

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ahmed Draia – ADRAR
Faculté des Sciences et de la Technologie



Attestation de production Scientifique

Nous attestons, Président du conseil scientifique de la Faculté des sciences et de la technologie, que l'enseignant :

Monsieur : **KHELIFI Omar.**

Grade : **Maître de conférences classe « A ».**

A bien produit un polycopié dont l'intitulé est : « **Biomasses et Biocarburants** » pour l'année universitaire 2024/2025.

Le présent document pédagogique a fait l'objet d'une expertise sous l'égide du CSF de la faculté et a donné un avis favorable pour son édition et sa publication à la bibliothèque universitaire ainsi qu'au site web de l'université Ahmed Draia – ADRAR.

Le 07/05/2025
Président du CSF

رئيس المجلس العلمي
العلوم والتكنولوجيا
أ.د. بن عطيل علي

Fait pour valoir ce que le droit.

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère d'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ahmed Draïa – Adrar



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Hydrocarbure et Energies Renouvelables

Polycopie de cours :

BIOMASSES ET BIOCARBURANTS

Unité d'Enseignement Découverte : UED 3.1

« Cours En ligne »

Destinée aux étudiants de 2^{ème} année Master

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie Chimique

Réalisé Par :

Dr Omar KHELIFI
Maitre des conférences 'A'

Septembre 2024

Avant-propos

Ce support pédagogique est consacré essentiellement aux biomasses et biocarburants. Ce polycopie est adressé aux étudiants inscrits en deuxième année Master, spécialité génie chimique de la filière de génie des procédés. Afin d'aborder cette matière, les étudiants doivent avoir acquis suffisamment de connaissances en :

- Sciences de l'environnement ;
- Energies renouvelables ;

Ce cours a pour objectif de permettre aux étudiants d'acquérir des connaissances fondamentales relatives aux différentes notions relatives aux biomasses et biocarburants. A l'issue de ce cours, les compétences acquises par l'étudiant lui permettront de :

- Comprendre les différents types et sources des biomasses ;
- Savoir les techniques de valorisation et procédés de transformation des biomasses ;
- Connaître les différents types des biocarburants et ses applications.

Le contenu du présent cours est illustré par des schémas et figures démonstrative.

SOMMAIRE

PARTIE I : BIOMASSES

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES BIOMASSES

1. Definition : -----	2
2. Origine de la biomasse-----	2
3. Classification de la biomasse -----	3
3.1 Classification selon les activités économiques -----	3
3.2. Classification selon la nature physique-----	4
4. Principaux defis en matiere de gestion de la biomasse -----	4
5. Avantages de biomasses -----	5
6. Contraintes liees a l'utilisation de la biomasse : -----	6
7. Production d'energie a partir de la biomasse -----	6
8. Biomasse lignocellulosique : -----	7
9. Valorisation de la biomasse lignocellulosique -----	10
10. References-----	11

PARTIE I : BIOMASSES

CHAPITRE 2 : TRAITEMENT DE BIOMASSE

1. Traitement thermochimique de la biomasse -----	14
1.1. Combustion -----	15
1.2. Pyrolyse -----	16
1.3. Gazéification-----	18
2. Traitement biochimique de la biomasse -----	20
2.1. Biométhanisation -----	20
2.2. Fermentation et extraction d'huile végétale -----	21
3. References-----	22

PARTIE II : BIOCARBURANTS

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES BIOCARBURANTS

1. Definition -----	24
2. Différents biocarburants -----	24
3. Filières et classification des biocarburants-----	24
3.1 Biocarburants de première génération -----	24
3.2 Biocarburants de deuxième génération -----	26
3.3 Biocarburants de troisième génération-----	28
4. References -----	31

PARTIE I : BIOMASSES

CHAPITRE 2 : BIOETHANOL

1. Définitions du bioéthanol -----	33
2. Génération de bioéthanol -----	33
2.1. Bioéthanol de première génération -----	33
2.2. Bioéthanol de deuxième génération-----	34
2.3. Bioéthanol de troisième génération : -----	34
3. Utilisation de bioéthanol -----	35
4. Procédé de production de bioéthanol -----	36
5. Procédés de fermentation -----	36
6. References-----	40

PARTIE I : BIOMASSES **CHAPITRE 3 : BIODIESEL**

1. Definition	42
2. Sources vegetales du biodiesel :	43
3. Etapes de production de biodiesel	45
3.2. Etape de réaction	45
3.3. Etape de decantation	45
3.4. Etape de lavage	45
4. Formation du biodiesel	46
5. Utilisation du biodiesel	47
6. Avantages du biodiesel	47
7. References	48

PARTIE I : BIOMASSES **CHAPITRE 3 : BIOGAZ**

1. Definition	50
2. Composition du biogaz	50
3. Biomethanisation	51
4. Etapes de biomethanisation	52
5. Parametres influençant la biomethanisation	54
5.1. Le substrat	54
5.2. La temperature	55
5.3. Le ph et l'oxygene	55
5.4. L'agitation	55
5.4. La presence des inhibiteurs	55
5.5. L'humidite	55
6. References	57

PARTIE I : BIOMASSES
CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES
BIOMASSES

1. Définition :

Le terme biomasse est composé par deux mots : Bio : qui signifie une source biologique variante, Masse : matière simple ou complexe occupant un certain volume [1].

La biomasse désigne l'ensemble des matières organiques pouvant se transformer en énergie. Elle est une réserve d'énergie considérable née de l'action du soleil grâce à la photosynthèse. Elle existe sous forme de carbone organique. Sa valorisation se fait par des procédés spécifiques selon le type de constituant. On entend par matière organique aussi bien les matières d'origine végétale (résidus alimentaires, bois, feuilles) que celles d'origine animale (cadavres d'animaux, êtres vivants du sol) [2].

Le parlement européen et le conseil européen ont décrit dans leur directive 2009/28/CE du 23 avril 2009, la biomasse comme étant à la fraction biodégradable des produits, des déchets et résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture (y compris les substances végétales et animales), de la sylviculture et des industries connexes, y compris la pêche et l'aquaculture, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux [3].

D'après le récent rapport de l'AEE (Agence Européenne Environnement), la biomasse désigne l'ensemble de la végétation formant les écosystèmes, séquestrant le carbone et fournissant des aliments et des matières premières pour un large éventail de matériaux d'origine biologique. Ces matériaux sont utilisés dans de nombreux secteurs différents, tels que la construction, l'énergie, les transports, l'industrie de l'ameublement et l'industrie textile. La biomasse peut également être réutilisée et recyclée pour une utilisation optimale des matériaux et produits d'origine biologique en fonction de leur valeur économique et environnementale [4].

2. Origine de la biomasse

Les origines de la biomasse se déclinent en trois catégories :

- Forestière, comme la sciure et le bois ;
- Agricole, tels que le lisier, le fumier et la paille ;
- Fermentescible, comme les boues des stations d'épuration.

Il existe trois formes de biomasse présentant des caractéristiques physiques très variées :

- Les solides (ex : paille, copeaux, bûches) ;
- Les liquides (ex : huiles végétales, bioalcools) ;
- Les gazeux (ex : biogaz).

Elle est considérée comme une source d'énergie renouvelable uniquement si sa régénération est au moins égale à sa consommation (par exemple, l'utilisation du bois ne doit pas conduire à une diminution du nombre d'arbres) [2].

Les sources de biomasses se déclinent aussi en trois types : végétales, animales et microorganismes.



Figure I.1.1 : Différentes sources de biomasses [3].

3. Classification de la biomasse

Les ressources en biomasses sont très variées. Elles sont généralement répertoriées selon leurs origines et les secteurs économiques correspondants ou bien selon leur nature physique.

3.1 Classification selon les activités économiques

Les biomasses sont généralement classées selon les activités suivantes [5-6] :

- *Gisements issus de la filière agricole, viticole et arboricole* : Ce potentiel est considérable puisque l'agriculture occupe plus de 2/3 des surfaces productrices de biomasses. Ces gisements comprennent principalement les coproduits de récolte (paille

de céréales, maïs, ...), les produits issus de la taille (arbres et vignes) et les cultures dédiées : Miscanthus, Cynara, Panic érigé (Switchgrass) ;

- *Gisements issus de la filière bois* : Ils sont formés essentiellement des produits connexes de l'industrie du bois (copeaux, sciures, écorces, ...) et de ceux issus du gisement forestier (bois bûche, plaquettes forestières, billons, rondins) ;
- *Gisements issus de l'industrie* : Ils sont majoritairement constitués des résidus de silos, du secteur de la cosmétique, de l'agroalimentaire (tourteaux d'oléagineux, coques de fruits, grignons d'olive...) et des distilleries (pulpes, marcs épuisés...) ;
- *Gisements issus de cultures dédiées ligneuses* : Il s'agit de cultures intensives d'arbres à croissance rapide (eucalyptus, robinier, saules, peupliers) destinées à fournir rapidement de la biomasse.

3.2. Classification selon la nature physique

Les biomasses peuvent être classées selon leur nature physique comme suit [7] :

- *Biomasses sèches* : Ce sont principalement les ressources ligneuses (d'origine forestière, agricole ou urbaine), aussi appelées bois-énergie telles que le bois, les granulés de bois, les déchets de bois sous forme de plaquette ou de sciure, la paille, les résidus de récoltes et les matières animales. Ce type de biomasse inclut aussi les déchets urbains organiques solides ;
- *Biomasses humides* : Ce sont des biomasses qui contiennent une forte humidité relative (>60%). Elles peuvent être d'origine agricole (fumiers, lisiers, etc.), agroalimentaire (grignons d'olive, margines, marcs de raisins, vinasse, déchets de tomates etc.) ou urbaine (boues de station d'épuration, ordures ménagères) [8].

4. Principaux défis en matière de gestion de la biomasse

Le principal défi réside dans le fait que la recherche scientifique indique qu'il n'y aura pas suffisamment de biomasse provenant de l'UE pour remplir à l'avenir tous les rôles prévus dans le pacte vert pour l'Europe. L'approvisionnement en biomasse reste limité par la superficie terrestre, la croissance de la végétation, le changement climatique et le commerce mondial. Étant donné qu'il existe des demandes croissantes et concurrentes pour l'utilisation de la biomasse dans différents secteurs, y compris pour la conservation de la nature, nous devons établir des priorités dans les utilisations de la biomasse. Cela

signifie que les parties intéressées devront comprendre et examiner les différents compromis entre la réalisation des objectifs stratégiques et la manière d'utiliser la biomasse disponible aujourd'hui tout en préservant son approvisionnement futur.

Les différents types de production et d'utilisation de la biomasse ont des incidences variées sur les écosystèmes et, par conséquent, une approche plus globale de la gestion de la biomasse est nécessaire. Cela s'explique également par le fait que l'état des écosystèmes qui produisent de la biomasse n'est, en général, pas bon et en déclin, et que les puits de carbone forestiers, sur lesquels nous comptons tellement pour atteindre les objectifs climatiques de 2030 et 2050, ont connu une tendance à la baisse ces dernières années. Pour rendre ce puzzle de la biomasse encore plus compliqué, des secteurs de production primaire tels que l'agriculture et la sylviculture subissent déjà des incidences du changement climatique qui menacent encore davantage les puits de carbone et la production de biomasse.

Les interventions des politiques en matière d'utilisation des sols et de gestion des terres, en particulier celles qui touchent les forêts et l'agriculture, produiront des résultats au cours des prochaines décennies. Lors de la planification pour 2030, 2050 et au-delà, des décisions sont déjà nécessaires aujourd'hui [4].

5. Avantages de biomasses

- La biomasse est une source de matière et d'énergie abondante, renouvelable et inépuisable.
- C'est une source neutre. Exemple : cycle de photosynthèse dans les plantes (l'absorption du dioxyde de carbone et sa conversion pour la croissance des plantes).
- Lors de la conversion énergétique (combustion, etc.), le CO₂ recueilli est libéré. On peut donc dire que, dans une large mesure, le CO₂ émis par la conversion énergétique est compensé par le CO₂ absorbé auparavant par la biomasse.
- La biomasse est économiquement rentable (valorisation de déchets et de sous-produits pour la production d'énergie et de produits à haute valeur ajoutée). La valorisation de la biomasse aide à l'élimination des déchets solides d'où la baisse de pollution.
- Les produits issus de la conversion de la biomasse sont biodégradables et les procédés de conversion sont énergétiquement, matériellement et économiquement rentables.
- Les procédés de conversion de la biomasse et les produits issus de cette conversion répondent aux critères de la chimie verte et aux exigences du développement durable.

- La biomasse est, en général, peu polluante et peu toxique. Elle est biodégradable et/ou recyclable. Les déchets de conversion de la biomasse sont en majorité valorisables.
- Les procédés de conversion de biomasse sont des projets intégrés, créateurs d'emploi.

6. Contraintes liées à l'utilisation de la biomasse :

- Leur rendement énergétique est assez faible lorsqu'on les utilise à l'état brut en tant que biocombustible.
- Pour produire de l'énergie biomasse il faut occuper des terres arables (cultivables) et donc baisser la production agricole. (Compétition)
- Dégagement excessif du CO₂ dans certains cas (bois). Etablir un bilan détaillé afin de juger sur l'efficacité écologique et énergétique.
- Une surexploitation de la biomasse peut entraîner une déforestation importante et donc un danger pour l'environnement.
- Déstabilisation du cycle biologique des forêts et des terres agricoles. Effet négatif sur la biodiversité.
- Les coûts et les impacts du transport pour amener la biomasse (Ex. Bois, déchets ménagers...) là où la ressource manque.
- Le coût de production des biocarburants est parfois élevé.

7. Production d'énergie à partir de la biomasse

La valorisation énergétique de la biomasse peut produire trois formes d'énergie utile, en fonction du type de biomasse et des techniques mises en œuvre : de la chaleur ; de l'électricité ; une force motrice de déplacement [2].

Pour produire de l'énergie, il faut de grandes quantités de biomasse car son PCI n'est globalement pas très élevé : Paille : 14,3 MJ/kg ; Bois (dans la nature) : 10,8 MJ/kg. Déchets urbains, bagasse (résidu fibreux de la canne à sucre) : 7,77 MJ/kg.

Notons que le pouvoir calorifique du bois est directement lié à son taux d'humidité. Des granulés de bois dont le taux d'humidité est très faible (5 à 10%) à un PCI bien meilleur, de l'ordre de 18 MJ/kg. A titre de comparaison, le PCI du fioul domestique avoisine 42 MJ/kg (26 MJ/kg pour la houille).

La biomasse couvre près de 10% des besoins mondiaux en énergie. Deux tiers de la consommation mondiale d'énergie issue de la biomasse sont consacrés à la cuisine et au chauffage dans les pays en voie de développement [2].

Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) désigne le dégagement maximal théorique de chaleur qu'on peut tirer d'un combustible lors de sa combustion.

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) ne prend pas en compte la chaleur de condensation de la vapeur d'eau qui se dégage lors de la combustion. Ce PCI est souvent employé pour comparer l'intérêt calorifique de différents combustibles. Il peut être exprimé en mégajoules par kg (MJ/kg) ou en kWh/kg, sachant que 1 kWh = 3,6 MJ.

8. Biomasse lignocellulosique :

La biomasse végétale représente l'ensemble des matières organiques d'origine végétale sur terre [9]. Quatre générations de biomasse végétale sont définies : la première se réfère aux produits issus de l'agriculture traditionnelle alimentaire (amidon, sucres et huiles). La deuxième génération concerne la biomasse lignocellulosique qui regroupe tous les autres végétaux à visée non-comestible (bois et les déchets issus de l'agriculture) [10]. La troisième génération regroupe les algues et nous pouvons inclure la quatrième génération qui concerne les microorganismes génétiquement modifiés [11]. Parmi ces biomasses, la lignocellulose se démarque de par son abondance et par conséquent son coût minime de production. Par ailleurs son utilisation en tant que ressource à grande échelle ne cause pas de problème éthique car elle n'entre pas en concurrence avec l'industrie alimentaire humaine.

8.1. Composition

La biomasse lignocellulosique, principalement située dans les parois des végétaux est composée majoritairement de trois polymères : la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Celles-ci entremêlées, forment une structure tridimensionnelle conférant une certaine rigidité aux plantes (Figure I.1.2). Les proportions en cellulose, hémicellulose et lignine varient en fonction du type de plante. Une sélection de lignocelluloses particulièrement disponibles en France est référencée dans le Tableau I.1.1. Les bois sont catégorisés entre feuillus et résineux. Les bois de feuillus ont une part de cellulose et d'hémicellulose plus importante. Chez les bois de résineux, la part de lignine est un peu plus importante. Ces différences de compositions et par conséquent de structures ont un impact sur les futures valorisations [12].

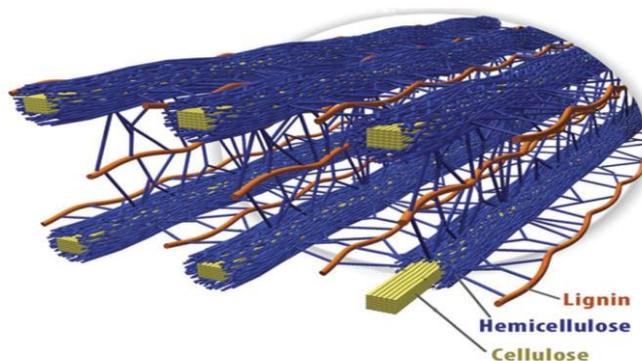


Figure I.1.2: Arrangement de la biomasse lignocellulosique dans les parois cellulaires des plantes [13]

Tableau I.1.1 : Composition en cellulose, hémicellulose et lignine de bois et de résidus agricoles [14].

Source	Cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Lignine (%)
Bois de feuillus	35-55	20-40	15-35
Chêne	38	23	32
Hêtre	45	32	22
Bois de résineux	30-50	20-30	20-35
Épis de maïs	39	44	12
Déchets de papiers	65	13	1
Feuilles	15-20	80-85	0
Paille de blé	30	50	15

La cellulose est un biopolymère linéaire de D-glucose, comprenant de plusieurs centaines à plusieurs milliers de liaisons (Figure I.1.3). Les liaisons hydrogène entre les chaînes linéaires permettent d'obtenir un feuillet rigide de structure plus ou moins cristallines. C'est ce réseau de liaisons hydrogène qui rend sa réactivité difficile [15].

Les hémicelluloses sont une famille de polysaccharides, linéaires ou branchés. Ces enchaînements de sucres non réguliers leur confèrent une structure amorphe. Plusieurs types d'hémicelluloses sont connus et leurs compositions varient selon l'origine de la plante. Généralement elles sont composées de C5 (xylose, arabinose), de C6 (mannose, glucose, galactose), de groupements acide (glucuronique, férulique) et de groupements acétyle. Suivant l'origine, deux familles d'hémicelluloses se démarquent par leur

abondance : les xylanes (plantes angiospermes : céréales, bois de feuillus) et les mannanes (plantes gymnospermes : bois de résineux) [16].

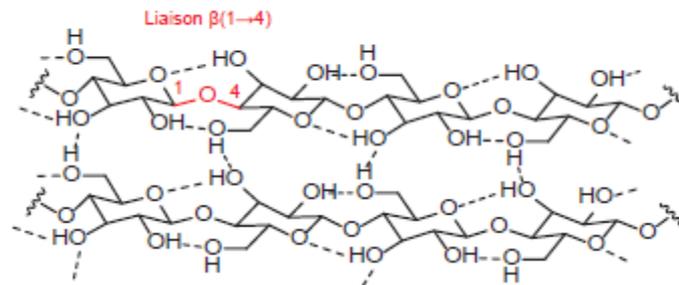


Figure I.1.3 : Structure chimique de la cellulose [16]

Le dernier polymère composant la lignocellulose et qui apporte la rigidité aux parois des végétaux est la famille des lignines. Elles sont composées majoritairement par trois unités monomériques : les alcools sinapyliques (3,5-diméthoxy-4-hydroxycinnamyl), coniféryliques (3-méthoxy-4-hydroxycinnamyl), et p-coumaryliques (4hydroxycinnamyl) (Figure I.1.4). Ces monolignols sont formés d'unités aromatiques, respectivement le syringyl (S), phydroxylphényl (H) et le guaiacyl (G). Comme pour les hémicelluloses, les compositions des différentes lignines varient en fonction de leurs origines. Néanmoins, certaines tendances sont observées, comme la présence d'un haut ratio d'unité G/S dans les bois de résineux et inversement dans les bois de feuillus avec plus de présence d'unité.

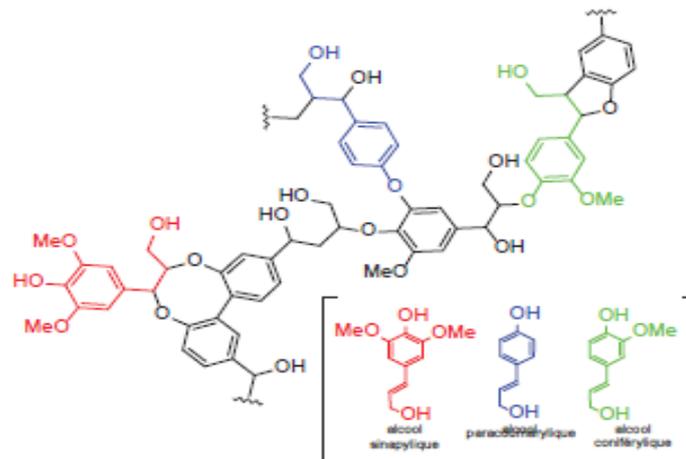


Figure I.1.4 : Structure chimique d'une lignine et des unités monomériques [17]

9. Valorisation de la biomasse lignocellulosique

Afin de favoriser une économie circulaire, des bioraffineries sont en cours de mise en oeuvre. Dans ces structures, la biomasse lignocellulosique est traitée via différents procédés afin de produire de l'énergie, des carburants et des produits chimiques à haute valeur ajoutée.

Parmi ces procédés, la combustion permet simplement de produire de la chaleur et de l'énergie. La gazéification permet de former du gaz de synthèse et par pyrolyse, il est possible d'obtenir des huiles, du charbon et du gaz [18].

Le concept de bioraffinerie implique des traitements de séparation et d'extraction pour libérer la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Des prétraitements mécaniques et physiques peuvent aussi être réalisés pour déstructurer les substrats et ainsi les rendre plus réactifs (notamment en libérant les sucres). Les fractions obtenues sont disposées à être transformées en énergie et produits d'intérêts. Pour de telles transformations, la catalyse est un outil indispensable pour accélérer la réaction, et former sélectivement les produits souhaités. De ce fait, des études en milieu homogène et enzymatique ont fait leurs. Au regard d'une application industrielle, les catalyseurs hétérogènes, facilement séparables et réutilisables sont avantageux. Ainsi, la réactivité par catalyse hétérogène de chacun des biopolymères sera présentée [19].

Les trois biopolymères peuvent être extraits à partir de procédés papetiers, tel que le procédé Kraft (Figure 1.5). Cette méthode d'extraction utilise du sulfure en milieu basique pour séparer la cellulose du bois, en libérant les deux autres composantes. Un procédé similaire utilisant un solvant organique (alcool) nommé Organosolv est aussi utilisé [20].

10. Références

- [1]. Cours Biomasses et Biocarburants : <https://moodle.univmedea.dz/course/view.php?id=2510>
- [2]. Connaissance des énergies (CDE) : <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/biomasse>.
- [3]. Marie Guillot. Etude du traitement de la biomasse par voie hydrothermale pour la récupération de molécules et de minéraux à haute valeur ajoutée. Matériaux. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2014. Français. NNT : 2014MON20218.
- [4]. Site de l'AEE : <https://www.eea.europa.eu/fr/articles>
- [5]. P. Roy et G. Dias, « Prospects for pyrolysis technologies in the bioenergy sector: A review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, p. 59-69, sept. 2017.
- [6]. A. Kumar, N. Kumar, P. Baredar, et A. Shukla, « A review on biomass energy resources, potential, conversion and policy in India », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 530-539, 2015.
- [7]. A. Brosowski, « A review of biomass potential and current utilisation – Status quo for 93 biogenic wastes and residues in Germany », *Biomass and Bioenergy*, 95, 257-272, 2016.
- [8]. Khouloud HADDAD. Etude de la pyrolyse de matériaux biosourcés chimiquement modifiés : Caractérisation des biochars et application agronomique (2018). Thèse en cotutelle de doctorat. Université de Haute Alsace & Institut National Agronomique de Tunisie.
- [9]. K. K. Pant et P. Mohanty, « Biomass, Conversion Routes and Products - An Overview », in *Transformation of Biomass*, A. Hornung, Éd. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2014, 1-30.
- [10]. P. McKendry, Energy production from biomass (part 1): overview of biomass, *Bioresour. Technol.*, 2002, 83, 37–46.
- [11]. R. A. Lee and J.-M. Lavoie, From first- to third-generation biofuels: Challenges of producing a commodity from a biomass of increasing complexity, *Anim. Front.*, 2013, 6-11.
- [12]. F. Alam, S. Mobin and H. Chowdhury, Third generation biofuel from algae, *Procedia Eng.*, 2015, 105, 763–768.
- [13]. H. A. Alalwan, A. H. Alminshid and H. A. S. Aljaafari, Promising evolution of biofuel generations. Subject review, *Renew. Energy Focus*, 2019, 28, 127–139.
- [14]. A. Brandt, J. Gräsvik, J. P. Hallett and T. Welton, Deconstruction of lignocellulosic biomass with ionic liquids, *Green Chem.*, 2013, 15, 550.
- [15]. U.S. Department of Energy Bioenergy Research Centers: 2020 Program Update, genomicscience.energy.gov/centers/BRC2020programupdate.pdf
- [16]. W. B. Betts, R. K. Dart, A. S. Ball and S. L. Pedlar, in *Biodegradation*, ed. W. B. Betts, Springer London, London, 1991, pp. 139–155.
- [17]. B. de Caprariis, P. De Filippis, A. Petrullo and M. Scarsella, Hydrothermal liquefaction of biomass: Influence of temperature and biomass composition on the bio-oil production, *Fuel*, 2017, 208, 618–625.
- [18]. M. von Sivers and G. Zacchi, A techno-economical comparison of three processes for the production of ethanol from pine, *Bioresour. Technol.*, 1995, 51, 43–52.
- [19]. M. Pointner, P. Kuttner and T. Obrlik, Composition of corncobs as a substrate for fermentation of biofuels, *Agronomy Research*, 2014, 12, 391–396.
- [20]. Z. Maache-Rezzoug, G. Pierre, A. Nouviaire, T. Maugard and S. A. Rezzoug, Optimizing thermomechanical pretreatment conditions to enhance enzymatic hydrolysis of wheat straw by response surface methodology, *Biomass Bioenergy*, 2011, 35, 3129–3138.

PARTIE I : BIOMASSES
CHAPITRE 2 : TRAITEMENT DE BIOMASSE

Pendant la presque totalité de l'histoire humaine, la biomasse a été la principale forme d'énergie. Elle permet de produire de l'électricité, de la chaleur via la combustion de déchets et de résidus de matières organiques, végétales ou animales. La biomasse est un combustible difficilement exploitable dans son état brut. Sa transformation permet d'obtenir des combustibles polyvalents utilisables dans des moteurs, chaudières ou turbines. Cette transformation peut se faire par voie thermochimique (combustion, gazéification et pyrolyse), par voie biochimique (digestion, fermentation) ou par voie mécanique (l'extraction). Le choix dépendra du type et de la quantité de biomasse disponible, du type d'énergie finale souhaitée, des conditions économiques, environnementales et d'autres facteurs.

Un diagramme schématique de la conversion de la biomasse est présenté dans la figure I.2.1. Les principaux produits des technologies de conversion sont l'énergie (thermique, vapeur, électricité), les combustibles solides (charbon de bois, combustibles) et les combustibles synthétiques (méthanol, méthane, hydrogène, etc.). Ceux-ci peuvent être utilisés à des usages différents telles que la cuisine, l'éclairage, le chauffage, le pompage de l'eau, la production d'électricité et comme combustibles industriels et de transport [1].

Il est aussi courant de classer les biocarburants en trois générations comme suit :

- Les technologies de la première génération est le moyen le plus simple d'utiliser les terres agricoles (comme canne à sucre, betterave sucrière et des huiles végétales) pour produire de l'éthanol ou le biodiesel [2-3].
- Les technologies de la deuxième génération sont qui exploitent la biomasse non-comestible (la biomasse lignocellulosique) telle que le bois, les herbes et les déchets solides municipaux en produits chimiques utiles et/ou en carburants de transport [1, 4].
- Les technologies de la troisième génération s'appuient principalement sur les microorganismes tels que les microalgues. Celles-ci peuvent produire le biodiesel à partir d'huile de microalgues, le bioéthanol à partir de micro-algues et d'algues, les produits chimiques fins et le dihydrogène à partir des microalgues vertes [1-2].

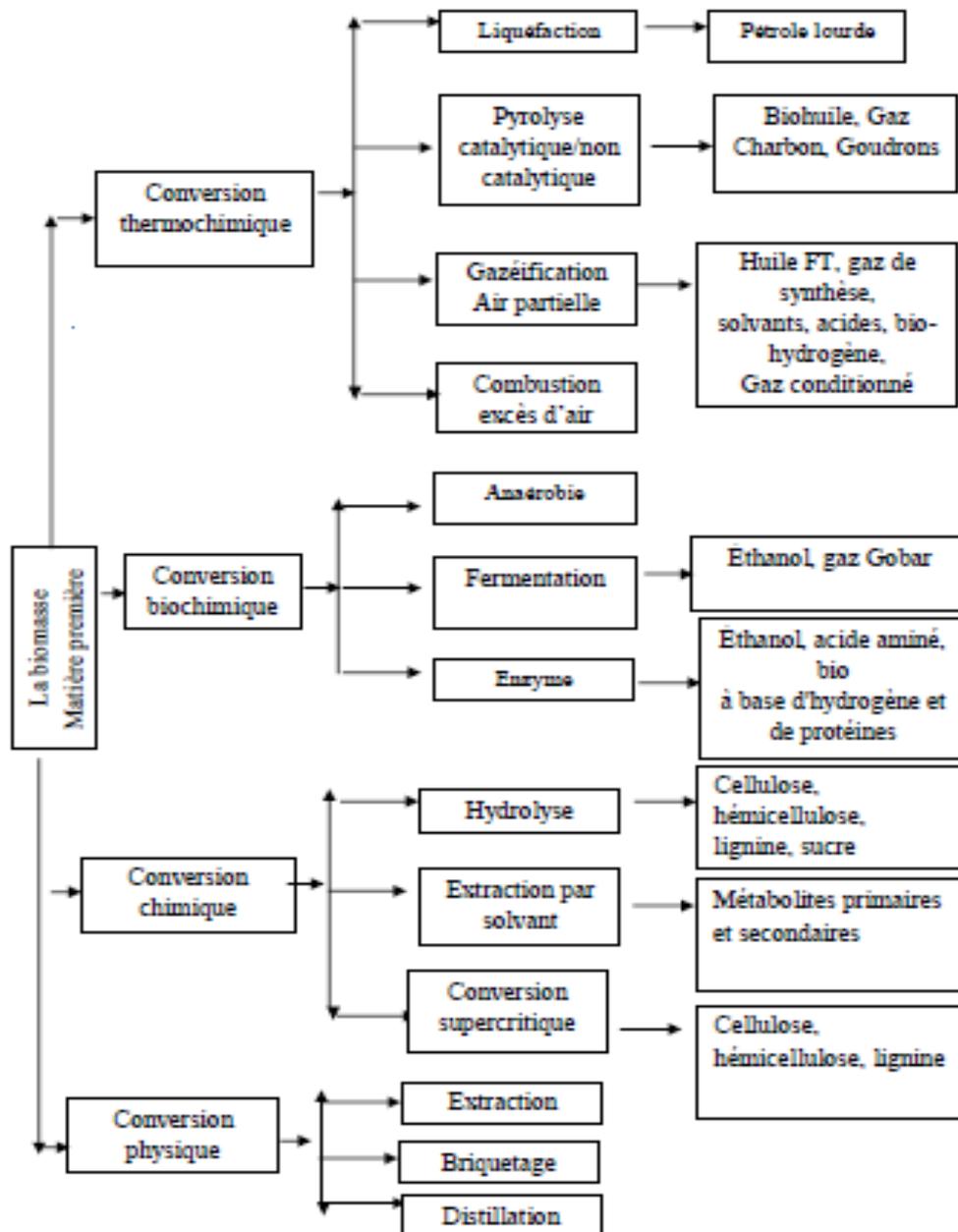


Figure I.2.1 : Différentes voies de conversion pour obtenir des produits finis [1].

1. Traitement thermochimique de la biomasse

La transformation thermochimique assure aujourd'hui probablement plus de 95% de la valorisation énergétique de la biomasse. Les trois principales conversions thermochimiques de la biomasse couramment développées correspondent à la combustion, la pyrolyse, et à la gazéification. Le tableau I.2.1 précise pour chaque transformation les conditions en température et atmosphère ainsi que les produits obtenus.

Tableau I.2.1 : Tableau récapitulatif des conditions opératoires des différentes transformations thermochimiques de la biomasse.

Transformations thermochimiques	Température	Atmosphère	Produits
Pyrolyse	400-700 °C	Inerte (absence de O ₂)	Solide carboné (charbon) + liquide (goudrons) + gaz
Gazéification	700-900 °C	Gaz réactif air, O ₂ , CO ₂ , H ₂ O, ...	Essentiellement mélange gazeux H ₂ , CO, CO ₂ et CH ₄
Combustion	800-1300 °C	O ₂ (air)	CO ₂ + H ₂ O

1.1. Combustion

Méthode la plus évidente, et la plus ancienne, pour valoriser l'énergie de la biomasse, la combustion, permet une transformation directe de la biomasse en énergie thermique. Cette énergie thermique est ensuite utilisée directement ou transformée en électricité ou en chaleur. Contrairement aux autres voies thermochimiques, la combustion se réalise avec un excès d'air.

La combustion est la technologie de conversion la plus ancienne et sans doute la plus employée, la plus simple et la plus directe. Actuellement, elle est la plus disponible pour la bioénergie afin de remplacer les combustibles fossiles [5]. C'est une réaction exothermique d'oxydation d'un matériau carboné en présence d'air ou de dioxygène pur. Son objectif est la production de chaleur et/ou d'électricité. La plupart des biocombustibles ont une teneur assez faible en azote et en soufre, ce qui cause relativement peu d'émissions de SO_x et de NO_x [6-7].

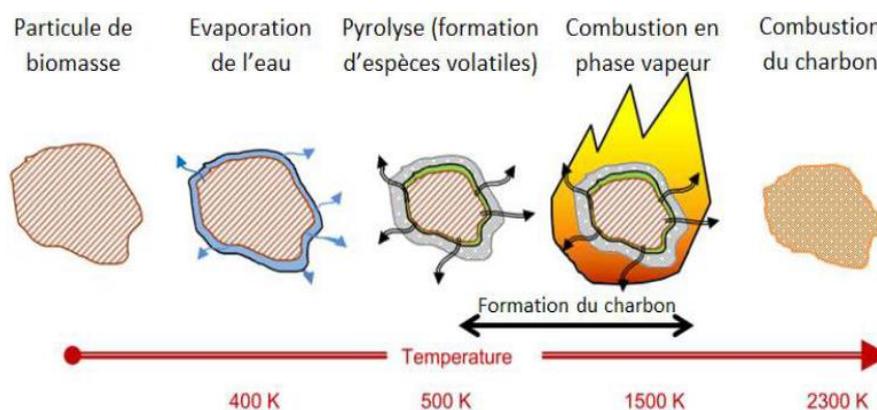


Figure I.2.2 : Combustion d'une particule de bois [8].

La combustion de la biomasse s'effectue en trois étapes (figure I.2.2). Dans un premier temps, la biomasse relargue de l'eau au cours du séchage ; puis, sous l'action de la chaleur, elle se dégrade pour former des vapeurs et du charbon. Enfin, les vapeurs et les charbons formés s'oxydent respectivement en phase gazeuse (oxydation homogène) et en phase solide (oxydation hétérogène) [6-7].

La régulation de la quantité d'air injectée dans le foyer est très importante, car elle influence grandement le rendement de la combustion. Il faut injecter une quantité d'air suffisante pour assurer la combustion complète des gaz. Cependant, un trop grand excès d'air conduit à une baisse de rendement et à des émissions d'imbrûlés.

En effet, les premières caractéristiques à connaître sont la dimension, la nature et l'humidité de la biomasse, l'humidité relative du combustible, la composition chimique élémentaire, le pouvoir calorifique, la teneur en cendres et une estimation de la production de fumées acides.

1.2.Pyrolyse

Du grec pur, puros «feu» et du suffixe -lyse «dissolution », la pyrolyse signifie la séparation par le feu. C'est un procédé de décomposition thermique en absence d'agent oxydant pour produire des gaz permanents, des vapeurs condensables (hydrocarbures oxygénés) et de charbon en proportion variable selon les conditions opératoires. La pyrolyse représente le socle de toute valorisation thermochimique de la biomasse, c'est la première étape commune lors des procédés de gazéification et de combustion [9].

Tableau I.2.2 : Différents types de pyrolyse [10]

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%)

La pyrolyse est la conversion thermochimique de la biomasse en l'absence d'oxygène. Cette conversion commence à 300 °C-550 °C et va jusqu'à 700 °C. Les conditions de pyrolyse peuvent être optimisées pour maximiser la production de liquides, solide (char) ou du gaz comme l'illustre la figure II.2 et dont la distribution dépend des conditions expérimentales appliquées, notamment la température à laquelle se produit la conversion, la vitesse de chauffe de la biomasse et la taille des particules.

Il a été démontré qu'une vitesse de chauffe faible favorise la carbonisation tandis qu'une vitesse de chauffe très élevée (>100°C/s) facilite la production des matières volatiles par dépolymérisation ou fragmentation. La conversion de la biomasse en huiles pyrolytiques fait l'objet de nombreuses expérimentations et les rendements peuvent atteindre 70%.

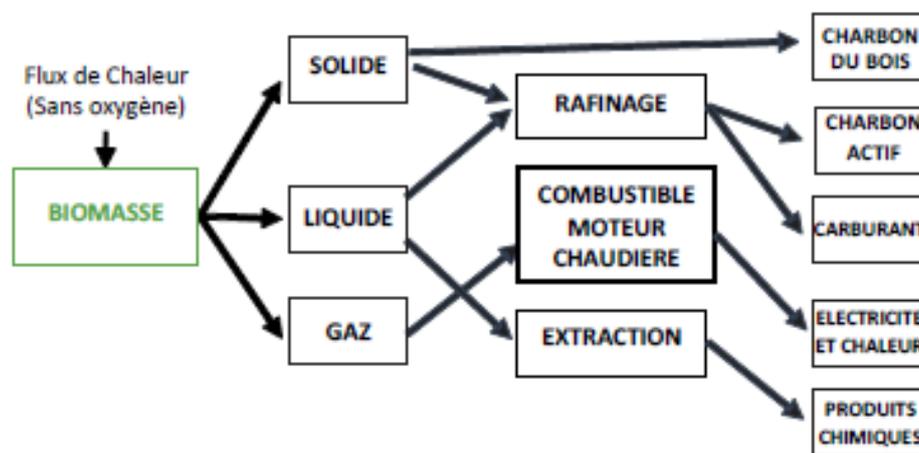


Figure I.2.3 : Produits issus de la pyrolyse de biomasse et leurs utilisations [11].

L'élévation de la température d'un matériau organique dans une atmosphère inerte (absence d'oxygène) conduit au dégagement de ses composés sous forme de gaz. En premier, l'augmentation de la température jusqu'à 100 °C pour effet de sécher le matériau de l'eau qu'il contient. Puis, les composés organiques volatiles sont dégagés par des réactions de désorption (jusqu'à 350 °C). Avec l'augmentation de la température au-delà de 350 °C, les grosses molécules se cassent pour fournir des molécules plus courtes sous forme de gaz, de liquides ou de solides suite à une décomposition spontanée du composé organique [12]. Ces réactions se poursuivent jusqu'à ce qu'il ne reste plus que le charbon.

La figure I.2.3 présente les proportions relatives des produits finis après pyrolyse de la biomasse à une plage de températures de 400 à 650 °C. Cependant, les processus de pyrolyse ne peuvent pas être limités à un seul chemin de réaction en raison des propriétés variables de la structure et la composition de la biomasse [13].

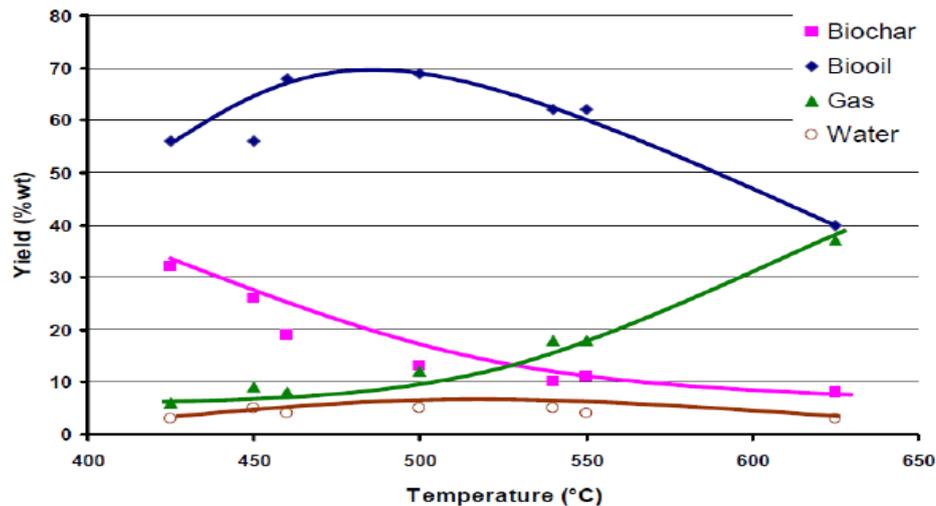


Figure I.2.4 : Proportion relative de produits finis dans la pyrolyse de la biomasse de bois [11].

1.3. Gazéification

La gazéification est une opération thermochimique correspondant à une dégradation incomplète de la biomasse sous l'action de la chaleur et de divers agents oxydants (O_2 , air, CO_2 , vapeur d'eau...). Cette réaction est conduite de manière à privilégier la formation de gaz (SNG, H_2) utilisable dans les moteurs ou les turbines ou utilisable en tant que « gaz de synthèse (CO et H_2). La gazéification est un procédé attrayant et efficace de conversion de la biomasse qui offre des avantages économiques intéressants et un grand potentiel de développement et d'utilisation [9]. La gazéification de la biomasse solide est réalisée dans un réacteur spécifique, le gazogène. Elle consiste à transformer à haute température (800 à 900 °C), en présence d'un gaz réactif, un combustible solide en un gaz combustible composé essentiellement d'hydrogène et de monoxyde de carbone et dont la quantité dépend des paramètres opératoires de la gazéification tels que la nature de la biomasse, le type de réacteur, la température, la pression, le temps de passage ou encore la présence d'un catalyseur. Ce gaz combustible, après traitement et conditionnement peut-être valorisé en un gaz de synthèse permettant de générer une source hautement énergétique (entre 10 et 30 Mj/m^3).

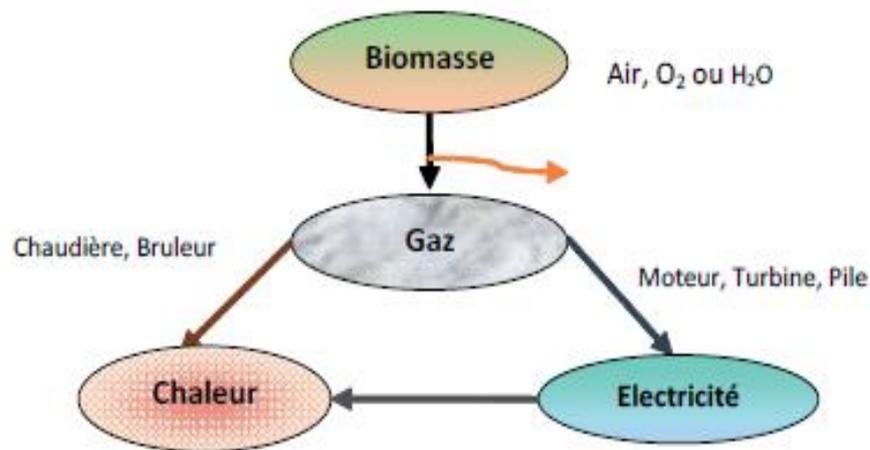


Figure I.2.5 : La conversion énergétique de la biomasse par gazéification [10].

Le processus global de gazéification prend en compte un ensemble de mécanismes thermochimiques à savoir : le séchage, la pyrolyse, la combustion partielle des matières volatiles, la gazéification du charbon ainsi que la combustion d'une faible partie du charbon. Le taux de conversion du charbon est considéré comme le processus contrôlant la conversion globale [13].

- Etape de séchage : Avant toute conversion thermique, la biomasse subit une phase de séchage durant laquelle l'humidité naturellement présente dans la biomasse (ou due à son stockage) est éliminée par évaporation. Cette phase endothermique se produit à une température inférieure à 200 °C et elle peut être intégrée ou non au réacteur de gazéification.

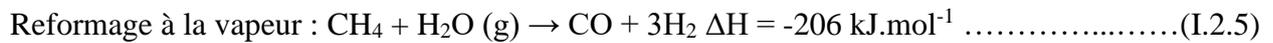
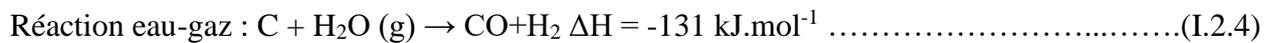
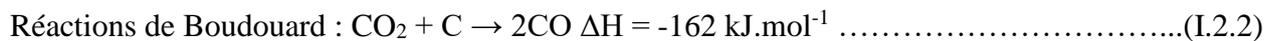
- Etape de pyrolyse : Après l'évaporation de l'humidité, à des températures entre 200 et 700 °C, les matières volatiles se forment à l'intérieur de la particule à partir de l'hydrogène, de l'oxygène et du carbone présents, puis sont évacuées. On aboutit ainsi à une fraction fortement carbonée appelée le char. Les matières volatiles regroupent des espèces gazeuses incondensables qui comprennent en majorité du CO₂, CO, H₂O, C₂H₂, C₂H₄ et C₂H₆ et des espèces condensables (les goudrons).

- Etape d'oxydation homogène : Il s'agit d'une oxydation homogène des matières volatiles produites lors de la phase de pyrolyse par un agent oxydant (air, O₂, H₂O_{vap}). Leur combustion permet d'atteindre des hautes températures dans le réacteur.

- Etape d'oxydation hétérogène : Cette étape est généralement appelée réduction du char ; c'est une oxydation du résidu carboné. Elle se produit à haute température (800-1200 °C) sous l'effet de gaz oxydants, qui sont en général la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone contenus dans les fumées de combustion des matières volatiles [9].

Cette réaction endothermique nécessite un apport supplémentaire de chaleur pour maintenir une température suffisante. Celui-ci est en général fourni par un excès d'air permettant la combustion d'une partie du carbone du char. La gazéification du char produit un gaz combustible essentiellement formé d'hydrogène et de monoxyde de carbone, dans des proportions variables [14].

Les réactions majeures lors de la gazéification sont données par les équations suivantes [17]:



2. Traitement biochimique de la biomasse

Les conversions biochimiques sont des processus naturels de décomposition par action des bactéries. 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 biométhanisation ou digestion anaérobie, La fermentation alcoolique et l'extraction d'huiles végétales [10].

2.1. Biométhanisation

La principale filière de cette voie biochimique est la méthanisation. Il s'agit d'un procédé basé sur la dégradation par des micro-organismes de la matière organique.

Elle s'opère dans un digesteur chauffé et sans oxygène. Une installation de biométhanisation permet de produire du biogaz et du solide, utilisé comme amendement organique. En effet, la quantité de biogaz produite rapportée à la quantité de matière brute introduite est variable selon les paramètres physico-chimiques de fermentation, La nature du substrat et les paramètres technologiques, à savoir les débits d'entrée et de sortie, le temps de séjour des fluides et des solides ainsi que la configuration des digesteurs mis en jeu [10].

2.2. Fermentation et extraction d'huile végétale

La fermentation de biomasse est un processus biochimique (est une réaction chimique) contenant du glucose, qui utilise de bactéries en l'absence d'air. Le principe est : les déchets organiques sont stokes dans une cuve cylindrique et hermétique que l'on appelle (digesteur) ou (méthaniser) dans laquelle ils sont soumis à l'action de microorganismes (bactéries) en l'absence d'oxygène [14]. Ces procédés sont destinés à transformer la biomasse pour la production de biocarburants liquides :

- Les procédés de fermentation et distillation permettent d'obtenir, à partir de biomasse riche en sucres ou en amidon, de l'éthanol qui peut être utilisé pur ou de manière combinée avec des carburants fossiles (ETBE, MTBE,...etc.).

- Les procédés d'extraction sont à la base de la production de biodiesel à partir de plantes oléagineuses [17].

La méthanisation est un procédé biochimique impliquant la fermentation de la matière organique pour la transformer en compost par des bactéries, du méthane et du dioxyde de carbone en l'absence d'air, la méthanisation est le procédé des déchets organiques provenant de diverses sources origines [11].

3. Références

- [1]. « Biocarburant : différentes générations pour produire du bioéthanol, biodiesel », <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/biocarburant>, 2010.
- [2]. Production de biocarburant et surface agricole pour l'alimentation, www.connaissancedesenergies.org/, 2011.
- [3]. Triantafyllidis, S. Kostas, A. A. Lappas et M. Stöcker. « A General Introduction to Biomass Utilization Possibilities ». In Role of catalysis for the sustainable production of bio-fuels and bio-chemicals. Elsevier, Oxford, RU. 2013.p. 1-25.
- [4]. C. K. W. Ndiema, P. N. Manga, et C. R. Ruttoh, « Influence of die pressure on relaxation characteristics of briquetted biomass », *Energy Conversion and Management*, 43, 2157-2161, 2002.
- [5]. J. W. Cumming et J. McLaughlin, « The thermogravimetric behaviour of coal », *Thermochimica Acta*, vol. 57, p. 253-272, 1982.
- [6]. M. Horio, A. Suri, J. Asahara, S. Sagawa, et C. Aida, « Development of Biomass Charcoal Combustion Heater for Household Utilization », *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 48, p. 361-372, 2009.
- [7]. J.B. Fressoz, « La longue marche de la crise écologique», *manuel_d'histoire_critique*, 2014.
- [8]. T. Nussbaumer et J. E. Hustad, « Overview of Biomass Combustion », in *Developments in Thermochemical Biomass Conversion: Volume 1 / Volume 2*, A. V. Bridgwater et D. G. B. Boocock, Éd. Dordrecht: Springer Netherlands, 1997. p. 1229-1243.
- [9]. B. Piriou, G. Vaitilingom, B. Veyssiere, B. Cuq, et X. Rouau, « Potential direct use of solid biomass in internal combustion engines », *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 39, p. 169-188, 2013.
- [10]. MOUSSI Karima. Comment transforme-t-on la biomasse en énergie
- [11]. Recherche et Développement (CDER). https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/ber32_4_5.pdf
- [12]. Nourelhouda Boukaous. Etude expérimentale d'un procédé de valorisation thermochimique de la biomasse. Génie des procédés. Normandie Université; Université de Constantine3 Salah Boudnider. Département génie des procédés (Algérie),2021. Français. NNT: 2021NORMIR05.
- [13]. Adem, « Pyrolyse et gazéification de la biomasse pour la production d'électricité - Procédés et acteurs », 2001.
- [14]. M. Jahirul, M. Rasul, A. Chowdhury, et N. Ashwath, « Biofuels Production through Biomass Pyrolysis —A Technological Review », *Energies*, vol. 5, no 12, p. 4952-5001, 2012.
- [15]. A. Damien, *La biomasse énergie : Définitions, ressources et modes de transformation*, 2013.
- [16]. C. Dupont, T. Nocquet, J. A. Da Costa, et C. Verne-Tournon, « Kinetic modelling of steam gasification of various woody biomass chars: Influence of inorganic elements », *Bioresource Technology*, vol. 102, p. 9743-9748, 2011.
- [17]. C. Lang, « Développement de catalyseurs pour la réaction de conversion du gaz à l'eau dans le cadre de la production d'hydrogène par vapogazéification de la biomasse », phdt hesis, Université de Strasbourg, France, 2016.

PARTIE II : BIOCARBURANTS

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES BIOCARBURANTS

1. Définition

Les biocarburants sont des carburants liquides ou gazeux produits à partir de matières végétales et de résidus, comme les cultures agricoles, les déchets municipaux et les sous-produits de l'agriculture. Les biocarburants peuvent remplacer complètement ou en partie, dans le cas d'un mélange, les carburants classiques dans les moteurs des véhicules. Autrement dit sont des combustibles liquides ou gazeux utilisés pour le transport et produit à partir de la biomasse. La biomasse « Fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, des déchets industriels et municipaux » [1].

2. Différents biocarburants

Les dix biocarburants cités par la Commission Européenne (CE) (Directive 2003/30/CE) sont : le bioéthanol, le biodiesel (esters d'Huile Végétale), le biogaz, le bio-méthane, le bio-diméthyléther (bio-DME), le bio-Ethyl-tertio-butyl-éther (bio-ETBE), le bio-Méthyl-tertio-butyl-éther (bio-MTBE), les biocarburants synthétiques, le bio-hydrogéné, et les huiles végétales pures [2].

3. Filières et classification des biocarburants

Les biocarburants sont utilisés sous forme d'additifs ou de complément aux carburants fossiles suivants : gazole (incorporation en tant que biodiesel), essence (incorporation sous forme d'éthanol ou d'ETBE lui-même produit à partir d'éthanol), au kérosène et aux carburants gazeux. On distingue trois générations de biocarburants selon l'origine de la biomasse utilisée et les procédés de transformation associés [3].

3.1 Biocarburants de première génération

Il existe classiquement trois grandes filières de biocarburants de 1ère génération : l'huile, l'alcool et le gaz [4].

a) Filière huile

- L'huile pure ou huile végétale brute, c'est-à-dire le produit direct du pressurage de la graine (de colza ou de tournesol), lequel, après filtration, peut être utilisé directement comme carburant dans un moteur diesel, sans modification de ce dernier [4].

• L'Ester Méthylique d'Huile Végétale (EMHV) obtenu en faisant réagir de l'huile de colza ou de tournesol (qui sont en fait des acides gras) avec de l'alcool méthylique (Trans-estérification). Cette opération permet de fabriquer un sous-produit du glycérol, encore appelé glycérine. L'EMHV est rarement utilisé pur, mais le plus souvent par incorporation au diesel dans des proportions de 5 à 30%, pour donner ce qui est appelé en France le Diester [4].

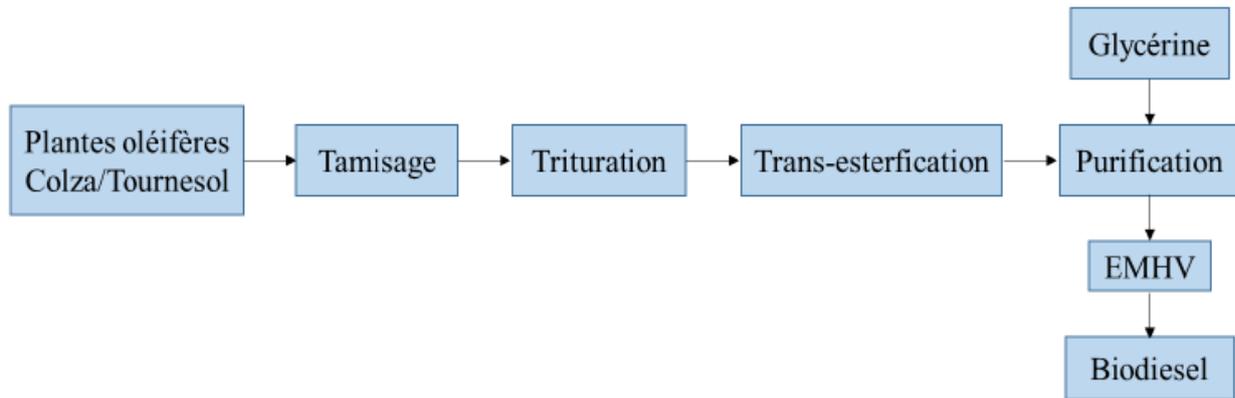


Figure II.1.1 : Schéma de la transformation de la biomasse en biodiesel.

b) Filière alcool

Les combustibles sont obtenus à partir d'alcools (méthanol, éthanol). Les cultures concernées sont celles qui peuvent fournir des matériaux capables de fermenter pour donner un alcool. Toutes les cultures sucrières sont donc éligibles (betterave, canne) mais aussi celles qui donnent de l'amidon (par exemple le blé), lequel par hydrolyse produit ensuite du sucre, dans cette catégorie entrent :

- Les alcools utilisés purs (comme au Brésil), mais cela nécessite de modifier le moteur des voitures ;
- L'Ethyl Tertio Butyl Ether (ETBE) et le Méthyl Tertio Butyl Ether (MTBE) obtenus en faisant réagir les alcools avec un produit pétrolier obtenu en raffinerie, l'isobutène (encore appelé isobutylène), qui est un hydrocarbure de formule brute C_4H_8 . L'ETBE est utilisé comme additif à l'essence, à hauteur de 15 %, en remplacement du plomb [4].

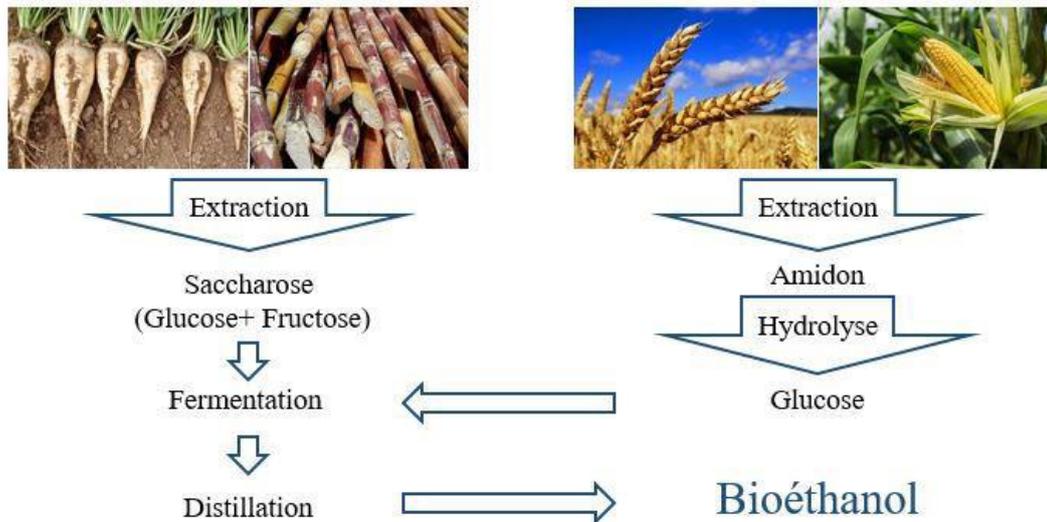


Figure II.1.2 : Production de bioéthanol de 1ère génération [5].

c) Filière gaz

Les combustibles sont obtenus à partir du méthane contenu dans le biogaz (de 50 % à 90%, le reste étant essentiellement du CO₂ et de la vapeur d'eau). Le biogaz est ce qui résulte de la fermentation, hors de la présence d'oxygène, de n'importe quel matériau organique : déchets alimentaires, déchets de bois, paille, produits des cultures...etc. Ce méthane peut être utilisé pur dans des moteurs à allumage commandé (technologie moteurs à essence) ou dans des moteurs dits dual-fuel. Il peut aussi alimenter un procédé industriel de fabrication de combustibles liquides à partir de gaz [4].

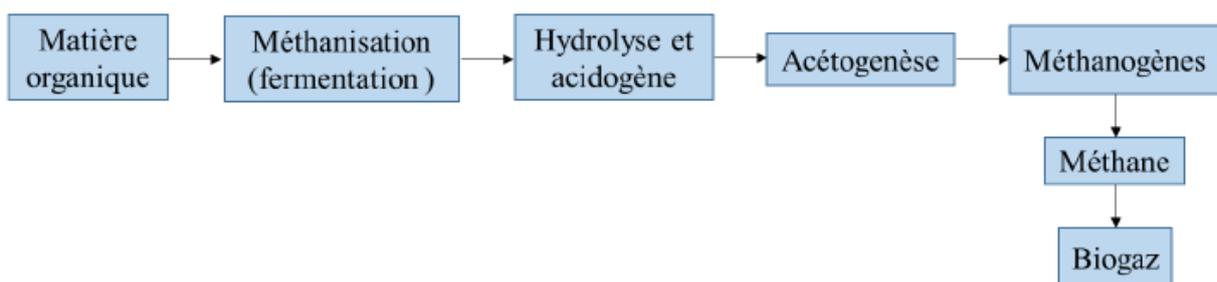


Figure II.1.3 : Schéma de transformation de la biomasse en biogaz.

3.2 Biocarburants de deuxième génération

Les biocarburants de 2ème génération sont obtenus à partir de la biomasse lignocellulosique, sans concurrence d'usage avec l'alimentaire : paille de céréales, miscanthus, bois et résidus forestiers, cultures dédiées...etc. Il y a, à ce jour, deux filières principales de production proches de l'industrialisation : la filière biochimique de production d'éthanol cellulosique et la filière

thermochimique de production de gazole et de kérosène de synthèse appelé BtL (Biomass to Liquid). D'autres voies moins matures sont à l'étude, comme par exemple la liquéfaction de la biomasse par pyrolyse rapide accompagnée d'un traitement catalytique du liquéfiât.

a) Filière biochimique (Voie biochimique)

Les trois (3) constituants majeurs de la biomasse lignocellulosique (cellulose, hémicelluloses et lignine) seule la cellulose est aujourd'hui facilement transformable en éthanol ; l'hémicellulose fait l'objet de recherches intensives pour la rendre convertible. La filière biochimique de production d'éthanol cellulosique s'effectue en trois grandes étapes [6].

- Une première étape consiste donc à extraire la cellulose puis à la transformer en glucose par hydrolyse à l'aide d'enzymes ;
- Deuxième étape le glucose est ensuite fermenté par des levures en éthanol. A moyen terme, il pourra être fermenté en d'autres alcools ou en hydrocarbures par des micro-organismes adaptés si les recherches en cours aboutissent ;
- Enfin, troisième étape l'éthanol est purifiée par distillation et déshydratation.

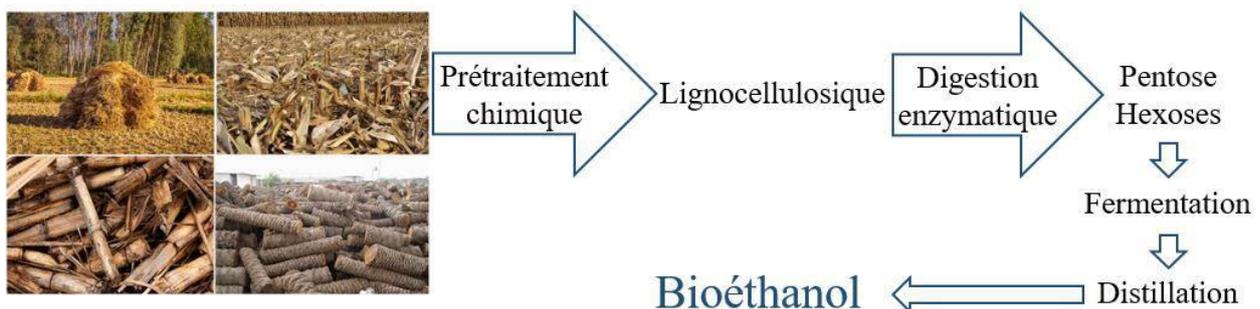


Figure II.1.4 : Production de bioéthanol de 2ème génération (voie biochimique) [5].

d) Filière Thermochimique (Voie thermochimique)

La filière thermochimique de production de gazole et de kérosène de synthèse appelé BtL (Biomass to Liquid), elle s'effectue en trois grandes étapes : [6]

- Première étape la biomasse est conditionnée par pyrolyse ou torréfaction ;
- Deuxième étape la biomasse est gazéifiée en présence de vapeur d'eau ou d'oxygène. On obtient ainsi un gaz de synthèse, constitué de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène (H₂) ;

- L'étape suivante est, en général, la synthèse Fischer-Tropsch, transformation chimique catalytique du gaz de synthèse en paraffines linéaires qui, hydrocraquées et isomérisées, produiront un gazole et un bio-kérosène de synthèse.

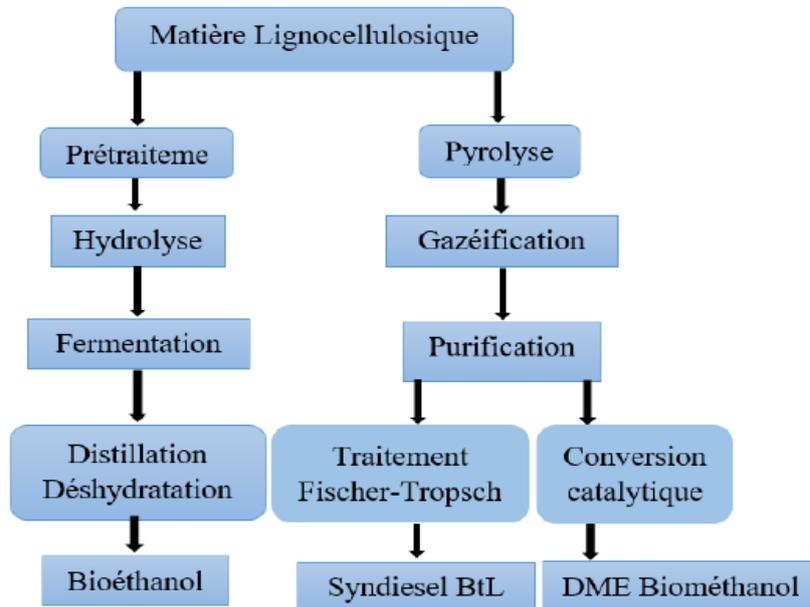


Figure II.1.5 : Procédé de la voie thermochimique.

3.3 Biocarburants de troisième génération

Les biocarburants à partir de micro-algues appelé "Algocarburant" est souvent présenté comme le biocarburant de troisième génération.

Ce sont des algues microscopiques, vivant en milieu aquatique, qui produisent naturellement des lipides (huiles). Elles peuvent être cultivées en conditions autotrophes, c'est à dire que pour leur croissance elles n'utilisent que de l'eau, des sels minéraux, du CO₂ et la lumière du soleil. A l'instar des plantes terrestres, elles fixent le CO₂ en utilisant l'énergie solaire par le mécanisme de la photosynthèse. Certaines espèces de micro-algues peuvent être cultivées en mode hétérotrophe à l'abri de la lumière et avec une alimentation en sucres.

Cultivées dans certaines conditions (par exemple carencé en certains nutriments) elles peuvent se mettre à produire et accumuler des lipides, principalement des triglycérides, dont la teneur peut atteindre jusqu'à 80 % de la matière sèche [5].

La production de ces biocarburants passe par 4 étapes :

1. Sélection des micro-algues pour leur richesse en huile c'est-à-dire prendre les algues contenant beaucoup de triglycérides ;
2. Culture dans de grands bassins de plein air ou dans des photo-bioréacteurs ;
3. Récolte et extraction de l'huile selon différentes méthodes ;
4. Conversion de l'huile en biocarburant. Il existe deux méthodes :
 - a) *La transestérification* : qui fait réagir l'huile algale avec du méthanol ou de l'éthanol, produit un ester d'huile algale ou biodiesel ;
 - b) *L'hydrogénation catalytique* : suivie d'un hydrocraquage va produire des hydrocarbures.

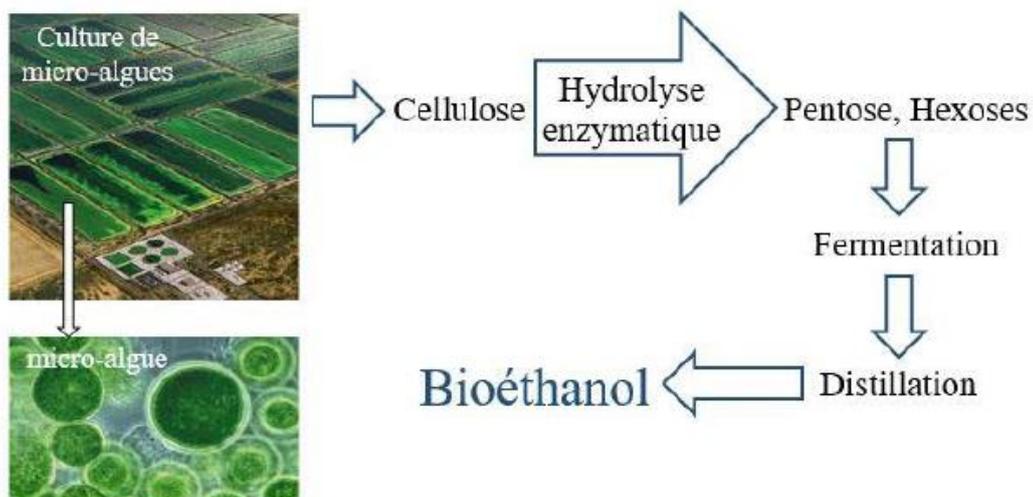


Figure II.1.6 : Production de bioéthanol de 3^{ème} génération [5].

4. Comparaison entre les générations des biocarburants

Les biocarburants se divisent en trois générations bien distinctes. Les biocarburants de ces générations constituent des énergies non fossiles, renouvelables et donc permettant de répondre à l'épuisement des ressources fossiles. Dans ce cas on a essayé de faire une comparaison entre ces générations, qui est résumé dans le tableau suivant :

Tableau II.1.1 : Comparaison des trois générations des biocarburants [7].

Génération	Avantages	Inconvénients
<i>1^{ère} Génération</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Peu coûteuse ; - Indépendance vis - à -vis du pétrole ; - Réduction des émissions de 	<ul style="list-style-type: none"> - Risque d'épuisement de la qualité organique et minérale du sol ; - compétition avec la

	gaz à effet de serre ;	production agricole alimentaire
2^{ème} Génération	<ul style="list-style-type: none"> - Coût des matières premières faibles à priori (bois + ressources supplémentaires) ; - Utilisation de l'entièreté de la plante, - Pas de compétition avec la filière alimentaire, 	<ul style="list-style-type: none"> - Concurrence entre les différents usages des terres agricoles ; - Concurrence avec les usages traditionnels des matières premières (déforestation), érosion des sols et appauvrissement.
3^{ème} Génération	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de problème de sol (saison fertile, espace). - Taux de croissance plus élevée pour les micro-algues moins de 1 mois, 90 % rejet de gaz à effet de serre moins que l'essence, rendement très bon avec recyclage du CO₂. 	<ul style="list-style-type: none"> - On ne connaît pas les impacts sur l'environnement que pourrait avoir la culture de micro-algues ; - Coût de production élevé, on ne sait pas comment extraire les micro-algues.

5. Références

- [1].Aroudj H et Bessaou S, (2012). Biocarburants : Avantages et Inconvénients. Mémoire d'Ingénieur. Université A.MIRA de Bejaïa.
- [2].Poitrat, E, (2005). Les biocarburants en France et en Europe (ADEM), Lyon.
- [3].Rapport sur l'industrie des énergies décarbonées, (2010). Direction Générale de l'Energie et du Climat ; Edition 2011.
- [4].Vallee, j. et Behaghel, R. (2008), Biocarburants de deuxième génération, institut national de pétrole France. <http://cerig.efpg.fr/mémoire/2008/biocarburant.htm>
- [5].Zerouali, A. (2019). Valorisation de la mélasse de canne à sucre (raffinerie groupe Berrahel) pour la production du bioéthanol. Mémoire de master. Université Abdelhamid Ibn Badis-Mostaganem.
- [6].Pierre, Porot. (2011). Biocarburants de deuxième génération : où en est la recherche ? Institut français de pétrole.
- [7].Chaib H., (2011). Etude et conception d'une bioraffinerie pour la production des biocarburants de seconde génération, Mémoire de Magister énergétique et procédés, Université d'Ouargla.

PARTIE II : BIOCARBURANTS

CHAPITRE II : BIOETHANOL

1. Définitions du bioéthanol

Le bioéthanol une forme d'énergie de la biomasse, est un combustible de remplacement pour l'essence, il s'agit d'une ressource renouvelable qui constitue une solution de rechange brûlant des énergies fossiles, la production classique de bioéthanol vient principalement de sucre ; toutefois ceci conduit à la concurrence entre les sources d'énergie alimentaire et la biomasse.

L'éthanol est un carburant agricole car il est produit à partir des matières premières [1].

2. Génération de bioéthanol

La production de bioéthanol à base de biomasse est plus durable. Il existe trois générations de bioéthanol qui ont été fondées sur différentes matières premières comme :

- ❖ Substrats riches en saccharose (canne à sucre),
- ❖ Substrat cellulosique tel que les résidus agricoles,
- ❖ Algues,

2.1. Bioéthanol de première génération

Le bioéthanol de première génération est obtenu par fermentation alcoolique des sucres, ces sucres sont soit directement présente dans la plante (canne à sucre), ou obtenu après hydrolyse enzymatique de l'amidon (grain de blé ou de maïs) [2]. Mais le principal inconvénient du bioéthanol de première génération est le risque de limiter l'alimentation de la population mondiale humaine parce que les matières premières proviennent de sources alimentaires ; en conséquence les prix des céréales et des huiles végétales ont sensiblement augmenté.

Les plantes sucrières comme la betterave, la canne à sucre et le sorgho sucrier ainsi certains fruits (pommes, pêches, poires, abricots, figues, dattes et raisins) renferment des sucres directement fermentes cibles en éthanol. Dans les tubercules comme la pomme de terre et le manioc, les sucres sont présents sous forme d'un polymère, l'amidon, d'où dérive leur autre dénomination de plantes amylacées. L'amidon est hydrolysé en monomères sucrés avant d'être transformé en éthanol. L'étape d'hydrolyse qui a été effectuée pendant longtemps par voie chimique en présence d'acides, depuis plus de vingt ans, réalisée par voie enzymatique, Le bioéthanol produit à partir de ces matières premières est dit de première génération. De tels inconvénients du bioéthanol de première génération ont donné lieu à la nécessité d'une production d'éthanol à partir de matières premières non alimentaires telles que la biomasse [4].

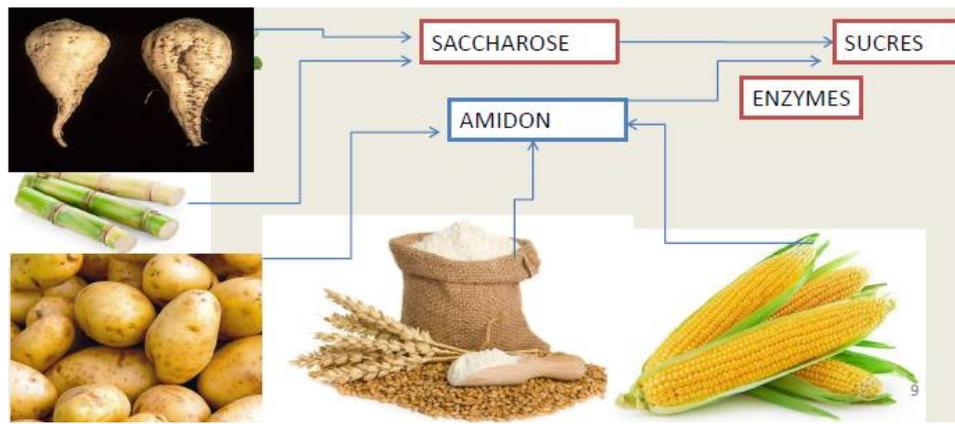


Figure II.1.1 : Sources de première génération [3].

2.2. Bioéthanol de deuxième génération

Le bioéthanol de deuxième génération, également appelé « biocarburant avancé » est produit par des matières premières ligno-cellulosiques et des résidus de forêts agricoles. Les avantages de ces matières premières sont la facilité de disponibilité. C'est le coût la production moyenne du bioéthanol en raison de sa composition de lignine [2]. Les matières premières non alimentaires utilisées pour la production d'éthanol de deuxième génération comprennent la biomasse cellulosique, telles que les cultures énergétiques dédiées (p.ex., Les arachides, les miscanthus) et les résidus agricoles et de bois (p.ex., Copeaux de bois, bagasse à la canne à sucre et sciure de bois). La biomasse cellulosique est principalement constituée de polymères de cellulose, d'hémicellulose et de lignine liés entre eux dans une matrice hétérogène.

2.3. Bioéthanol de troisième génération :

Les algues sont considérées comme des matières premières potentielles pour la production de bioéthanol de troisième génération, étant donné que la biomasse peut être directement transformée en énergie. En général, l'utilisation de cette matière première à des fins de production d'éthanol dépend de facteurs comme la technologie et l'environnement marin [5].

Ce bioéthanol représente le biocarburant produit par la biomasse algale. En effet, certaines algues ont la capacité de produire de grandes quantités d'hydrates de carbone (à la place de lipides) comme *Chlorella*, en particulier les espèces de *C. vulgaris*, avec un taux de glucides de 37-55% de son poids sec [6], *Chlamydomonas*, *Dunaliella*, *Scenedesmus*, *Tetraselmis* accumulent une large quantité de glucides (> 40% du poids sec). Ces microalgues sont des candidats idéaux pour la production de bioéthanol puisqu'elles se développent plus rapidement et

fixent le CO₂ avec un taux plus élevé que les plantes terrestres. En outre, les hydrates de carbone des microalgues sont principalement sous la forme d'amidon et de cellulose avec absence de lignine et sont donc beaucoup plus faciles à convertir en monosaccharides comparé à la biomasse lignocellulosique [7].

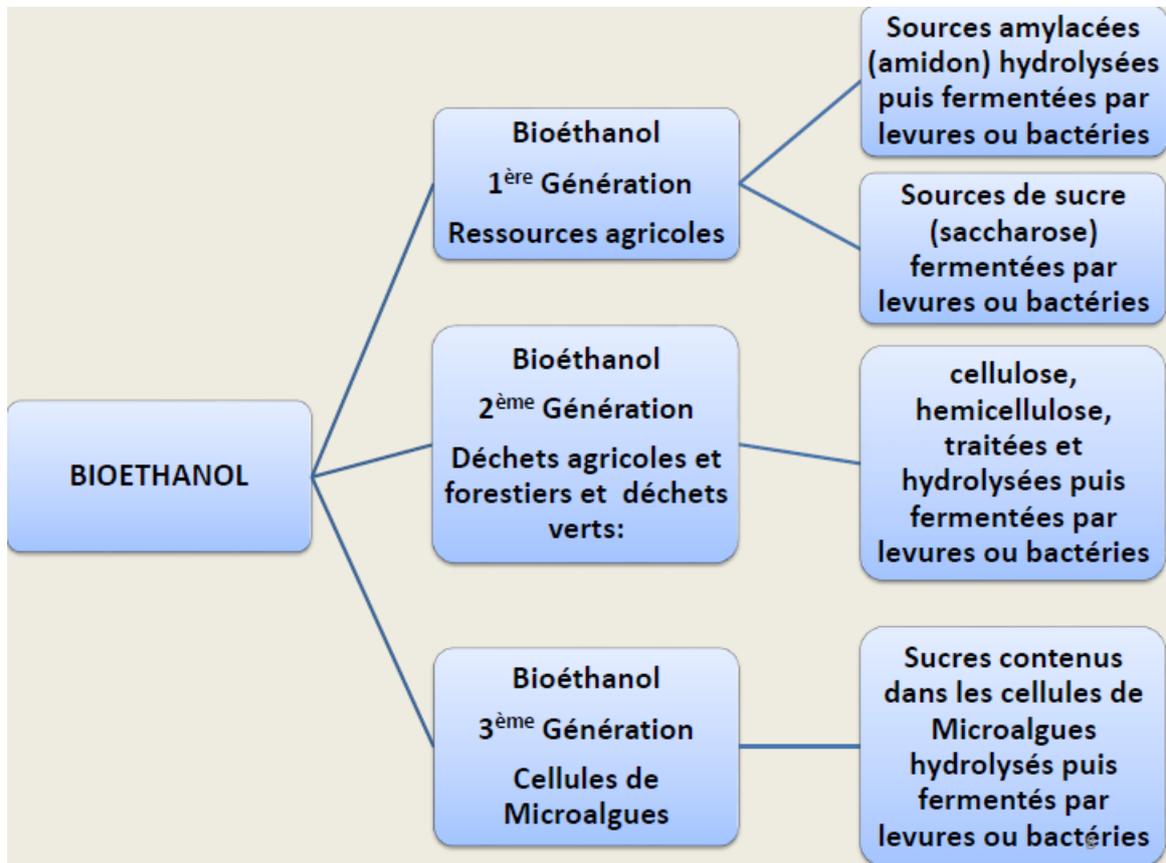


Figure II.2.1 : Générations du bioéthanol [3].

3. Utilisation de bioéthanol

Le bioéthanol peut être utilisé :

- Comme carburant dans les moteurs à essence
- Sous forme d'ETBE (l'éthyle tertio butyle) qui est formé par l'éthérisation catalytique d'isobutane avec l'éthanol. Il contient 45% une masse d'éthanol combiné sous forme chimique. L'ETBE possède les mêmes avantages que l'éthanol en termes d'accroissement d'indices d'octane
- Matière première pour la production de nombreux composés : éthylène, acide acétique, l'éthyle tertio butyle (ETBE)
- Solvant utilisé dans l'industrie des peintures, matières plastiques, vernis, parfums, cosmétique, l'industrie pharmaceutique.
- Désinfectants, produit de protection (comme biocide)



Figure II.2.2 : Principaux utilisations du bioéthanol [3].

4. Procédé de production de bioéthanol

La fermentation alcoolique doit se dérouler dans les meilleures conditions pour obtenir un produit de bonne qualité. Pour cela, il faut prendre en compte certains facteurs qui vont influencer sur la croissance de la levure et le maintien de son activité jusqu'à la fin de la fermentation.

- Les constituants du moût (la teneur en sucres, l'acidité du moût, le taux des éléments nutritifs), la nature de la souche de levure et l'aération.
- Le degré d'alcool atteint va dépendre de la teneur en sucre dans le moût de fermentation.
- Le moût doit être acide afin d'éviter tout risque de contamination bactérienne.
- Le taux des éléments nutritifs minéraux et organiques formé pour la levure.
- Enfin, une faible aération va permettre d'assurer la biosynthèse des stérols des membranes cellulaires nécessaires au maintien de la viabilité cellulaire. Ainsi, le bilan fermentaire et la productivité sont favorisés par l'oxygène.

Les paramètres exposés vont conduire à des variations sur le rendement en alcool, sa cinétique de production et la formation de sous-produits [8].

5. Procédés de fermentation

La production d'éthanol a fait l'objet de très nombreux travaux académiques et industriels afin d'améliorer les performances des procédés de production. Il existe plusieurs modes de conduite et de configuration du bioréacteur, qui sont primordiaux et doivent être déduites du métabolisme du microorganisme afin d'optimiser ses capacités de production (Fadel et al. 2013).

- a) *Fermentation Batch* : La culture en mode batch permet de considérer le réacteur comme un système fermé contenant une quantité fixée de milieu de culture, on inocule avec des microorganismes ayant éventuellement subi plusieurs phases d'adaptation. La culture en mode batch est caractérisée par une productivité faible, limitée par les concentrations en

biomasse liée à la concentration maximale admissible en substrat évitant toute inhibition des capacités fermentaires du microorganisme.

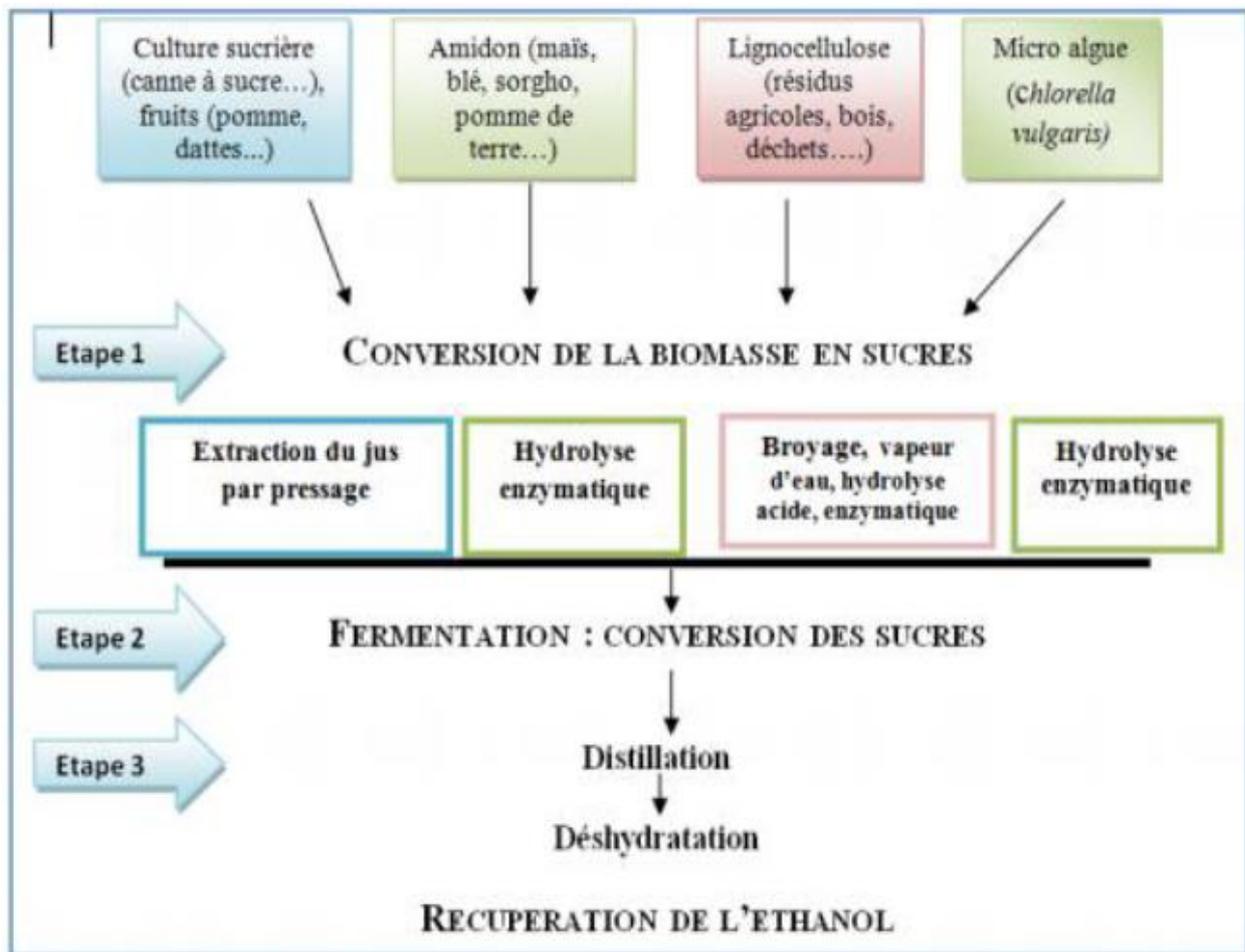


Figure II.2.3 : Les principales étapes de la production d'éthanol [9].

b) *Fermentation fed-batch* : On peut décrire les cultures en mode fed-batch comme des cultures alimentées de façon séquentielle ou continue, éléments nutritifs et substrats. La conduite en mode fed-batch permet d'atteindre de plus hautes concentrations en biomasse et produits que le mode batch en évitant l'inhibition par la concentration en substrat et la limitation en éléments nutritifs et en réduisant les effets toxiques des produits par dilution lors des apports.

c) *Fermentation en mode continu* : Le réacteur en mode continu est un système ouvert, dans lequel le milieu de culture est continûment additionné et le milieu de fermentation qui contient les métabolites produits, est continûment extrait, avec un volume réactionnel constant. La fermentation en mode continu peut combiner une cuve et un système de recyclage cellulaire ; dans ce cas une fraction de la biomasse cellulaire est recyclée dans la cuve [10].

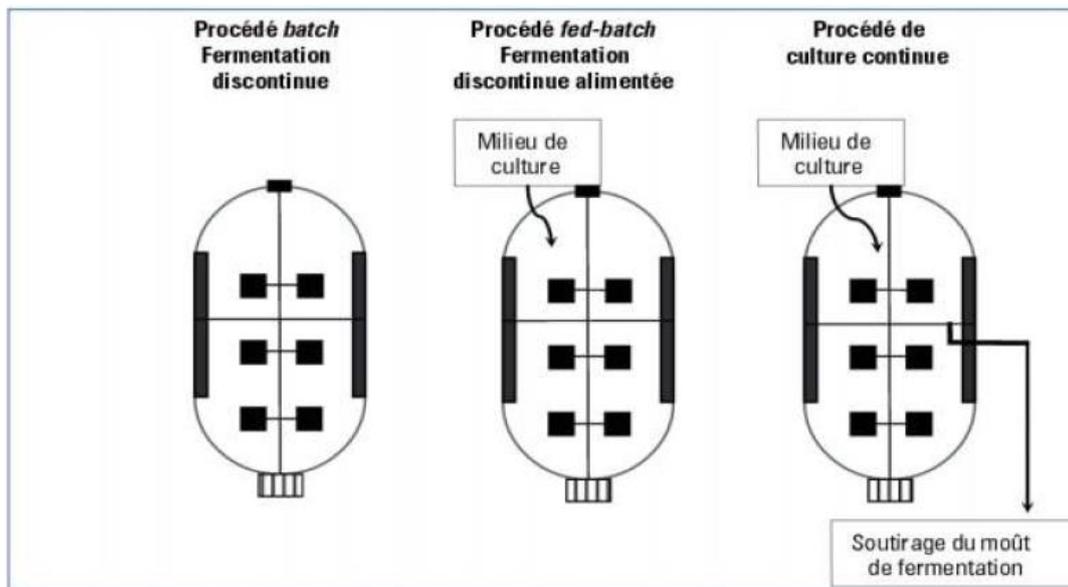


Figure II.2.4 : Types des procédés de fermentation.

La fermentation en mode continu permet l'obtention de productivités élevées, facilite le contrôle du procédé et la maîtrise des rendements. Les inconvénients de ce mode de conduite sont la limitation du taux de dilution afin d'éviter le lessivage du réacteur ainsi que l'inhibition du métabolisme (croissance et production) par les produits de la réaction biochimique et la perte de viabilité. En ce sens, plusieurs techniques ont été couplées telles que l'évaporation, l'extraction avec des solvants et filtration membranaire [11].

Les principaux produits de la fermentation alcoolique sont évidemment l'éthanol et le dioxyde de carbone. Le reste du glucose est utilisé lors de la croissance pour la production de biomasse et la production de sous alcoolique sont le glycérol, le succinate et l'acétate à 5% du substrat carboné restant. De l'acétaldéhyde, des acides gras (acide hexanoï alcools à plus de deux carbones ...etc) [12].

Fermentation alcoolique

La fermentation est une réaction biochimique, à localisation cytoplasmique, permettant la libération de l'énergie contenue dans un substrat organique par l'action d'enzymes microbiennes et qui aboutit à l'oxydation incomplète du substrat. Cette réaction ne fait pas intervenir la chaîne de transporteurs d'électrons [13]. Les processus fermentaires de production de boissons alcoolisées exploités par l'homme depuis le VI^e millénaire avant J-C étaient encore considérés comme « spontanés ».

La fermentation alcoolique consiste à transformer les sucres fermentescibles en anaérobiose par des levures en alcool et gaz carbonique avec dégagement de calories selon la réaction suivante :



Le rendement théorique calculé à partir de cette équation, appelé rendement de Gay-Lussac, établit que 100 kg de glucose produisent 51,1 kg d'éthanol. En 1857, Pasteur précise et quantifie les processus fermentaires anaérobies [14]. Il démontre que des coproduits sont toujours associés à la synthèse de l'éthanol et du gaz carbonique. Environ 3% sont des sucres transformés en glycérol, 0,5 % en acide succinique, 0,5-0,8 % en huiles de fusel (un mélange d'alcools amylique et propylique et de leurs isomères) et 0,8-1 % sont consommés pour assurer le développement des microorganismes fermentaires. En tenant compte de ces pertes en sucres, le rendement maximal, appelé rendement de Pasteur, correspond à la production de 48,4 g d'éthanol à partir de 100 g de glucose, soit 94,7 % du rendement théorique. La fermentation dure de 40 à 72 h et la température est fixée entre 280 et 32 °C [15].

Références

- [1]. Khelifi O, Laksaci H, Merabti ME, Zemani ND, Rezzaga S, Ozacar M, Nacef M, Chelaghmia ML, Affoune AM. Production of biofuel from *Washingtonia* fruits by anaerobic digestion with *Saccharomyces cerevisiae*: process optimization. *Fuel* 2024;358:130240.
- [2]. FAOSTAT, organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture surfao.org/faostat.
- [3]. Cours Biomasses et Biocarburants :<https://moodle.univmedea.dz/course/view.php?id=2510>
- [4]. Atiyeh H.K. A review of conversion processes for bioethanol production with a focus on syngas fermentation. *Biofuel Research Journal* 7 (2015) 268-280. DOI:10.18331/BRJ2015.2.3.
- [5]. W. S. Lau, *Infrared characterization for microelectronics*, World Scientific, 1999.
- [6]. Dragone, G., Fernandes, B.D., Abreu, A.P., Vicente, A.A., Teixeira, J.A., 2011. Nutrient limitation as a strategy for increasing starch accumulation in microalgae. *Appl. Energy* 88 (10): 3331-3335.
- [7]. Ho, S. H., Chen, C. Y., Chang, J. S., 2012. Effect of light intensity and nitrogen starvation on CO₂ fixation and lipid/carbohydrate production of an indigenous microalga *Scenedesmus obliquus* CNW-N. *Bioresour. Technol.* 113: 2443-252.
- [8]. Castro, C.M., 2007. *Brettanomyces bruxellensis*: Etude Métabolique, Cinétique et Modélisation. Influence des facteurs environnementaux. Thèse de doctorat (INP Toulouse).
- [9]. Cot, M., 2006. Etudes physiologiques de l'adaptation et de la résistance de la levure *Saccharomyces cerevisiae* au cours de la production intensive d'éthanol. Thèse de doctorat. (INP Toulouse).
- [10]. Djelal, H., Larher, F., Martin, G., Amrane, A. 2012a. Continuous Culture for the Bioproduction of Glycerol and Ethanol by *Hansenula Anomala* Growing Under Salt Stress Conditions, *Annals of Microbiology*, 62(1), 493-54.
- [11]. Kargupta, K., Datta, S., Sanyal, K. 1998. Analysis of the performances of a continuous membrane bioreactor with cell recycling during ethanol fermentation. *Biochemical engineering Journal*, 1, 31-37.
- [12]. Oura, E. (1997). Reaction products of yeast fermentations. *Process Biochem.* 12: 19-21.
- [13]. Riess, J., 2012. Intensification de la brique "fermentation alcoolique" de substrats betteraviers (et autre substrats) pour la production d'éthanol. Thèse de doctorat (INP Toulouse).
- [14]. Kaidi F., Touzi A., 2001. Production de bioalcool à partir des déchets de dates. *Revue des Energies Renouvelables*, NS: Biomasse production et valorisation. P 75-78.
- [15]. Açourene, S., 2012. Valorisation biotechnologique des dattes de faible valeur marchande par la production de la levure boulangère, éthanol, acide citrique et α -amylase. Thèse de Doctorat INA option science Agronomique.

PARTIE II : BIOCARBURANTS
CHAPITRE III : BIODIESEL

La production et l'utilisation de biodiesel à l'échelle mondiale ont connu une forte croissance en raison des préoccupations environnementales accrues, de l'incertitude concernant la sécurité des réserves de pétrole brut, du surplus mondial de graines Oléagineuses et des différentes subventions et politiques gouvernementales favorables Consécutives à la hausse des prix des combustibles minéraux. La fabrication du biodiesel est une alternative de production de combustibles propres, biodégradables, renouvelables et non toxiques. il peut à la fois servir de carburant de remplacement au diesel. Pur ou mélangé, il réduit les émissions de CO₂, de matières particulaires, de monoxyde de carbone, d'hydrocarbures et de fumée noire que génèrent les véhicules. Ce phénomène pourrait provoquer des changements désastreux dans l'environnement, Le biodiesel est produit à partir de graisses animales ou de déchets de graisses de cuisson ; combinés avec de l'alcool (habituellement le méthanol). La transformation de ces produits donne du biodiesel pur et de la glycérine brute comme produit final. Le biodiesel entre dans les perspectives de la réduction des gaz à effet de serre [1].

1. Définition

Le biodiesel est un mélange constitué d'esters éthyliques ou méthyliques d'huile végétale (EEHV ou EMHV) ou de gras animal. Contrairement au pétrodiesel, qui est formé de plusieurs hydrocarbures composés uniquement d'atomes de carbone et d'hydrogène, le biodiesel contient de l'oxygène. Le biodiesel est par ailleurs biodégradable, ce n'est pas le cas du pétrodiesel [2].

Le biodiesel est un biocarburant destiné à être utilisé dans les moteurs Diesel et provient de la conversion de lipides (huiles végétales et graisses animales) en carburant. Les sources de matière première les plus utilisées pour la fabrication du biodiesel sont :

- Les huiles végétales, vierges ou usées ; il s'agit aussi d'un agro-carburant.
- Les huiles extraites d'algues ou de microalgues (algo-carburant).
- Les graisses animales (relativement peu utilisées) [3].

Le biodiesel a de meilleures propriétés que le carburant au petrodiesel; il est renouvelable, biodégradable, non toxique et essentiellement exempt de soufre et d'aromatiques. Le biodiesel semble être un carburant réaliste pour l'avenir; il est devenu plus attrayant récemment en raison de ses avantages environnementaux. Le biodiesel est un carburant écologique qui peut être utilisé dans n'importe quel moteur diesel sans modification [4].

2. Sources végétales du biodiesel :**1) Huile de Microalgues**

Les microalgues sont des algues microscopiques. Certaines de ces espèces ont une richesse en huile jusqu'à hauteur de plus 50% de leur masse. Ces microalgues offrent des perspectives assez intéressantes non seulement à cause de leur richesse en huile mais leur croissance rapide permettant d'effectuer des récoltes complètes en quelques jours seulement. A cet effet, les chercheurs américains, japonais, français et allemands ont projeté de produire à l'échelle industrielle du carburant à base d'huile d'algues (microalgues) [2].

2) Huile *Pongamia pinnata*

Le pongamia est un arbre à croissance rapide, fixateur d'azote, très résistant à la sécheresse, pousse en plein soleil, sur les sols difficiles, même sur les sols salés et producteur d'huile. Au regard de certaines aptitudes de cet arbre, l'Inde encourage sa plantation sur des terres impropres à la culture traditionnelle [3].

3) Huile de *Jatropha*

Le jatropha curcas ou pourghère est un arbuste des zones arides pouvant atteindre une hauteur de 4 à 5 m au bout de 3 à 4 ans de croissance. Cet arbuste nécessite très peu d'eau et de nutriments pour sa croissance. Sa culture dans les zones menacées de désertification assure la protection du sol de l'érosion et la rétention d'eau. C'est une plante oléagineuse dont son rendement moyen en huile est de 1892 litres/ha/an.

4) Huile de *Palme*

Elle occupe la deuxième position mondiale en termes de production après l'huile de soja [4], l'huile de palme est assez bien connue en Afrique centrale qu'en Afrique de l'ouest particulièrement dans les zones côtières du Cameroun, de la Cote- d'ivoire, du Nigeria, etc. Dans la plupart de pays africains, cette huile est utilisée à des fins alimentaires. Mais au Nigeria, un vaste projet de développement de la culture du palmier à huile a été lancé dans le but de produire du biocarburant [5]. C'est en Asie du sud-est que la production d'huile de palme pour le biocarburant a été massivement développée au prix de la déforestation. L'huile de palme donne généralement un bon rendement de culture de 5000 litres/ha/an.

5) Huile de *Tournesol*

C'est une huile produite à partir des graines de tournesol. Ayant un écobilan excellent, très légère, cette huile est très utilisée comme biocarburant mais elle a la particularité de contenir plus de gomme que l'huile de colza, par exemple. Son rendement moyen est de 662 litres/ha/an.

6) Huile de Colza

Extraite de graines de colza, c'est une huile très pauvre en acides gras saturés. Elle est facilement utilisable en tant que biocarburant et peu chère. Le rendement moyen de colza est de 572 litres/ha/an.[3]

7) Huile d'Arachide

C'est une huile claire très polyvalente, ne nécessitant pas de raffinage pour pouvoir être cuite sans risque cancérigène. L'huile d'arachide est l'une des huiles alimentaires les plus consommées en Afrique et ne pourrait être utilisée sans précaution comme biocarburant car elle fige à de température haute (son point trouble serait 13°C) [6].

8) Huile de Coton

Classée au rang de la cinquième huile alimentaire mondiale la plus consommée, l'huile de coton est peu connue en Europe mais très développée dans les pays africains producteurs de coton comme le Burkina, Togo, Mali, Cameroun, la Côte-d'Ivoire, etc. Cette huile est d'abord utilisée dans la cuisson des aliments. Elle est, par la suite valoriser énergétiquement pour produire de l'électricité. C'est le cas depuis 1988 des sociétés Cotonnières du Mali et du Tchad [3].



Figure II.3.1 : Exemples des sources végétale du biodiesel [1].

3. Etapes de production de biodiesel

3.1. Etape de mélange des réactifs

Les réactifs, l'huile et l'alcool (méthanol ou éthanol) sont introduits, puis mélangés dans la cuve servant de réacteur en présence du catalyseur. Selon la configuration du réacteur, les réactifs sont introduits soit directement dans la même cuve ou soit de manière séparée dans de différentes cuves par la suite, mélangés dans la cuve d'huile.

3.2. Etape de réaction

Une fois que le mélange huile/alcool ait lieu dans le réacteur, le processus de la réaction de transestérification se déclenche pour durer un certain temps. Les conditions de température et de pression sont fonction du type de catalyse. Un système de chauffage du réacteur et de l'agitation est nécessaire pour la réaction. A la fin de la réaction, huile passe à l'état d'ester en changeant ses propriétés physico-chimiques : la viscosité, la densité, la masse molaire.

3.3. Etape de décantation

Après la formation des esters au cours de la transestérification, une étape de décantation du produit est nécessaire pour séparer le biodiesel du glycérol. Le glycérol plus dense que le biodiesel se condense dans la partie basse. La décantation peut s'effectuer dans le réacteur par gravité, ou dans des décanteurs statiques ou par des centrifugeuses pendant deux à trois heures de temps.

3.4. Etape de lavage

Une étape de purification de l'ester consiste à éliminer les impuretés telles que la glycérine résiduelle, l'excès d'alcool, les traces de catalyseurs, savons et sels formés par la catalyse homogène. Cette opération s'effectue par lavage du biodiesel à l'eau. Une purification poussée des esters est réalisable par passage sur une colonne remplie d'un absorbant sélectif ou un lit de résines échangeuses d'ions. La distillation de type flash sous vide assure également la pureté de l'ester.

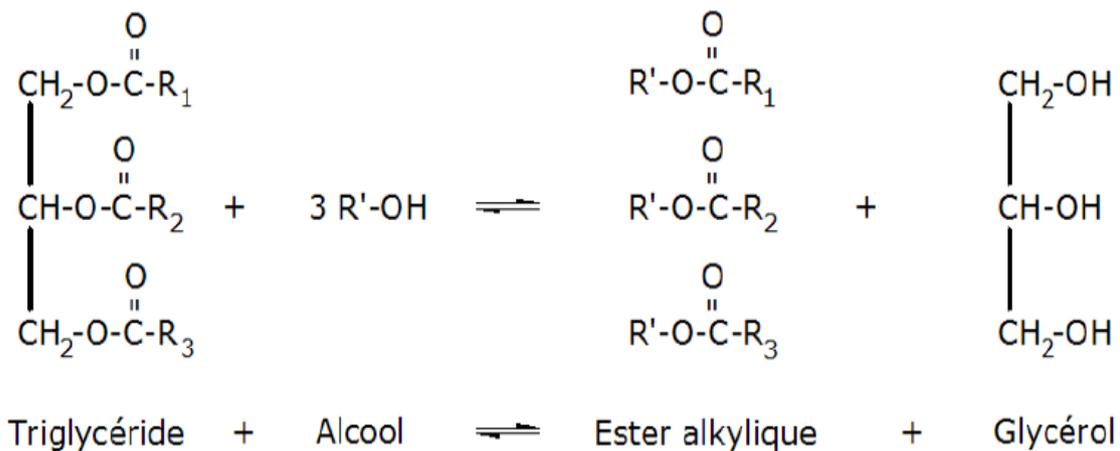
3.5. Etape de séchage

Après lavage du biodiesel à l'eau, l'opération de séchage permet d'évacuer l'eau présente. Elle est le plus souvent réalisée par chauffage à une forte température du biodiesel lavé, la température de séchage pouvant atteindre 140°C en procédé continu par catalyse homogène.

4. Formation du biodiesel

La transformation des huiles ou des graisses en esters éthyliques ou méthyliques permet de réduire la masse moléculaire à un tiers de celle de l'huile, de réduire la viscosité d'un facteur huit, de réduire la densité et d'augmenter la volatilité. Les propriétés physiques des esters éthyliques et méthyliques obtenus lors de la réaction de transestérification sont alors proches de celles du diesel [1].

La transestérification est un procédé chimique dans lequel une huile végétale ou animale est mélangée à un alcool en présence d'un catalyseur pour obtenir de l'ester alkylique d'huile végétale ou animale communément appelé biodiesel. Le passage d'état d'huile à celui d'ester permet de : réduire la masse moléculaire au tiers de celle de l'huile, réduire la viscosité d'un facteur de huit, réduire la densité et augmenter sa volatilité [3]. Cette réaction de transestérification est régie par l'équation bilan ci-dessous suivante :



La décomposition thermique d'une huile qui est un ester de glycérine, en absence d'oxygène, conduit à la formation de glycérol et d'un mélange d'esters. L'objectif d'une telle étude est l'utilisation des esters obtenus comme carburant diesel ; l'étude conduit en même temps à :

- l'élimination totale de la glycérine,
- la diminution du point d'ébullition de l'huile,
- la diminution du point éclair de l'huile [5].

Dans le procédé de transestérification, un mélange de catalyseur et d'alcool est ajouté à l'huile à transformer. La réaction réduit ainsi le poids moléculaire, la viscosité et augmente la volatilité des lipides. Toutefois, différents paramètres peuvent influencer le rendement de transestérification comme le type d'alcool, le ratio alcool-huile, le type de catalyseur et sa concentration, la température de la réaction et la vitesse d'agitation, le temps de réaction.

Une transestérification des huiles avec du méthanol à l'état supercritique (sans catalyseur) a été développée, mais le coût de cette technologie rend son utilisation impossible à ce jour.

5. Utilisation du biodiesel

Les biodiesels apparaissent comme des produits prometteurs pour le remplacement des combustibles fossiles à court terme puisqu'ils sont renouvelables, biodégradables et ils viennent des ressources agricoles présentes dans la plupart des pays producteurs. En dehors des éléments qu'on vient de citer, l'utilisation des biodiesels présente plusieurs avantages pour le moteur.

- Ils ne contiennent pratiquement pas de soufre. (0.001 % massique),
- Ils diminuent considérablement les émissions de suie,
- Ils ne contiennent aucun benzol ou d'autres composants cancérigènes poly aromatiques,
- Ils ont des capacités de lubrification intéressantes et donc peuvent contribuer à augmenter la durée de vie du moteur,
- Le biodiesel a un point d'inflammabilité inférieur à celui du diesel de pétrole [14].

Contrairement au diesel de pétrole, ils sont composés d'Esters Méthyliques d'Huiles Végétales (EMHV) ou d'Esters Ethyliques d'Huiles Végétales (EEHV). Comme on l'a vu précédemment, ces Alkyls Esters ont des propriétés comparables à celles du gazole ce qui fait qu'ils sont préférables par rapport aux huiles végétales et ont des intervalles de distillation compris entre 320 °C à 350 °C, les situant au niveau des fractions les plus lourdes du gazole [7].

6. Avantages du biodiesel

Le biodiesel s'est imposé comme une alternative prometteuse au gasoil et possède les propriétés attractives suivantes [8] :

- ❖ Peut brûler jusqu'à 75 % moins polluant que le diesel conventionnel,
- ❖ Peut réduire la quantité d'hydrocarbures imbrûlés, de CO et de particules dans les gaz d'échappement ;
- ❖ Sans soufre ;
- ❖ Réduire le potentiel de formation d'ozone ;
- ❖ Réduire les émissions d'oxyde nitreux (NOx) en ajustant le temps de calage du moteur ;
- ❖ L'odeur n'est pas désagréable et ne cause pas d'irritation oculaire ;
- ❖ Une énergie respectueuse de l'environnement et renouvelable ;
- ❖ Peut être utilisé dans n'importe quel moteur diesel et l'économie de carburant est la même que celle d'un carburant diesel conventionnel ;

Références

- [1]. Cours Biomasses et Biocarburants :<https://moodle.univmedea.dz/course/view.php?id=2510>.
- [2]. Brodeur C., Cloutier J., Crowley D., Desmeules X., Pigeon S. And St-Arnaud R., '*La Production De Biodiesel A Partir De Cultures Oléagineuses*', Centre De Référence En Agriculture Et Agroalimentaire Du Québec, Publication No Evc 031, Pages 1-4, 2008. <https://www.craaq.qc.ca/data/documents/Evc031.pdf>.
- [3]. KHIARI K., 'Contribution à l'étude des propriétés thermo-physiques des biocarburants de seconde génération et leur influence sur le comportement des moteurs', doctorat, Ecole des Mines de Nante, France, décembre 2016.
- [4]. SELAIMIA R., 'Etude de l'huile d'olive d'Algérie', thèse de Doctorat, Université de Guelma, Algérie, 2018.
- [5]. Rhiad, A., Le biodiesel : une source d'énergie propre et prometteuse. Division Bioénergie& Environnement, 2010.
- [6]. Ndiaye, E.H.I., Caractérisation Thermophysique Des Biodiesels : Vitesse Du Son, Densité, Compressibilité, In Ecole Doctorale Des Sciences Exactes Et De Leurs Applications 2012, L'université De Pau Et Des Pays De l'adour.
- [7]. BENDIAF hadjer, Développement d'un système de production du biodiesel à partir d'huile utilisé, Mémoire Master, Université Abou Bakr Belkaid, 2018.
- [8]. Jamil, F., Al-Muhtaseb, A., Myint, M.T.Z., Al-Hinai, M., Al-Haj, L., Baawain, M., Al-Abri, M., Kumar, G and Atabani, A.E. Biodiesel Production by Valorizing Waste Phoenix dactylifera L. Kernel Oil in the Presence of Synthesized Heterogeneous Metallic Oxide Catalyst (Mn@MgO-ZrO₂). Energy Conversion and Management, 2018, 155, 128–137.

PARTIE II : BIOCARBURANTS

CHAPITRE 4 : BIOGAZ

1. Définition

Le biogaz (parfois qualifié de gaz « renouvelable » ou gaz « vert ») est un gaz principalement issu de la méthanisation de matières organiques fermentescibles, par exemple de déchets et d'effluents d'élevage (fumier, résidus de récoltes, etc.) ou de déchets municipaux (boues de stations d'épuration des eaux urbaines, déchets alimentaires, etc.) [1].

Le biogaz est le gaz produit par fermentation de matières organiques. C'est un gaz combustible composé essentiellement de méthane et de dioxyde de carbone. Il peut être brûlé sur son lieu de production pour obtenir, par cogénération, chaleur et électricité, ou purifié pour obtenir du biométhane utilisable comme gaz naturel pour véhicules (bioGNV) ou injectable sur le réseau de distribution de gaz naturel [2].

La méthanisation se produit spontanément dans les marais (gaz des marais), les rizières, les grands réservoirs ou barrages hydroélectriques tropicaux, les décharges contenant des déchets ou matières organiques (animales, végétales, fongiques ou bactériennes). On peut la provoquer artificiellement dans des digesteurs (en particulier pour traiter des boues d'épuration et des déchets organiques industriels ou agricoles).

2. Composition du biogaz

Le biogaz est principalement composé de méthane (50 à 70 %), mais aussi de dioxyde de carbone (CO_2) et de quantités variables de vapeur d'eau et de sulfure d'hydrogène (H_2S), voire d'autres composés (« contaminants »), notamment dans les biogaz de décharges [3]. Parmi les impuretés figurent [4]: des siloxanes; des composés organochlorés (dont chlorure de vinyle, dichlorométhane, trichlorométhane et tétrachlorométhane qui sont des substances cancérogènes); des composés soufrés (mercaptans); des composés azotés (NH_3); de l'hydrogène; divers produits intermédiaires de fermentation (alcools, acides, esters, etc.); des métaux et métalloïdes; quelques microbes anaérobies (éventuellement méthanotrophes) [5].

Sa teneur en ces différents éléments, et donc sa valeur énergétique, dépend de la durée et qualité du processus de fermentation, du type d'installation et beaucoup de la nature de la matière fermentescible utilisée (et en particulier de ses proportions en carbone, hydrogène, oxygène et azote ou contaminants indésirables). Par exemple, une matière fermentescible riche en carbone et hydrogène produit un biogaz contenant jusqu'à 90 % de méthane, alors que de la cellulose plus pauvre produira un biogaz à seulement 55 % de méthane (et 45 % de gaz carbonique).

3. Biométhanisation

La biométhanisation consiste en une série d'opérations de dégradations biologiques des matières organiques qui se produisent en l'absence d'oxygène (de façon anaérobie). Les produits résultants de la dégradation peuvent être classés en deux catégories, le biogaz et le digestat.

Le biogaz est un mélange gazeux composé essentiellement de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2), issu de la fermentation anaérobie de la matière organique contenue dans les déchets. Les proportions relatives de ces gaz dépendent de la nature du substrat fermenté et des conditions de fermentation. Le biogaz peut être produit spontanément, dans des conditions naturelles (marais, décharges d'ordures ménagères...) ou bien dans des installations spécifiques appelées digesteurs. La digestion est une technique de dépollution et de conditionnement des déchets, qu'ils soient liquides ou solides [6].

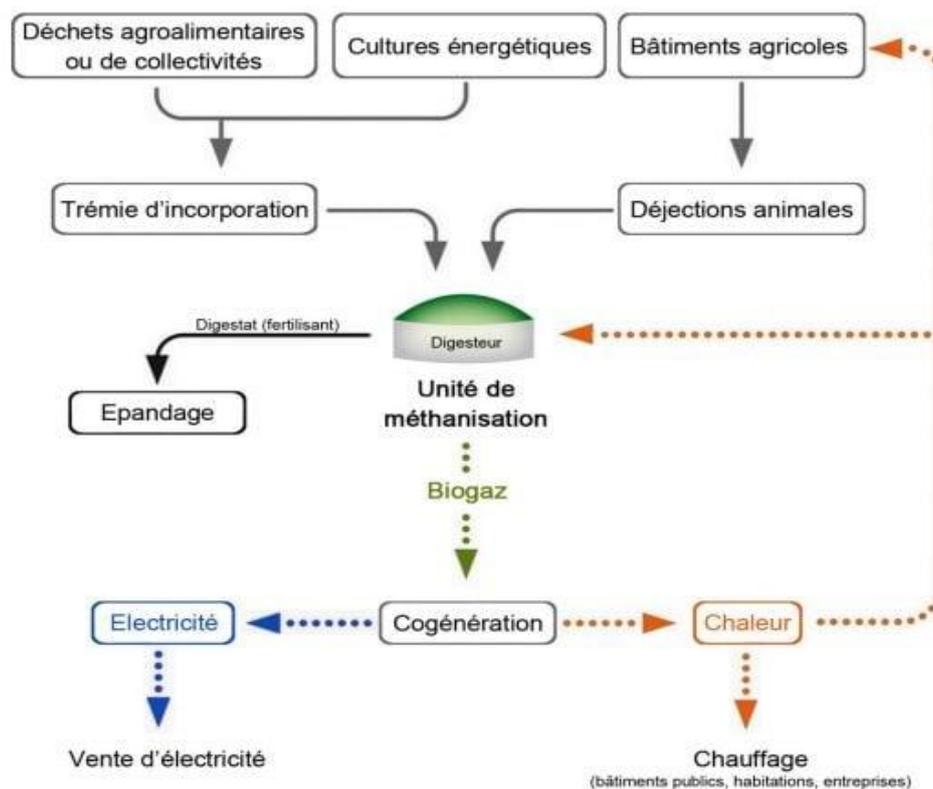


Figure II.4.1 : Schéma explicatif du processus de méthanisation [1].

Les déchets solides :

- Les déchets d'ordures ménagères : le biogaz est produit par méthanisation naturelle « passive » dans les décharges, ou par traitement dans un digesteur.

- Les déchets organiques non ménagères : industries agro-alimentaires, restauration collective.....
- Les déjections animales.
- Les boues de station d'épuration, stabilisées puis conditionnées.

Les déchets liquides :

- Les effluents domestiques.
- Les effluents industriels traités par fermentation anaérobie : industries agroalimentaires, papeteries et certaines industries chimiques. Le digestat est le résidu liquide contenant les matières non dégradées, il peut être utilisé comme engrais à haut potentiel fertilisant (boues stabilisées) pour les terres agricoles.

4. Etapes de biométhanisation

La biométhanisation se réalise en absence d'oxygène, ce qui permet de stabiliser les matières organiques en les transformant le plus complètement possible en méthane et en dioxyde de carbone. C'est le résultat d'une activité microbienne complexe qui se divise en quatre étapes principales :

4.1. L'hydrolyse

Par laquelle les macromolécules organiques se trouvent décomposées en éléments plus simples ; le déchet solide est ainsi liquéfié et hydrolysé en petites molécules solubles, à l'origine du jus de fermentation ; on parle de « solubilisation » des matières organiques : par exemple, la cellulose est transformée en sucres solubles tels que le glucose ou le cellobiose.

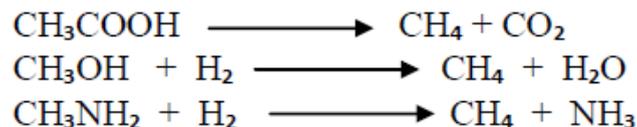
4.2. L'acidogénèse

Elle transforme les molécules simples par l'action des bactéries en acides de faibles poids moléculaire, tel l'acide lactique ou des acides gras volatils de 2 à 5 atomes de carbone (acétate, propionate, butyrate); parallèlement, sont produits des alcools de faibles poids moléculaires, tel que l'éthanol, du bicarbonate (HCO_3^-) et de l'hydrogène moléculaire (H_2)

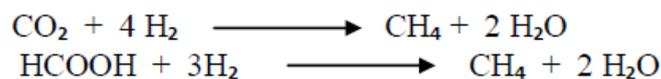
4.3. L'acétogénèse : Tous les produits résultants de l'étape de liquéfaction/fermentation autre que l'acétate (CH_3COO^-), le bicarbonate (HCO_3^-) et l'hydrogène moléculaire (H_2) nécessitent une transformation supplémentaire avant de pouvoir effectivement produire du méthane. C'est ici qu'interviennent des bactéries réductrices acétogènes et des bactéries sulfato-réductrices, productrices d'hydrogène, et d'hydrogène sulfuré (H_2S).

4.4. La méthanogenèse :

c'est la phase, au cours de laquelle deux types de bactéries méthanogènes prennent le relais : les premières, acétogènes, réduisent l'acétate (CH_3COO^-) en méthane (CH_4) et en bicarbonate (HCO_3^-). Les secondes, hydrogénotrophiques, réduisent le bicarbonate (HCO_3^-) en méthane (CH_4). Les acétogènes, productrices de méthane à partir d'acide acétique, de méthanol et de méthylamines :



Les hydrogénotrophiques, spéciales dans la réduction du CO_2 par l' H_2 et production de méthane à partir d'acide formique :



Ces réactions sont lentes et peu exothermiques. Elles génèrent néanmoins 70 % du méthane produit. Il résulte que le biogaz produit est généralement composé [7]:

- De moitié aux trois quarts de méthane (CH_4)
- D'un quart à la moitié de dioxyde de carbone (CO_2)

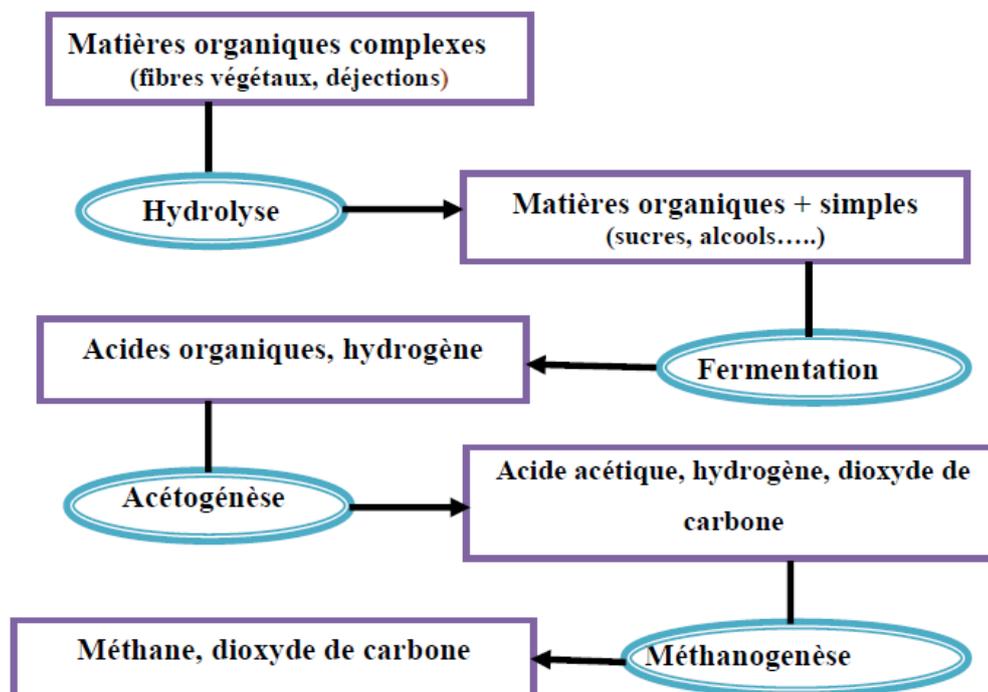


Figure II.4.2 : Schéma des différentes étapes de biométhanisation [7].

5. Paramètres influençant la biométhanisation

La méthanisation est un phénomène naturel où les réactions sont connues et peuvent être contrôlées. Toutefois, la production de gaz, ses caractéristiques et l'efficacité de la fermentation nécessitent certaines conditions et peuvent varier selon plusieurs facteurs [8].

5.1. Le substrat

Il a une influence sur la composition du biogaz et sur le rendement de la réaction. Un lisier de Porc ou un effluent de volaille donnera un gaz beaucoup plus riche en méthane qu'un fumier moins riche en azote obtenu à partir d'un élevage de bovins. Ainsi le rapport C/N caractéristique de chaque substrat est un facteur de la composition du biogaz obtenu. Plus celui-ci est petit et plus le gaz résultant est riche en méthane [9]. Or, la proportion de méthane exerce une grande influence sur le pouvoir calorifique du biogaz. En effet, celui-ci augmente quand cette proportion est plus importante.

➤ Pouvoir calorifique supérieur (PCS) : C'est l'énergie thermique libérée par la réaction de combustion d'un kilogramme de combustible. Cette énergie comprend la chaleur sensible, mais aussi la chaleur latente de vaporisation de l'eau, généralement produite par la combustion. Cette énergie peut être entièrement récupérée si la vapeur d'eau émise est condensée, c'est-à-dire si toute l'eau vaporisée se retrouve finalement sous forme liquide.

➤ Pouvoir calorifique inférieur (PCI) : C'est l'énergie thermique libérée par la réaction de combustion d'un kilogramme de combustible sous forme de chaleur sensible, à l'exclusion de l'énergie de vaporisation (chaleur latente) de l'eau présente en fin de réaction. En outre, selon la qualité du substrat, le gaz obtenu sera plus ou moins riche en hydrogène sulfuré (H_2S) qui, mélangé à l'eau et au dioxyde de carbone, rend le biogaz beaucoup plus corrosif, nécessitant un système de traitement et d'épuration du gaz.

Les caractéristiques du substrat utilisé pour la méthanisation s'avèrent donc être des paramètres importants de la valorisation énergétique de celui-ci. Il ne faut pas non plus oublier que les caractères physiques du substrat (état, température, viscositéEtc) jouent beaucoup dans l'élaboration du procédé. Il faudra ainsi tenir compte de ces considérations pour le choix du système et adapter celui-ci aux différents paramètres du substrat valorisé.

5.2. La température

La fermentation anaérobie peut s'effectuer selon trois gammes de températures adaptées à trois flores microbiennes différentes : - Psychrophile : 15-25°C ; - Mésophiles : 25-55°C ; - Thermophiles : 55-75°C

La plupart des fermenteurs sont des digesteurs mésophiles et la fermentation thermophile est surtout utilisée pour les grosses unités de méthanisation.

L'intensité de l'activité des micro-organismes est très étroitement liée à la température. Celle-ci est quasiment nulle entre 0 et 15 °C, commence à partir de cette valeur et grandit de façon proportionnelle pour atteindre un optimum vers les 37-40°C (valeur plus haute pour les réactions thermophiles). La température est un facteur prépondérant pour le rendement énergétique d'où la nécessité de placer un thermomètre dans le système d'installation.

5.3. Le pH et l'oxygène

La stricte anaérobiose est indispensable au développement de la flore responsable de la méthanisation, car la présence d'oxygène conduit à la production des gaz indésirable (H₂S, NH₃, H₂) et le pH optimal doit être proche de 7.

5.4. L'agitation

Une bonne agitation permet de maintenir les matières solides en suspension, d'éviter la formation de mousse et de croûte, d'accroître la surface d'échange, d'assurer le transfert de chaleur et de faciliter le dégagement des bulles de biogaz.

5.4. La présence des inhibiteurs

La fermentation anaérobie peut parfois être ralentie par la présence d'inhibiteurs. Ces phénomènes sont généralement connus et évitables et sont souvent liés aux élevages ou l'utilisation d'antibiotiques et de désinfectants est massive.

Par exemple l'ammoniac peut parfois devenir un élément toxique pour l'activité bactérienne au-delà d'une dose de 3g.L⁻¹.

5.5. L'humidité

Comme pour toute activité biologique, la présence d'eau est indispensable. L'humidité des déchets doit être suffisante pour que l'hydrogène, première étape de la biométhanisation, puisse se dérouler normalement. Si au contraire l'humidité est insuffisante, l'acidification se fait trop vite au détriment de la méthanisation, de ce fait le substrat organique doit être dilué (85 à 90% d'eau avec 10 à 15% de matière sèche) [10].

Références

- [1]. Connaissance Des Énergies, <https://www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/quest-ce-que-le-biogaz>.
- [2]. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Biogaz>
- [3]. « Gaz de décharge », sur clarke-energy.com.
- [4]. Nawfal M., Valorisation catalytique du biogaz pour une énergie propre et renouvelable (thèse), université du Littoral-Côte-d'Opale, 2015.
- [5]. Afsset, « Avis et rapport de l'Afsset relatifs à : L'évaluation des risques sanitaires liés à l'injection de biogaz dans le réseau de gaz naturel», 2008.
- [6]. P. Mouchet, « traitement des eaux avant utilisation. Matières particulaires ». 2004, technique d'ingénieur G1270.P4,P9.
- [7]. L. ANGELIQUE. « Biométhanisation », Séminaire sur les métiers de l'énergie, Université de Liège- Haute Ecole Charlemagne- Hemes, avril 2002.
- [8]. M.PIDOUX. « Agriculture et effet de serre : Adaptation des pratiques agricoles, - Alternatives énergétiques », Edition D .A. Environnement, ANGERS 2000.
- [9]. B. De La FARGE. «Le biogaz : Procédés de fermentation méthanique » , Edition Masson, Toulouse 1995.
- [10]. I.TOU, S. IGOUD et A. TOUZI. « Production du biométhane à partir des déjections animales », Revue des énergies renouvelables, Publication du CDER, juin 2001.