3 : Production de gaz en fonction de la température .[7]

#### ▪ Le pH

Les bactéries méthanogènes sont très sensibles aux valeurs de pH du milieu et ont un optimum entre 6,8 et 7,2. La digestion anaérobies déroule normalement pour des pH compris entre 6 et 8 : en dessous de 6, l'activité des bactéries méthanogènes diminue rapidement et peut être complètement stoppée à partir de 5,5 alors que les bactéries acidogénèses continuent à produire des acides gras volatiles (A.G.V.) jusqu'à des pH voisins de 4,5, (Henze et al. ,1996).

**▪ Nature du substrat**

L'efficacité de la digestion anaérobie d'un substrat dépend de la nature de ce dernier. Contrairement aux hydrates de carbone tels le glucose, la cellulose et l'hémicellulose qui sont facilement biodégradables, les composés toxiques tels les phénols (Tiedje et al., 1986) affectent la digestion anaérobie en diminuant le métabolisme à faible concentration ou en inhibant complètement ce métabolisme à haute concentration (Gunnerson et Stuckey, 1986a; Tiedje et al., 1986)[8].

**▪ Métaux lourds**

Les métaux lourds sont toxiques pour les populations bactériennes anaérobies même à de très faibles concentrations. L'ion  $\text{Cu}^{++}$  est toxique à une concentration de 10-16 mg/L, l'ion  $\text{Zn}^{++}$  à une concentration de 10-4 mg/L et l'ion  $\text{Fe}^{++}$  à une concentration de 1 à 10 mg/L.

A ces concentrations, les ions Cu, Zn et Fe réduisent l'activité des bactéries anaérobies de 50% (Grady et Lim, 1980a).

Les effluents contenant des grandes concentrations de ces métaux lourds doivent être préalablement traités avec des sulfates pour former des complexes insolubles qui peuvent être éliminés par décantation (Gunnerson et Stuckey, 1986a).

**▪ Les substances inhibitrices**

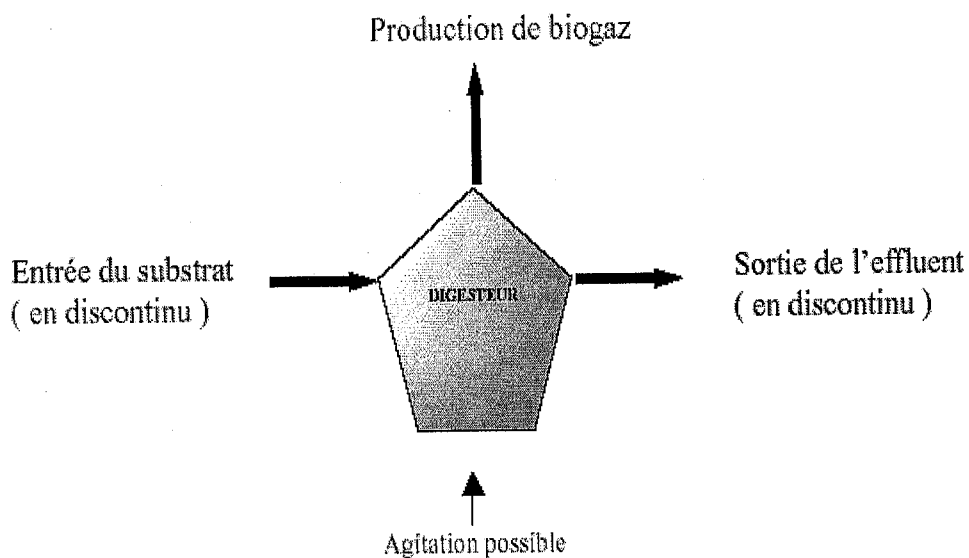
Certaines substances peuvent être inhibitrices, par exemple: l'ammoniac  $\text{NH}_3$  à 100 mg/l, l'hydrogène sulfuré  $\text{H}_2\text{S}$  à 250 mg/l, le cyanure  $\text{CN}^-$  à 5 mg/l, le trichlorométhane à 1 mg/l, le formaldéhyde 100 mg/l et le nickel à 200 mg/l.

**III. Le différents types de digesteurs**

Le digesteur, encore appelé fermenteur ou bioréacteur-anaérobie, est généralement constitué d'une cuve fermée, étanche à l'air et de préférence isolée thermiquement, dans laquelle différents microorganismes dégradent chimiquement et biologiquement les déchets et effluents organiques et produisent du biogaz. Le choix du digesteur varie en fonction du type de déchets à traiter et de l'application visée.

**a. le procédé Batch**

Le système Batch est le plus simple et le plus vieux procédé élaboré. C'est un système à digesteur discontinu surtout utilisé pour les déchets solides types fumiers. Ce déchet à traiter est placé dans une enceinte close pendant une durée comprise entre 8 semaines et 5 mois avec ou sans système d'agitation. La production de biogaz est irrégulière (rapide au début de la fermentation, beaucoup plus lente à la fin). Le mode opératoire consiste à remplir le digesteur avec les substances organiques et laisser digérer, le temps de rétention étant fonction de la température et d'autres facteurs [13]. A la fin de la digestion, le digestat est évacué et le processus peut recommencer comme l'illustre la figure III.4



**Figure III. 4:** Diagramme du procédé Batch [9]

Ce système, rustique et d'une grande simplicité technique, est avantageux pour traiter les déchets solides tels les fumiers, les résidus agricoles ou les ordures ménagères.

**b. Le système continu infiniment mélangé**

Ce système est le procédé le plus utilisé. Son agitation importante permet de conserver une vitesse de production de gaz permanente. La biomasse fraîche est apportée en continu et le résidu liquide de la digestion est éliminé régulièrement [15].

D'autre part, ce système ne permet pas le maintien de la biomasse active car la grande majorité de celle-ci est évacuée à chaque élimination du résidu. Cette limitation de l'activité bactérienne a une influence sur le rendement de la production en biogaz. Elle est

généralement constante mais jamais optimale. Une amélioration de ce phénomène peut être apportée en utilisant une agitation partielle (système continu partiellement mélangé).

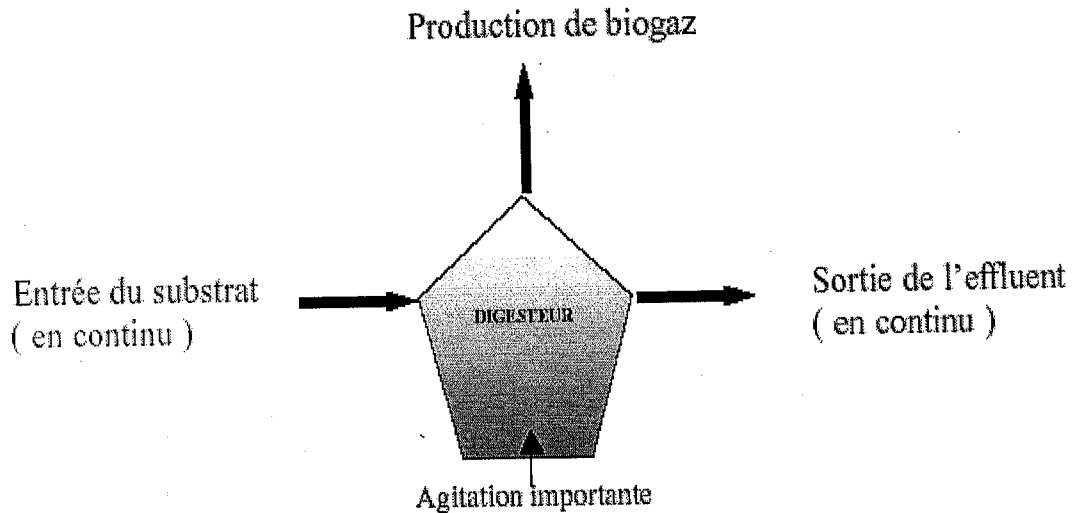


Figure III. 5 : diagramme du système continu infiniment mélangé[9]

#### IV. Produit issus de biométhanisation :

Les produits résultants de la dégradation peuvent être classés en deux catégories, le biogaz et le digestat. Le biogaz est un mélange de méthane ( $\text{CH}_4$ ), de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et de vapeur d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

##### 1) digestat :

Le digestat est le résidu liquide contenant les matières non dégradées, le digestat, représente un compost de haute qualité ce qui peut remplacer un engrais artificiel.

##### 2) Biogaz

Le biogaz est un gaz combustible résultant d'une fermentation de la biomasse humide. Il est un mélange de méthane et de gaz carbonique. (détaillé dans la suite du chapitre)

**V. Biogaz****1) Définition**

Le biométhane ou gaz vert équivaut au méthane ou gaz naturel, mais il est produit à partir de ressources renouvelables. Le biogaz est un gaz riche en méthane qui, lorsque les microorganismes spécialisés se décomposent, développe des matières organiques dans un environnement sans oxygène. Il peut être nettoyé ou valorisé en biométhane, qui est un gaz naturel de qualité. Ce dernier peut être utilisé comme carburant pour véhicule. La raison pour laquelle le biométhane est une alternative au carburant particulièrement intéressante d'un point de vue environnemental, est que le biogaz est un sous-produit dangereux pour l'environnement pour les méthodes traditionnelles de traitement, telles que l'enfouissement des déchets organiques. Lorsqu'il est rejeté dans l'atmosphère, le biogaz a des effets nocifs pour l'environnement étant donné que le méthane est un gaz à effet de serre qui est environ 20 fois plus agressif que le dioxyde de carbone.

**2) Composition**

Le tableau III.1 montre la composition du biogaz à partir de la biométhanisation. Les principaux composants sont le méthane, environ 45-70%, et le dioxyde de carbone environ 30-45%. Dans la plupart des biogaz, de faibles pourcentages d'oxygène et de nitrogène sont également présents.[10]

Le biogaz est saturé avec de l'eau et peut également contenir des quantités importantes de sulfure d'hydrogène ainsi que des quantités d'hydrocarbures plus élevées. Les composants intéressants sont le méthane  $\text{CH}_4$ , présent dans le carburant ou utilisé pour la conversion en hydrogène, et le dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$ . Ce dernier peut être, suite à une purification supplémentaire, utilisé comme gaz brut industriel pour la production de glace sèche ou par exemple pour augmenter la teneur en  $\text{CO}_2$  dans des atmosphères de gaz à effet de serre[11].

En comparaison avec le gaz naturel, le biogaz brut est un gaz lourd. Cela est dû à une teneur élevée en  $\text{CO}_2$  et à une densité d'environ 1,05 to 1,2 kg/Nm<sup>3</sup>. La valeur supérieure en chaleur de 20 – 24 ML/Nm<sup>3</sup> seulement, qui est également liée à la teneur élevée en  $\text{CO}_2$ , est approximativement 30 à 40 % plus faible que celle du gaz naturel. Les

exigences portées sur le gaz vert purifié proviennent des réglementations actuelles des associations nationales et européennes du gaz, comme l'Association allemande du gaz et des eaux. De plus, des expériences qui ont eu lieu sur le long terme et dont l'objectif était de faire rouler des voitures avec du gaz vert ont également été pris en compte.

Composant	Entité	Biogaz
Méthane CH <sub>4</sub>	Vol. %	45 - 70
Dioxyde de carbone CO <sub>2</sub>	Vol. %	30 - 45
Nitrogène N <sub>2</sub>	Vol. %	1 - 15
Sulfure d'hydrogène H <sub>2</sub> S	ppm	10 - 4.000
Oxygène O <sub>2</sub>	Vol. %	0.2 - 0.5
Hydrocarbures CF	Mg/m <sup>3</sup>	0 - 3.000
Eau H <sub>2</sub> O	RH %	100
Température	° C.	10 - 60
Valeur calorique	kWh/m <sup>3</sup>	6 - 7.5

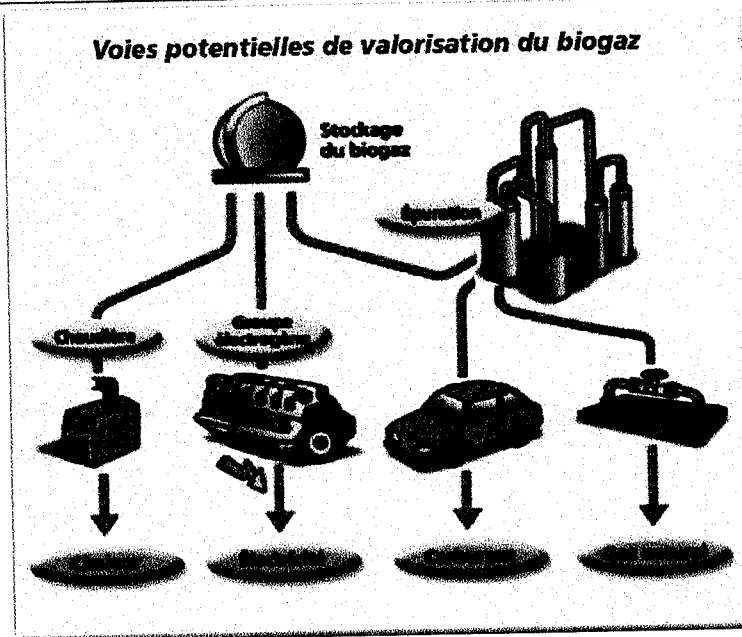
Tableau III. 1: Composition du biogaz

### 3) Valorisation énergétique

Le biogaz est convertible en pratiquement toutes les formes utiles d'énergie. Certaines applications sont largement développées et l'offre industrielle et commerciale est solidement établie pour :

- ✓ l'utilisation directe en chaudière : production de chaleur, eau chaude ou de vapeur
- ✓ la production d'électricité
- ✓ la production combinée d'électricité et de chaleur par cogénération
- ✓ gaz naturel après épuration (voir aussi la directive européenne sur le gaz naturel)
- ✓ carburant automobile après épuration et compression

D'autres voies sont au stade de la recherche et développement : production d'hydrogène, pile à combustible, production de froid par absorption.



**Figure III. 6 : les voies potentielles de valorisation du biogaz**

D'une manière générale, les valorisations thermiques nécessitent des débouchés de proximité : il peut s'agir de consommateurs externes au site de production (industries, réseaux de chaleur...) ou d'usages internes. Généralement une partie du biogaz produit est utilisée pour maintenir le digesteur à la température de fermentation (généralement 37°C ou 55°C). Cette consommation interne du procédé représente environ 15 à 30 % de la production. L'énergie est parfois utilisée pour déshydrater les boues. Lorsqu'il n'y a pas de débouchés de proximité, la valorisation du biogaz nécessite son exportation sur les réseaux de distribution : électricité ou gaz naturel.

Nous donnerons les principes généraux des différentes voies de valorisation du biogaz sans entrer dans les détails techniques de la production d'énergie. Par contre il nous a semblé important d'apporter un éclairage sur les conditions réglementaires de fourniture d'énergie sous forme de chaleur et/ou d'électricité.

#### **4) Utilisations et avantages**

Le biogaz est un biocarburant présentant de nombreux avantages :

\*réduction des émissions de gaz à effet de serre, comme indiqué ci-dessus.

\*réduction de certains microbes dans les effluents agricoles (coliformes notamment<sup>7</sup>) ;

\*substitut à d'autres énergies exogènes (fossile et nucléaire), source de revenus pour l'exploitant qui économise sur ses dépenses énergétiques et/ou, de plus en plus vend son énergie.[12]

\*diminution de la charge en carbone des déchets végétaux. Une fois digérés, les déchets sont moins nocifs pour l'environnement; le risque d'une pollution biologique ou organique est en outre largement amoindri, et la fermentation diminue le pourcentage de matière sèche, permettant de diminuer le volume à transporter et épandre.[13]

\*Il peut aussi être injecté sur le réseau de gaz naturel moyennant raffinage<sup>2</sup>. C'est la solution qui offre le meilleur rendement énergétique, si le réseau est assez proche du point de production. Cette solution se heurte aux réticences des groupes gaziers, comme l'a été l'injection d'électricité renouvelable pour EDF. En France, l'Afsset a récemment conclu que l'injection de biogaz épuré dans le réseau ne posait pas de problème sanitaire particulier<sup>8</sup>.

Les utilisations du biogaz sont par exemple :

\*combustion dans un moteur à gaz ou une petite turbine, pour produire de l'électricité injectée sur le réseau (plus de 4 000 installations en Allemagne), et souvent de la chaleur en cogénération, mais une trigénération est possible.

\*alimentation de centrale thermoélectrique, cimenterie, chaufferie collective, etc. quand il en existe près de la source;

\*chauffage et enrichissement en CO<sub>2</sub> de serres;

\*carburant pour véhicules GNV, en substitution au gaz naturel fossile du réseau classique. Il alimente des flottes captives (autobus, bennes à ordures, véhicules de service) (voir biogaz carburant), ou même les véhicules individuels (Suisse et Suède).

\*reformage du méthane pour former de l'hydrogène renouvelable (dit biohydrogène); comme pour l'injecter dans le réseau, il faut alors extraire le CO<sub>2</sub>, l'eau, les composés soufrés du biogaz pour obtenir un gaz composé à plus de 96 % de CH<sub>4</sub> substituable au gaz naturel fossile. Pour les autres applications, un gaz contenant 60 % de méthane est largement suffisant, donc le purifier serait une dépense inutile. On se contente alors



---

d'enlever les impuretés qui présentent des problèmes de pollution, de corrosion ou d'odeur, notamment les composés soufrés.

## Conclusion

---

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés <sup>à</sup> ~~par~~ la méthanisation qui <sup>représente</sup> ~~est~~ une voie biochimique de conversion de biomasse. La biométhanisation dite aussi fermentation anaérobique est un processus de dégradation de la matière en absence total d'oxygène.

Nous avons présenté les différentes étapes de méthanisation ainsi que leurs impacts environnemental et économique. Nous avons décrit les produits issus de la digestion anaérobique spécialement au biogaz.

Nous nous sommes intéressés au biogaz car le but de notre étude c'est obtenir une énergie renouvelable. Le biogaz est un gaz inflammable car il contient du méthane, il est utilisable dans plusieurs domaines et il a des avantages économique ainsi que énergétique.

## ***Bibliographie***

1. 4503154 *Anaerobic digestion of organic waste for biogas production: Robert Paton assigned to Biorganic Energy Inc.* Biotechnology Advances, 1985. **3**(1): p. 148.
2. A.H.D, *Anaerobic digestion plant for pig waste.* Agriculture and Environment, 1974. **1**(2): p. 202-204.
3. Adl, M., K. Sheng, and A. Gharibi, *Technical assessment of bioenergy recovery from cotton stalks through anaerobic digestion process and the effects of inexpensive pre-treatments.* Applied Energy, 2012. **93**(0): p. 251-260.
4. Alkan-Ozkaynak, A. and K.G. Karthikeyan, *Anaerobic digestion of thin stillage for energy recovery and water reuse in corn-ethanol plants.* Bioresource Technology, 2011. **102**(21): p. 9891-9896.
5. *System and process for anaerobic digestion of waste materials.* Stewart Erickson. Environment International, 1991. **17**(1): p. XIV.
6. Agler, M.T., et al., *Anaerobic digestion of brewery primary sludge to enhance bioenergy generation: A comparison between low- and high-rate solids treatment and different temperatures.* Bioresource Technology, 2010. **101**(15): p. 5842-5851.

7. Ahring, B.K., A.A. Ibrahim, and Z. Mladenovska, *Effect of temperature increase from 55 to 65°C on performance and microbial population dynamics of an anaerobic reactor treating cattle manure*. Water Research, 2001. **35**(10): p. 2446-2452.
8. Álvarez, J.A., I. Ruíz, and M. Soto, *Anaerobic digesters as a pretreatment for constructed wetlands*. Ecological Engineering, 2008. **33**(1): p. 54-67.
9. Hilkih Igoni, A., et al., *Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste*. Applied Energy, 2008. **85**(6): p. 430-438.
10. Hassan Dar, G. and S.M. Tandon, *Biogas production from pretreated wheat straw, lantana residue, apple and peach leaf litter with cattle dung*. Biological Wastes, 1987. **21**(2): p. 75-83.
11. Hernandez, J.E. and R.G.J. Edyvean, *Inhibition of biogas production and biodegradability by substituted phenolic compounds in anaerobic sludge*. Journal of Hazardous Materials, 2008. **160**(1): p. 20-28.
12. Jagadeesh, K.S., G.S. Geeta, and T.K.R. Reddy, *Biogas production by anaerobic digestion of Eupatorium odoratum L*. Biological Wastes, 1990. **33**(1): p. 67-70.
13. Jingura, R.M. and R. Matengaifa, *Optimization of biogas production by anaerobic digestion for sustainable energy development in Zimbabwe*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009. **13**(5): p. 1116-1120.

## I. Matériels et Méthodes de purification

### I.1. Matériel utilisé

Le matériel utilisé dans les expériences d'épuration du biogaz est :

- Des poches médicales en plastique (au moins 2 poches: une pour l'alimentation de l'épurateur avec du biogaz brut, et l'autre pour la récupération du biogaz épuré).
- Des tuyaux de raccordement pour assurer une bonne circulation du biogaz entre la poche d'alimentation et celle de récupération en évitant le mieux possible les fuites possibles du gaz ou les infiltrations d'air à l'intérieur des poches.
- Une fiole en verre d'une capacité de 500 ml.
- Un bouchon avec deux tubes en verre l'un descend jusqu'à l'intérieur de la solution pour assurer l'introduction du gaz provenant de la poche de l'alimentation et le contact gaz-liquide; et l'autre pour recueillir le gaz épuré sortant de la solution vers la poche de récupération différents solutions chimiques ou solvants physiques, avec différentes concentrations pour l'absorption des constituant indésirable du biogaz ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,...).

La figure V.1 montre le dispositif expérimental utilisé pour la purification du biogaz produit.

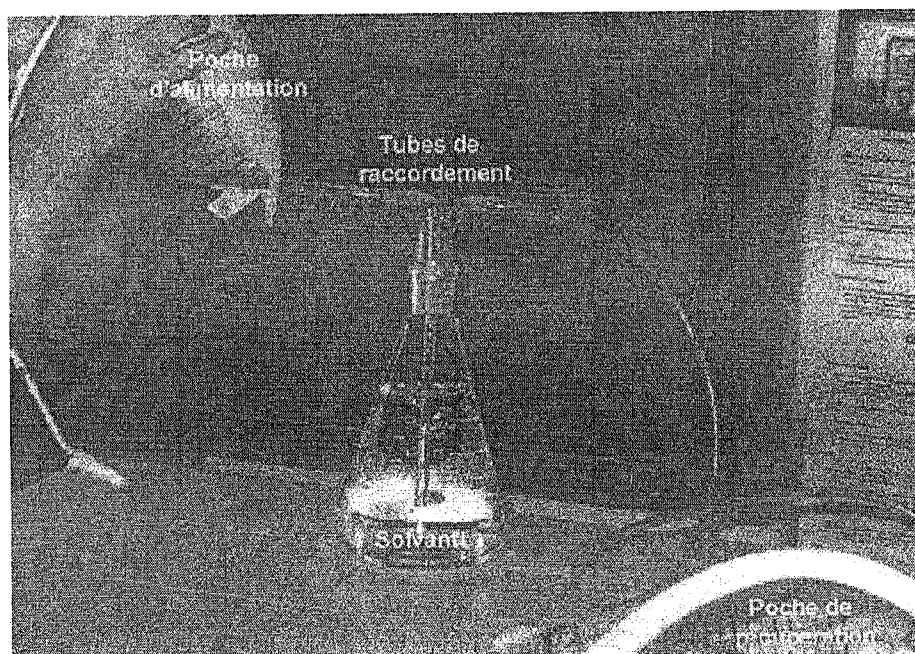


Figure IV. 1: dispositif expérimental de l'épuration [1]

## I.2. Méthode utilisé

A partir du matériel et des produits mis a notre disposition, nous réalisons une simple procédé d'épuration basé sur le principe d'absorption gaz-liquide, par barbotage direct du gaz dans le liquide. Le biogaz récupéré après le premier passage est en suite recyclé en plusieurs fois dans la même solution afin d'obtenir un pourcentage en CO<sub>2</sub>, le plus minimum possible.

Les résultats obtenue des différents expériences effectués avec différentes solutions est en plusieurs concentrations sont donnés dans ce qui suit.

## II. Conditions opératoires lors de l'analyse des échantillons

Le chromatographe utilisé est de type HP5890 série II il est équipé :

- D'un détecteur a conductibilité thermique (T.C.D:thermal conductivity detector);
- D'une colonne remplie par une phase stationnaire (silicone DC 200),
- D'un support (chromosorb P). [2]

Les conditions opératoires réunies lors de l'analyse des échantillons sont :

- Température isotherme de la colonne =130 °C
- Température e détecteur =180 °C
- Injection par vanne est la température de la chambre d'injection =135 °C
- Un gaz vecteur ( Hélium N60 ), et de débit =25 cc/min. [3]

## III. Résultats et discussions

### III.1. Détermination du % molaire a partir des chromatogramme

La détermination du % molaire du constituant à partir du chromatogramme phase gazeuse est très simple il suffit de :

- Lire la surface des pics détectés
- Connaître le coefficient de correction du constituant
- Appliquer la formule A.

## Chapitre IV Purification du biogaz produit obtenu à partir de la méthanisation

- Les coefficients de corrections des constituants sont tabulés sur le logiciel de calcul de CRD (Boumerdès). Nous intéressons au trois constituants composant le biogaz qui sont : (N<sub>2</sub>; CO<sub>2</sub>; CH<sub>4</sub>)

Constituant	Coef.corr
N <sub>2</sub>	6.24 10 <sup>-6</sup>
CH <sub>4</sub>	8.86 10 <sup>-6</sup>
CO <sub>2</sub>	5.76 10 <sup>-6</sup>

- La formule suivante nous permet de déterminer le % molaire y<sub>i</sub> du constituant « i » a partir du chromatogramme.

$$y_i = \frac{(surf)_i \times (coef.corr)_i}{\sum_i [(surf)_i \times (coef.corr)_i]} \times 100 \quad \dots\dots\dots A$$

Avec : y<sub>i</sub> : Le % molaire de constituant « i ».

(Surf)<sub>i</sub> : La surface du pic correspond au constituant « i » lu a partir de chromatogramme.

(Coef.corr)<sub>i</sub> : Le coefficient de correction du constituant « i ».

### III.2. Résultats expérimentaux

Pour faire l'épuration puis analyser par CPG du biogaz produit, ~~pe~~ prépare d'abord trois solutions identiques et de même concentrations dans trois fioles distinctes de 500 ml, puis on fait le prélèvement de quatre échantillons du digesteur dans des poches médicales en plastique: un premier pour le faire passer en une seule fois dans la solution de la première fiole, un deuxième pour le faire passer en deux fois dans la même solution de la première fiole, un troisième pour le faire passer en trois fois dans la même solution de la troisième fiole et un dernier pour l'analyser directement sans épuration (comme témoin).

Nous utilisons les solutions suivantes; le NaOH ; lait de chaux ; l'acétone ; l'eau; et le KOH (potasse). [4]

➤ **NaOH :**

La solution absorbante du CO<sub>2</sub> utilisé est la solution aqueuse de NaOH avec quatre concentrations. Les résultats sont présentés sur les tableaux : IV.1 ; IV.2 ; IV.3 et IV.4.

Concentration de NaOH :

- 1mol/l.

1

constituants	% des constituants dans le biogaz avant épuration	% des constituants dans le biogaz après épuration		
	Témoin	1 passage	2 passages	3 passages
N <sub>2</sub>	8.1	17.3	14.9	22.2
CH <sub>4</sub>	59.1	62.0	71.1	69.8
CO <sub>2</sub>	32.5	20.7	14.0	8.0
PCI	5.87	6.16	7.07	6.94

Tableau IV. 1: Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec le NaOH d'une concentration de 1mol/

Taux de diminution du CO<sub>2</sub> (%)= 75.4%

- 2 mol/l.

constituants	% des constituants dans le biogaz avant épuration	% des constituants dans le biogaz après épuration		
	Témoin	1 passage	2 passages	3 passages
N <sub>2</sub>	27.4	21.6	26.4	30.1
CH <sub>4</sub>	52.3	65.3	68.9	68.3
CO <sub>2</sub>	20.3	13.1	4.7	1.6
PCI	5.19	6.5	6.84	6.79

Tableau IV. 2: Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec le NaOH d'une concentration de 2mol/l

Taux de diminution du CO<sub>2</sub> (%)= 92.1 %

- 3 mol/l.

constituants	% des constituants dans le biogaz avant épuration	% des constituants dans le biogaz après épuration		
	Témoin	1 passage	2 passages	3 passages
N <sub>2</sub>	2.6	15.9	18.9	17.0
CH <sub>4</sub>	64.1	66.7	72.3	76.2
CO <sub>2</sub>	33.0	17.4	8.8	6.8
PCI	6.4	6.63	7.18	7.57

Tableau IV. 3: Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec le NaOH d'une concentration de 3mol/l

Taux de diminution du CO<sub>2</sub> (%)= 79.4 %

- 4mol/l.

constituants	% des constituants dans le biogaz avant épuration	% des constituants dans le biogaz après épuration		
	Témoin	1 passage	2 passages	3 passages
N <sub>2</sub>	4.12	13.1	17.1	18.4
CH <sub>4</sub>	62.0	65.3	71.8	75.3
CO <sub>2</sub>	33.8	21.6	10.8	6.3
PCI	6.16	6.5	7.13	7.5

Tableau IV. 4: Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec le NaOH d'une concentration de 4mol/l

Taux de diminution du CO<sub>2</sub> (%)= 81.4 %



La figure IV. 2 accumule les résultats des expériences de l'épuration du biogaz avec le NaOH avec différentes concentrations et nous voyons clairement que le PCI augmente avec le nombre de passages et aussi avec la concentration du CO<sub>2</sub>.

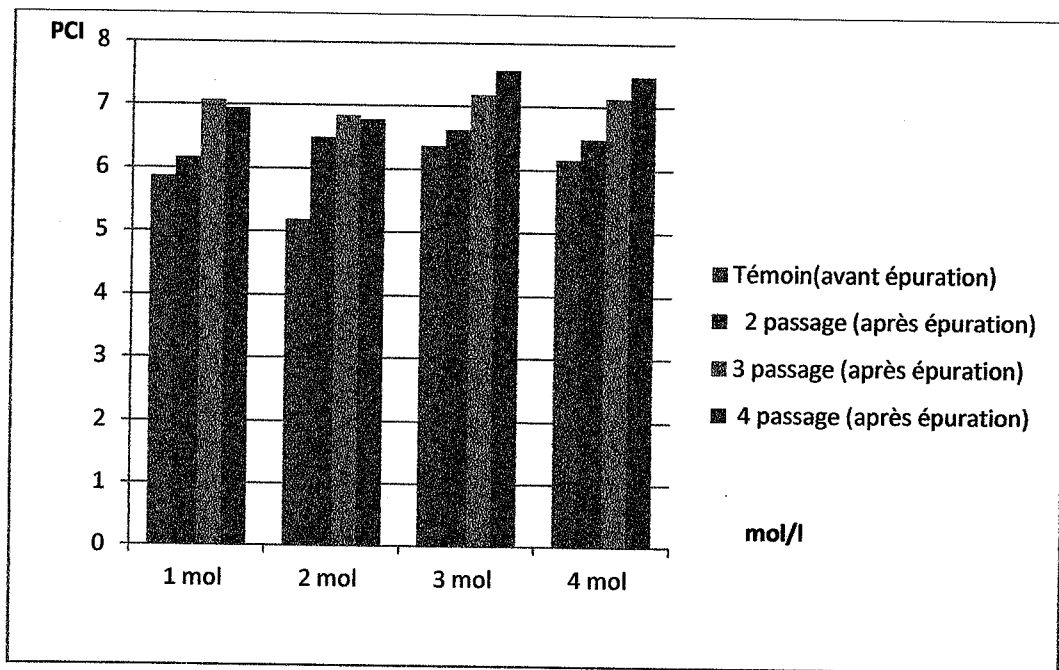


Figure IV. 2 : Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec le NaOH d'une concentration de 1 mol/l à 4 mol/l.

Tableau IV. 5 : Tableau récapitulatif de résultats (NaOH)

Concentration du NaOH	1	2	3	4
Taux de diminution du CO <sub>2</sub> (%)	75.4	92.2	79.4	81.4

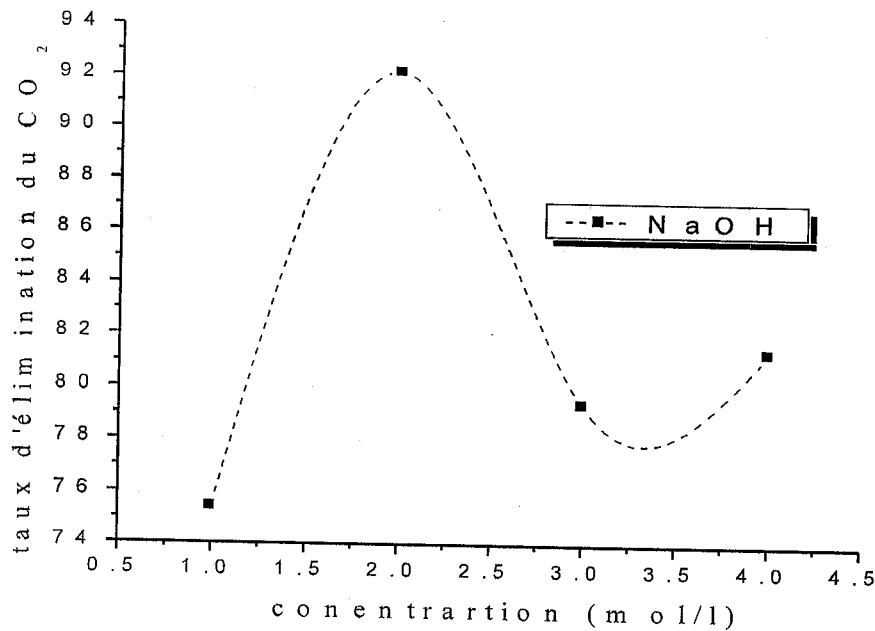


Figure IV. 3 : Taux d'élimination du CO<sub>2</sub> dans le biogaz suivant les différents concentrations : cas du NaOH

➤ **Pour L'eau :**

Choisissons maintenant une nouvelle solution c'est l'eau et nous prenons les résultats à partir du CPG pour déterminer le % de chaque constituant et conclure le taux de diminution du CO<sub>2</sub>.

La solution absorbante du CO<sub>2</sub> l'eau était utilisé avec **une concentration 2mol/l** ; dans les conditions ambiant de température et de pression. [5]

Les résultats obtenue sont donnée sur le tableau V.5.

constituants	% des constituants dans le biogaz avant épuration	% des constituants dans le biogaz après épuration		
	Témoin	1 passage	2 passages	3 passages
N <sub>2</sub>	4.2	13.5	16.9	24.6
CH <sub>4</sub>	60.7	56.3	56.1	50.8
CO <sub>2</sub>	35.1	30.2	27.0	24.6
PCI	6.03	6.0	6.0	5 ;05

Tableau IV. 6 : Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec l'eau d'une concentration de 2mol/l

Taux de diminution du CO<sub>2</sub> (%)= 29.9 %

La figure IV. 4 représente les résultats de l'épuration du biogaz avec l'eau et nous remarquons que le PCI diminue après purification car le pourcentage du CH<sub>4</sub> diminue donc l'utilisation de l'eau dans l'épuration n'est pas intéressante.

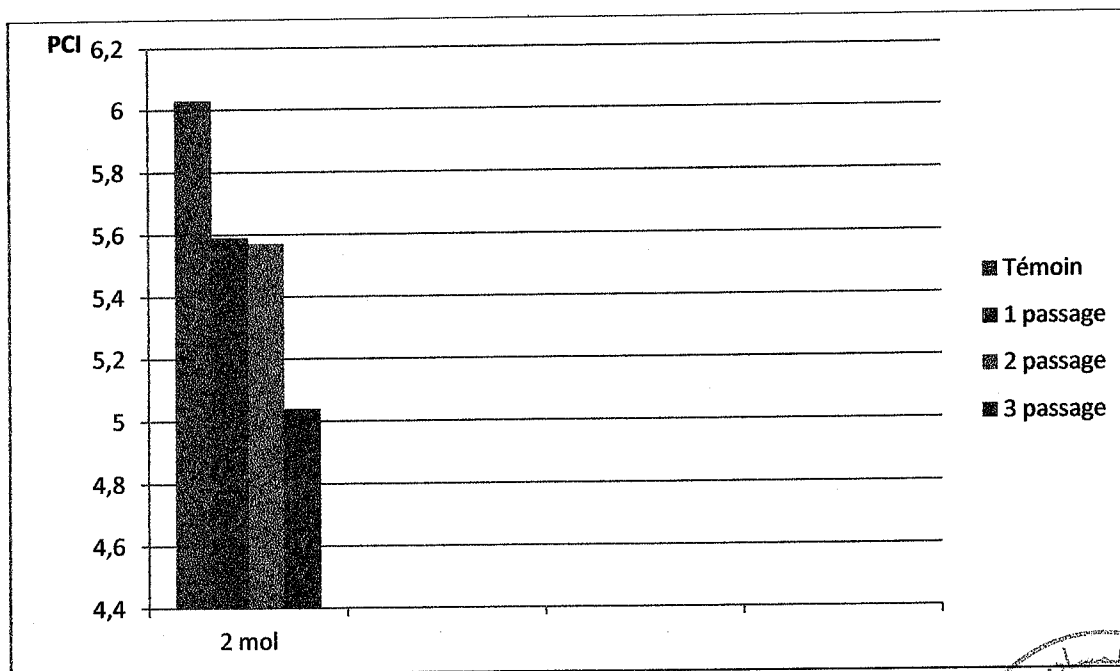
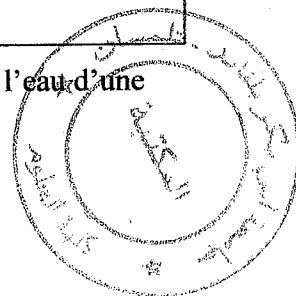


Figure IV. 4 : Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec l'eau d'une concentration de 2mol/l.



➤ **Pour L'acétone :**

La solution absorbant utilisé c'est l'acétone d'une concentration de 2mol/l ; dans les conditions ambiante de température et de pression. [5]

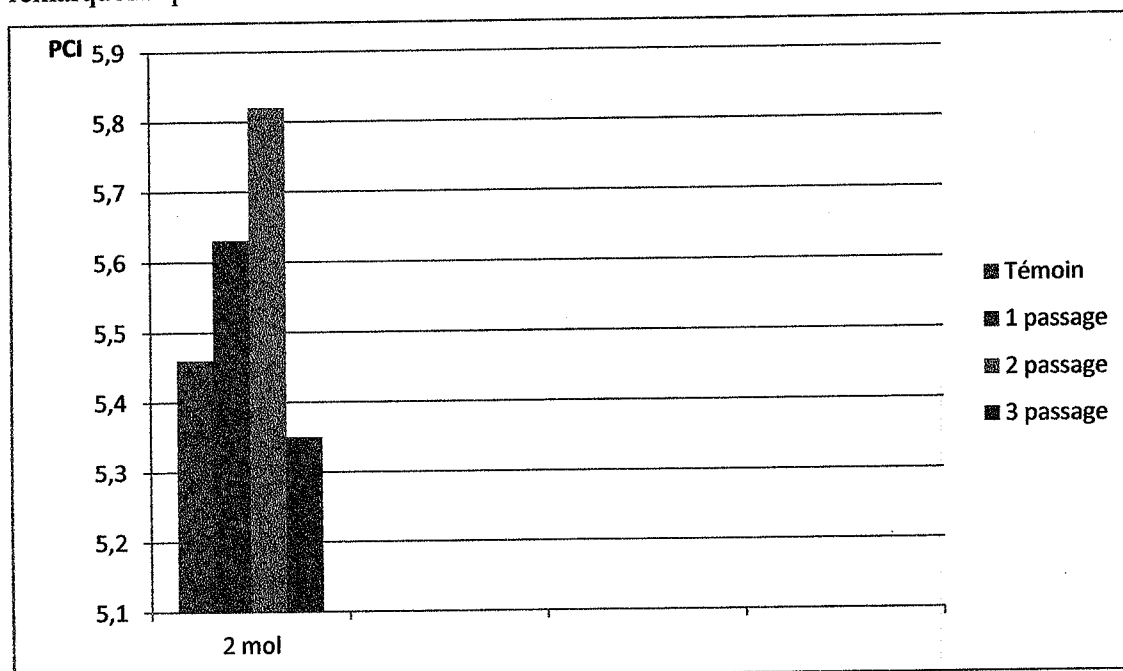
Les résultats obtenus sont donnée sur le tableau V.6.

Constituants	% des constituants dans le biogaz avant épuration	% des constituants dans le biogaz après épuration		
	Témoin	1 passage	2 passages	3 passages
N <sub>2</sub>	15.4	15.3	13.9	23.3
CH <sub>4</sub>	55.0	56.7	58.6	53.9
CO <sub>2</sub>	29.6	28.0	27.5	22.8
PCI	5.5	5.63	5.82	5.36

**Tableau IV. 7:** Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec l'acétone d'une concentration de 2mol/l

**Taux de diminution du CO<sub>2</sub> (%)= 23 %**

La figure IV. 5 représente les résultats de l'épuration du bu biogaz avec l'acétone et nous remarquons que le PCI est maximum dans le deuxième passage après purification



**Figure IV. 5 :** Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec l'acétone d'une concentration de 2mol/l.

➤ **Pour lait de chaux :**

La solution absorbante du CO<sub>2</sub> utilisé est une suspension de lait de chaux avec trois concentrations. Les résultats sont données sur les tableaux : V.8; V.9 et V.10

Concentration de Lait de chaux :

- 1mol/l

constituants	% des constituants dans le biogaz avant épuration	% des constituants dans le biogaz après épuration		
	Témoin	1 passage	2 passages	3 passages
N <sub>2</sub>	5.5	12.5	22.7	17.6
CH <sub>4</sub>	64.1	62.5	59.4	65.7
CO <sub>2</sub>	30.4	25.0	17.9	16.7
PCI	6.37	6.21	5.9	6.53

Tableau IV. 8: Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec lait de chaux d'une concentration de 1mol/l

Taux de diminution du CO<sub>2</sub> (%)=45.1 %

- 2mol/l :

constituants	% des constituants dans le biogaz avant épuration	% des constituants dans le biogaz après épuration		
	Témoin	1 passage	2 passages	3 passages
N <sub>2</sub>	1.9	5.6	18.2	15.9
CH <sub>4</sub>	63.6	65.4	61.3	65.5
CO <sub>2</sub>	34.5	29.0	20.5	18.6
PCI	6.32	6.5	6.1	6.51

Tableau IV. 9: Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec lait de chaux d'une concentration de 2mol/l

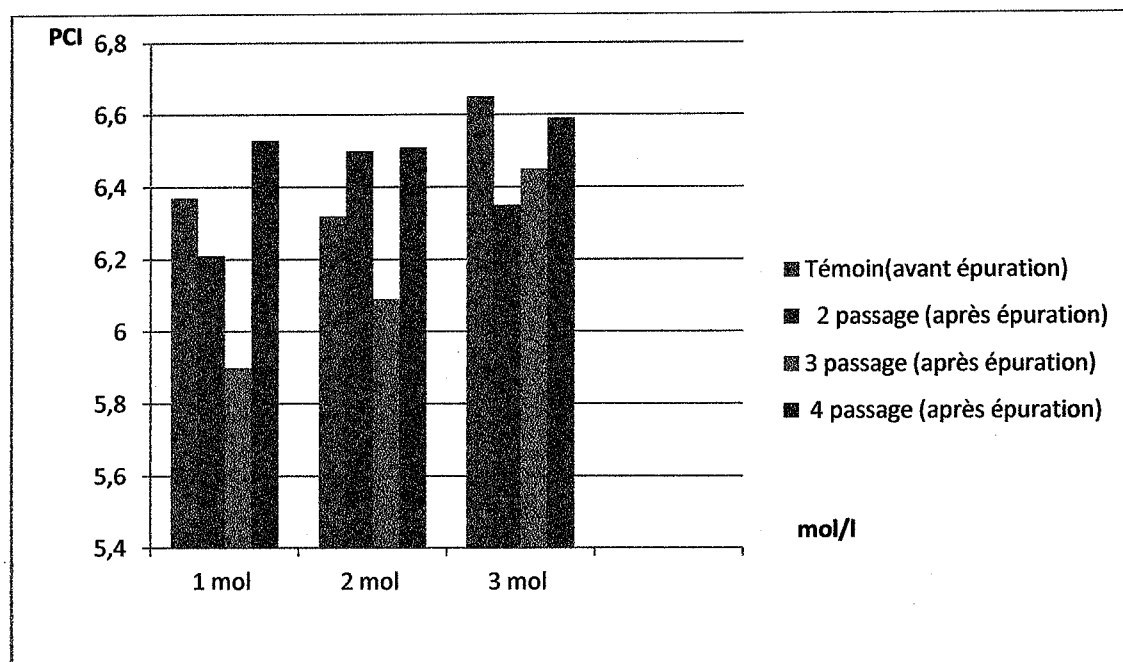
\*Taux de diminution du CO<sub>2</sub> (%)= 46.1 %

- 3mol/l:

**Tableau IV. 10:** Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec lait de chaux d'une concentration de 3mol/l

constituants	% des constituants dans le biogaz avant épuration	% des constituants dans le biogaz après épuration		
	Témoin	1 passage	2 passages	3 passages
N <sub>2</sub>	3.1	12.6	17.3	20.4
CH <sub>4</sub>	67.0	63.9	64.9	66.3
CO <sub>2</sub>	29.9	23.5	17.8	13.3
PCI	6.66	6.35	6.45	6.6

La figure V.6 Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec la variation de la concentration du lait de chaux de 1mol/l à 3mol/l.



**Figure IV. 6 :** Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec le lait de chaux d'une concentration de 1mol/l à 3mol/l.

Taux de diminution du  $\text{CO}_2$  (%) = 55.5%

Tableau IV. 11 : Tableau récapitulatif de résultats (lait de chaux)

Concentration du lait de chaux	1	2	3
Taux de diminution du $\text{CO}_2$ (%)	45.1	46.1	55.5

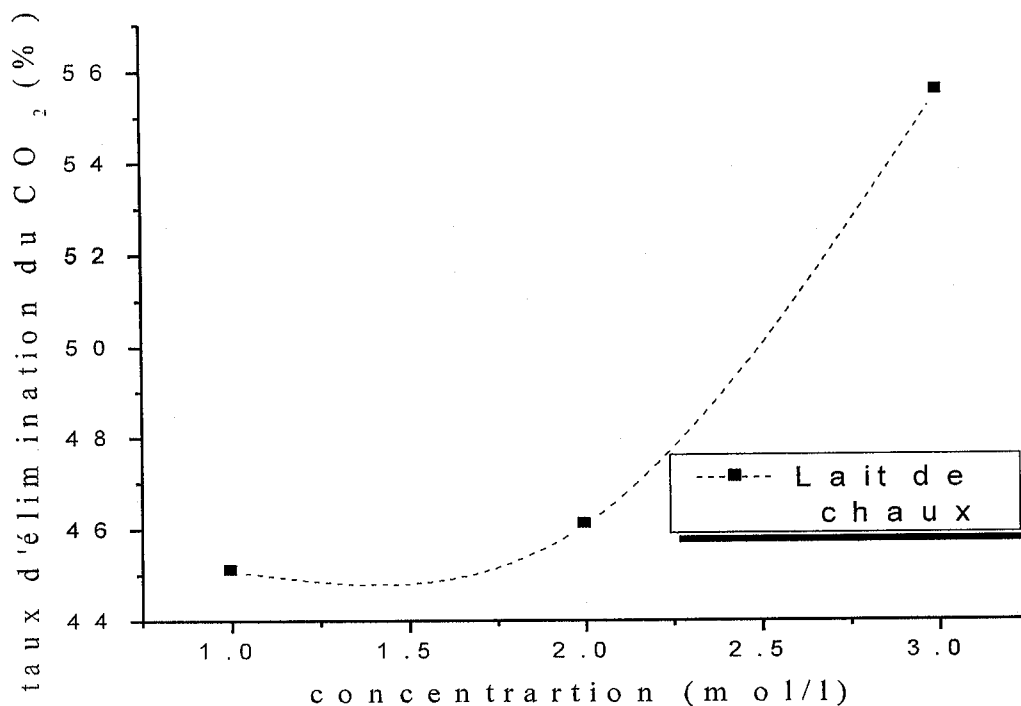


Figure IV. 7 : Taux d'élimination du  $\text{CO}_2$  dans le biogaz suivant les différentes concentrations : cas du lait de chaux

#### ➤ Pour KOH

La solution absorbante du  $\text{CO}_2$  utilisé est la solution aqueuse de KOH avec trois concentrations. Les résultats sont données sur les tableaux : V.12; V.13 et V.14

Concentration de KOH :

- 1mol/l

constituants	% des constituants dans le biogaz avant épuration	% des constituants dans le biogaz après épuration		
	Témoin	1 passage	2 passages	3 passages
N <sub>2</sub>	5.6	18.4	19.4	30.0
CH <sub>4</sub>	70.7	68.2	72.5	65.7
CO <sub>2</sub>	23.7	13.2	8.1	4.3
PCI	7.03	6.78	7.21	6.53

Tableau IV. 12: Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec le KOH d'une concentration de 1mol/l

Taux de diminution du CO<sub>2</sub> (%)=81.9 %

- 2mol/l

constituants	% des constituants dans le biogaz avant épuration	% des constituants dans le biogaz après épuration		
	Témoin	1 passage	2 passages	3 passages
N <sub>2</sub>	5.5	13.4	21.6	20.0
CH <sub>4</sub>	75.4	78.5	75.2	78.8
CO <sub>2</sub>	19.1	8.1	3.2	1.2
PCI	7.49	7.8	7.5	7.83

Tableau IV. 13: Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec le KOH d'une concentration de 2mol/l



Taux de diminution du CO<sub>2</sub> (%)= 93.7 %

• 3mol/l

constituants	% des constituants dans le biogaz avant épuration	% des constituants dans le biogaz après épuration		
	Témoin	1 passage	2 passages	3 passages
N <sub>2</sub>	4.4	20.3	18.1	19.5
CH <sub>4</sub>	75.6	73.7	79.5	79.6
CO <sub>2</sub>	20.0	6.0	2.6	0.6
PCI	7.51	7.32	7.9	7.91

Tableau IV. 14: Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec le KOH d'une concentration de 3mol/l

Taux de diminution du CO<sub>2</sub> (%)= 97 %

La figure V.8 Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec la variation de la concentration du KOH de 1mol/l à 3mol/l.

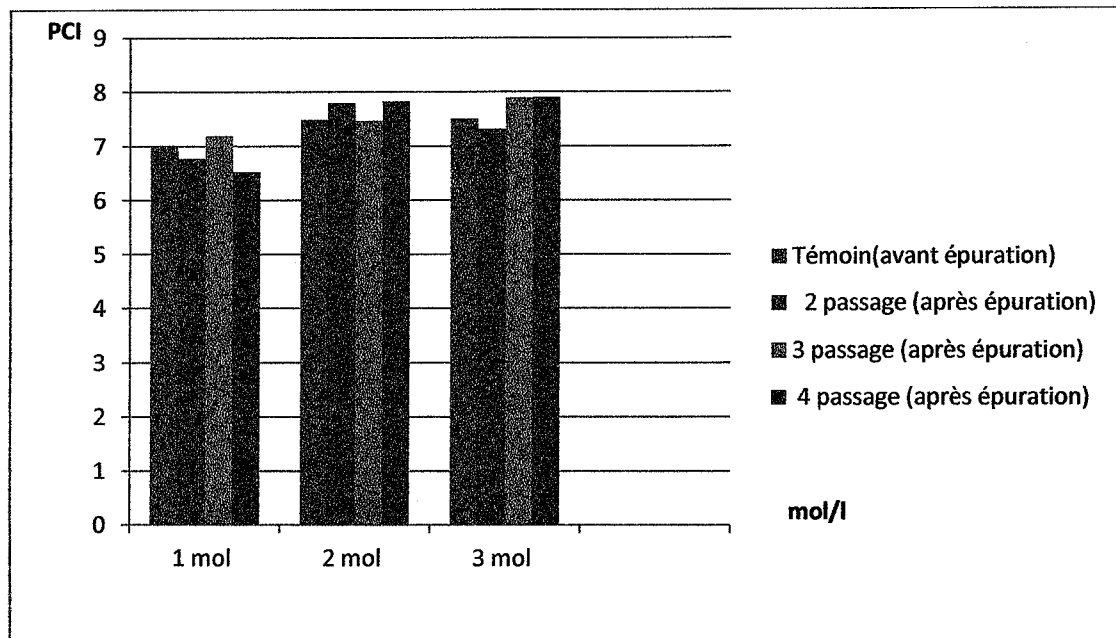
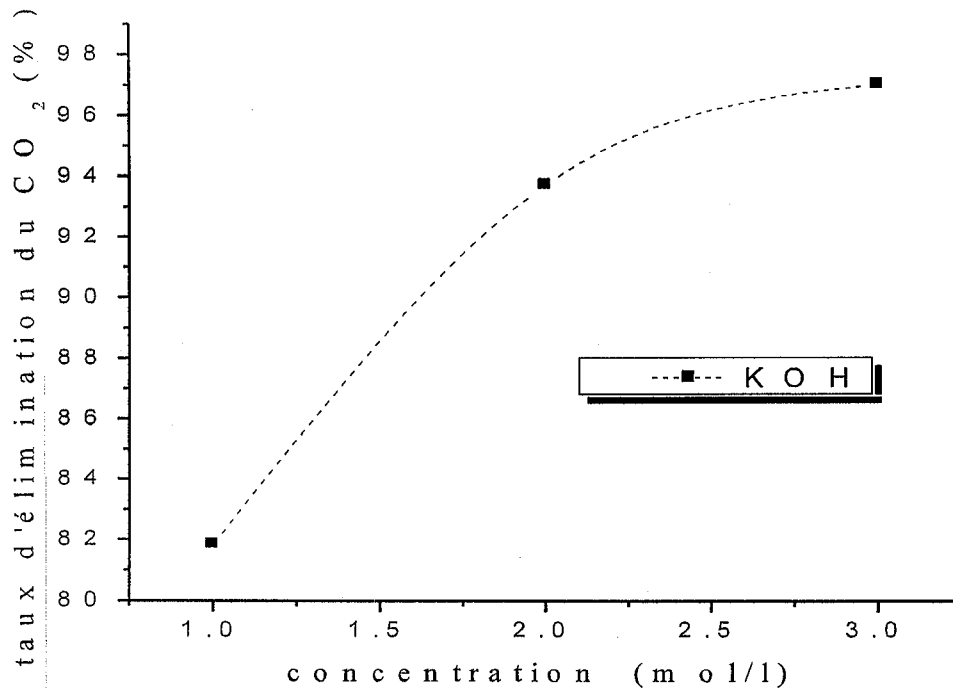


Figure IV. 8: Les résultats obtenus lors de l'épuration du biogaz avec le KOH d'une concentration de 1mol/l à 3mol/l.

Tableau IV. 15 : Tableau récapitulatif de résultats (KOH)

Concentration du KOH(potasse)	1	2	3
Taux de diminution du CO <sub>2</sub> (%)	81.9	93.7	97

Figure IV. 9 : Taux d'élimination du CO<sub>2</sub> dans le biogaz suivant les différentes concentrations: cas du KOH

#### IV. Discussions et interprétations des résultats

Nous interprétons nos résultats obtenus par rapport à la quantité de CO<sub>2</sub> éliminé ou absorbé. Pour cela nous avons introduit un autre critère de comparaison entre les différentes expériences effectuées, il s'agit de taux d'élimination du CO<sub>2</sub>, pour mieux illustrer les sens de variation des résultats obtenus, et de bien comparer entre les différentes solutions utilisées pour choisir la solution la plus efficace parmi elle.

## Chapitre IV Purification du biogaz produit obtenu à partir de la méthanisation

---

Pour le NaOH nous remarquons que quand nous augmentons la concentration, le taux d'élimination du CO<sub>2</sub> augmente; diminue puis augmente de nouveau. Ceci est dû qu'il s'agit de nos premières expériences où nous n'avons pas encore donné importance au débit du gaz introduit dans le solvant alors que ce facteur joue un rôle répondant sur le phénomène d'absorption gaz\_liquide. Les taux d'élimination du CO<sub>2</sub> obtenue avec la soude étaient importants, ils varient entre 75et 92%.

Avec l'eau et l'acétone l'absorption est purement physique, nous n'avons même pas pu atteindre un taux d'élimination en CO<sub>2</sub> de 30%. Ceci explique par le fait que les procédés d'absorption physique exigent des conditions opératoires bien spécifiées (pressions élevées, et basses températures), alors que nous avons travaillé dans les conditions ambiantes de température et de pression (20 à 25 °C sous 1 atm).

En ce qui concerne le lait de chaux, nous avons pu atteindre des taux d'élimination en CO<sub>2</sub> avoisinant les 50%, ceci peut être considéré important s'il s'agit d'une valorisation du biogaz qui n'exige pas une épuration poussée de ce dernier comme c'est le cas de la production de la chaleur, d'électricité ou en cogénération. [6]

Enfin dans le cas de concentration de potasse (3mol/l); nous avons pu éliminer le CO<sub>2</sub> jusqu'à 97. Ceci paraît important du fait que nous utilisons un procédé de barbotage direct du gaz dans le liquide, et nous n'avons même pas assuré le contact entre les deux phases par un garnissage des plateaux.

Pour faire une comparaison globale (remarquable) entre les 3 solutions nous avons introduit un autre critère; il s'agit de pourcentage du CO<sub>2</sub> dans le biogaz durant les différents expériences (nous prenons le cas où la concentration égale 3mol/l).

Donc pour calculer le % du CO<sub>2</sub> dans le biogaz dans les 3 expériences (1 passage, 2 passages et 3 passages); nous considérons que le % de CO<sub>2</sub> dans le biogaz témoin égale à 100%.

	Témoin	1 passage	2 passages	3 passages
NaOH	100	52.7	26.7	20.6
Lait de chaux	100	78.6	59.5	44.5
KOH	100	30	13	3

**Tableau IV. 16:** Le % du CO<sub>2</sub> dans le biogaz en fonction dans les 3 expériences dans les trois solutions (lait de chaux, NaOH, KOH): de même concentration (3mol/l).

➤ Méthode de calcul :

Pour le NaOH :

**Témoin :** Le % du CO<sub>2</sub> dans le biogaz témoin égale 33; considérons qu'il représente 100%

**1 passage:** Le % du CO<sub>2</sub> égale 17.4; calculons le % du CO<sub>2</sub> dans le biogaz par rapport au % du CO<sub>2</sub> dans le biogaz témoin.

**2 passages :** Le % du CO<sub>2</sub> égale 8.8; calculons le % du CO<sub>2</sub> dans le biogaz par rapport au % du CO<sub>2</sub> dans le biogaz témoin.

**3 passages :** Le % du CO<sub>2</sub> égale 6.8; calculons le % du CO<sub>2</sub> dans le biogaz par rapport au % du CO<sub>2</sub> dans le biogaz témoin.

Pour lait de chaux :

**Témoin :** Le % du CO<sub>2</sub> dans le biogaz témoin égale 29.9; considérons qu'il représente 100%

**1 passage:** Le % du CO<sub>2</sub> égale 23.5; calculons le % du CO<sub>2</sub> dans le biogaz par rapport au % du CO<sub>2</sub> dans le biogaz témoin.

**2 passages :** Le % du CO<sub>2</sub> égale 17.8; calculons le % du CO<sub>2</sub> dans le biogaz par rapport au % du CO<sub>2</sub> dans le biogaz témoin.

**3 passages :** Le % du CO<sub>2</sub> égale 13.3; calculons le % du CO<sub>2</sub> dans le biogaz par rapport au % du CO<sub>2</sub> dans le biogaz témoin.

Pour le KOH :

**Témoin :** Le % du CO<sub>2</sub> dans le biogaz témoin égale 20; considérons qu'il représente 100%

**1 passage:** Le % du CO<sub>2</sub> égale 6.0; calculons le % du CO<sub>2</sub> dans le biogaz par rapport au % du CO<sub>2</sub> dans le biogaz témoin.

**2 passages :** Le % du CO<sub>2</sub> égale 2.6; calculons le % du CO<sub>2</sub> dans le biogaz par rapport au % du CO<sub>2</sub> dans le biogaz témoin.

3 passages : Le % du CO<sub>2</sub> égale 0.6; calculons le % du CO<sub>2</sub> dans le biogaz par rapport au % du CO<sub>2</sub> dans le biogaz témoin.

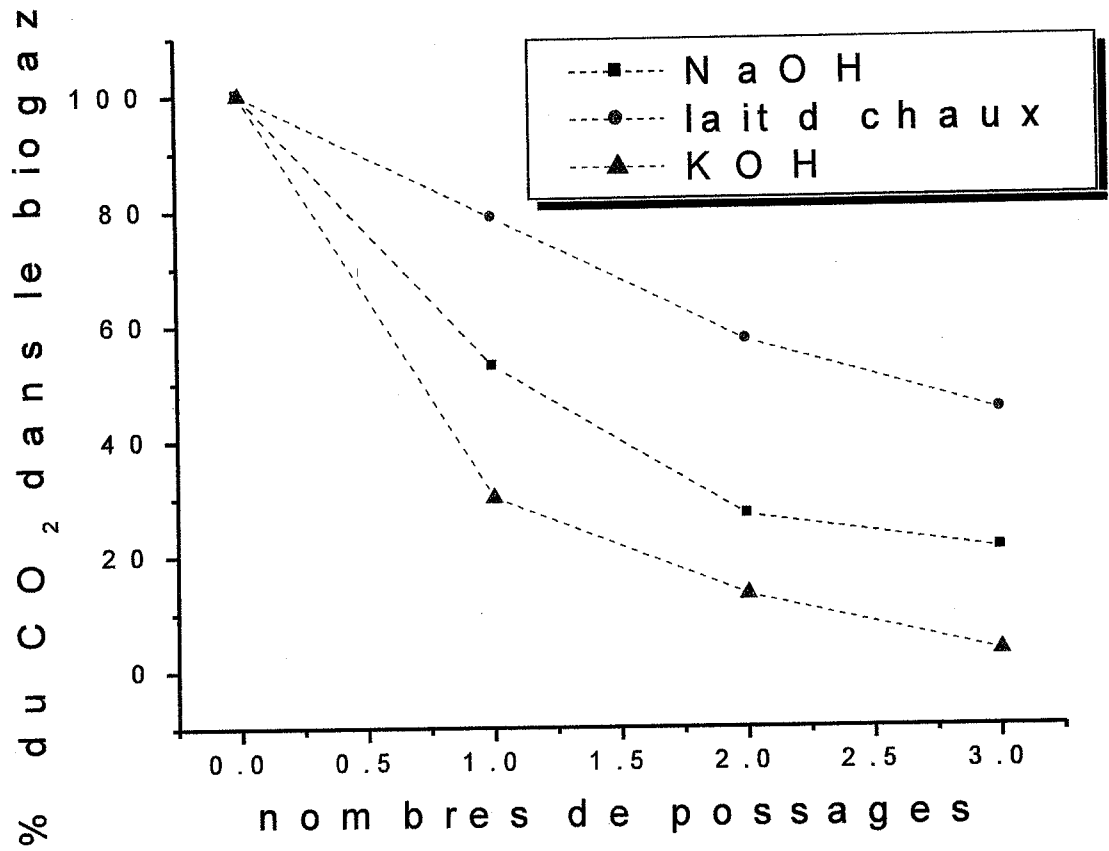


Figure IV. 10 : Evolution de % de CO<sub>2</sub> dans le biogaz en fonction du nombre de passages dans les trois solutions (lait de chaux, NaOH, KOH): de même concentration (3mol/l).

---

## Conclusion

---

Le but de notre étude c'est la purification du biogaz produit au cours de la biométhanisation. Le biogaz produit durant la biométhanisation a été a chaque foie prélevé du digesteur pour le purifier après l'analyser par le CPG au niveau de C.R.D Boumèrdès.

Différents solution a été utilisées (lait de chaux; NaOH; KOH; l'eau et l'acétone) pour l'absorption du CO<sub>2</sub> dans le biogaz produit; afin de comparer entre elles, et de choisir la solution la plus efficace pour une absorption meilleur.

D'après les résultats obtenus nous constatons que généralement la quantité de CO<sub>2</sub> dans le biogaz diminue d'une façon remarquable, d'une part, avec l'augmentation de la concentration de la solution utilisée; et d'autre part, avec l'augmentation du nombre de passage effectué du biogaz dans la même solution.

La méthode de purification utilise est basée sur la principe d absorption gaz – liquide par barbotage direct du gaz dans le liquide le biogaz récupère après un premier passage a été ensuite recycle en plusieurs fois dans la même solution afin d obtenir un pourcentage en CO<sub>2</sub> le plus minimum possible .en utilisant la même solution pour essayer de l'exploiter jusqu'à sa saturation et d'économiser ainsi la quantité du solvant utilisée.

Nous avons pu éliminer le CO<sub>2</sub> jusqu'à un taux de 97%, avec une solution de potasse d'une concentration de 3mol/l. ceci paraît important du fait qu'on a utilisé un procédé de barbotage direct du gaz dans liquide.

Donc en conclusion nous choisissons le KOH qui est la solution la plus efficace parmi celles utilisées pour la purification du biogaz produit lors de la biométhanisation.

## ***Bibliographie***

---

- [1] « **Contribution à la purification du biogaz issu des déjections bovines** » mémoire de fin d'étude » ENP 2002
- [2] Mesures Canada ; Un organisme d'Industrie Canada « **Gas Chromatograph** » Hewlett Packard 5890 Helium and Hydrogen only/seulement
- [3] « **CHROMATOGRAPHIE** » Edith Antonot Robert Marchal Janvie 1998  
\_METZ
- [4] L.M.Sun; F.Meunier « **Absorption: aspect théorique** » Technique de l'ingénieur : article [J2800], mars 2003.
- [5] P.Petit « **Séparation et liquéfaction des gaz** » Technique de l'ingénieur : article [J3600], décembre 1995.
- [6] J.F.Maillard; Ph. Lonchamppt « **valorisation énergétique des déchets végétaux : fermentation méthanique** » Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chassées, février 1984.

## Conclusion Générale

---

Les énergies renouvelables; qui ont beaucoup d'enjeux économiques et surtout environnementaux. Son utilisation ou plutôt sa conversion en énergie dégage moins de pollution que les énergies fossiles. Notre étude approfondie concerne la biomasse; l'utilisation de la biomasse comme matière première dans l'énergie renouvelable représente une alternative prometteuse aux ressources fossiles pour produire à la fois des biocarburants, de l'électricité et de la chaleur ainsi que des produits biobasés;

Elle permet de plus de:

- lutter contre le changement climatique via son effet neutre sur les émissions de CO<sub>2</sub>;
- sécuriser les approvisionnements en énergie dans un contexte de diminution des réserves pétrolières.

En plus, la valorisation énergétique du biogaz obtenu permet d'éviter les émissions de gaz à effet de serre qui auraient été induites dans les centrales classiques par une production équivalente.

La conversion biochimique implique essentiellement l'hydrolyse des polysaccharides de la biomasse, et la fermentation des sucres qui en résultent en éthanol. La conversion thermochimique implique essentiellement la gazéification, ou autre procédé thermique, de la biomasse, suivie de la synthèse catalytique (Fischer-Tropsch) ou de la fermentation du



gaz ou du liquide qui en résulte en biocarburants. Les carburants produits à partir de biomasse lignocellulosique sont communément appelés carburants cellulosesiques.

L'utilisation de ce gaz produit nécessite une épuration pour cela nous étudions l'épuration du biogaz. C'est une simple expérience basé sur le principe d'absorption du  $\text{CO}_2$  dans le biogaz produit. Nous utilisons différents solutions (lait de chaux;  $\text{NaOH}$ ;  $\text{KOH}$ ; l'eau et l'acétone); afin de comparer entre elles, et de choisir la solution la plus efficace pour une absorption meilleur. C'est à dire la solution qui nous donne un taux d'élimination le plus important.

D'après les résultats obtenus nous constatons que généralement la quantité de  $\text{CO}_2$  dans le biogaz diminue d'une façon remarquable, d'une part, avec l'augmentation de la concentration de la solution utilisée; et d'autre part, avec l'augmentation du nombre de passage effectué du biogaz dans la même solution.

Nous avons pu éliminer le  $\text{CO}_2$  jusqu'à un taux de 97%, avec une solution de potasse d'une concentration de 3mol/l. ceci paraît important du fait qu'on a utilisé un procédé de barbotage direct du gaz dans liquide.

Donc en conclusion nous choisissons le  $\text{KOH}$  qui est la solution la plus efficace parmi celles utilisées pour la purification du biogaz produit lors de la biométhanisation.

Donc ce biogaz peut être utilisé ou plutôt valoriser dans la production de chaleur, de l'électricité et aussi comme gaz carburant et peut être aussi injecté dan le réseau si le pourcentage du  $\text{CH}_4$  atteint 100%.