

**Faculté des Sciences Exactes et d'Informatique**

**Département de Physique**

**Filière : Physique**

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master en Physique

Option : **Physique des matériaux**

Présenté par :

**SIAD HADJIRA**

THEME :

**Production de bioénergie à base de déchets agricoles et industriel**

Soutenu le : 22 Juin 2022

Devant le jury composé de :

Abbes Charef	MCA	Université de Mostaganem	Président
Rahal Wassila Leila	MCA	Université de Mostaganem	Examineur
Hassini Noureddine	Professeur	Université de Mostaganem	Encadreur
Benstaali Wafa	MCA	Université de Mostaganem	Co-Encadreur

Année Universitaire 2021-2022

## Dédicaces

*À MES CHERS PARENTS*

***MA MÈRE** VOUS ÉTIEZ TOUJOURS LÀ, À MES COTÉS, POUR M'ENCOURAGER, ME SOUTENIR ET SURTOUT ME DONNER DES ONDES POSITIFS QUAND JE VOULAIS BAISSER LES BRAS. JE NE POURRAI JAMAIS VOUS RENDRE TOUT CE QUE VOUS AVEZ FAIT JUSTE POUR ME RENDRE HEUREUSE*

***MON PÈRE** JE VOUS REMERCIE DU FOND DE MON CŒUR ET J'ESPÈRE QUE JE VOUS AI RENDUE FIÈRE DE MOI*

*À MA CHÈRE SŒUR **WISSEM** TU ÉTAIS TOUJOURS LÀ À MES COTÉS, TU ME DISAIS TOUJOURS QUE TU VAS Y ARRIVER JE N'OUBLIERAI JAMAIS TON SOUTIEN*

*À MES CHERS FRÈRES **HABIB, RÉDA, ISMAHEN ET DJAMILA** MERCI D'AVOIR CRU EN MOI.*

## Remerciements

*En tout premier lieu je remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné la force, la patience et le courage pour dépasser toutes les difficultés durant mon parcours universitaire*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur le Professeur **Hassini Noureddine** pour m'avoir suivi et conseillé durant cette période, je suis tellement honorée et chanceuse de vous avoir choisis comme encadrant merci pour votre disponibilité votre écoute votre patience merci pour le partage de votre expérience pour la sympathie que m'avez accordée ainsi pour votre gentillesse et la bonne humeur je vous suis profondément reconnaissante*

*Je remercie madame **Benstaali Wafa** pour son aide, sa disponibilité, ses conseils et sa rigueur au travail*

*A monsieur le président de jury **Abbes Charef**, je vous adresse ma sincère gratitude d'avoir accepté de présider mon jury.*

*A madame **Rahal Wassila Leila** je suis tellement honoré et reconnaissante pour avoir eu la gentillesse d'accepter de juger et examiner ce mémoire.*

*Au personnel du laboratoire de chimie qui m'ont apportés leurs aides durant mes travaux expérimentaux : **M<sup>r</sup> Hmida Gheribi, M<sup>elle</sup> Touatia Rahmani et M<sup>r</sup> Touati Bouazza.***

*Enfin je remercie **M<sup>elle</sup> Benbouzid Zineb** de m'avoir aidé pour réaliser ce mémoire, je suis tellement satisfaite et honoré de travailler avec toi. Je te souhaite toute la réussite dans ton parcours de recherche.*

*Je n'oublierai pas d'exprimer ma profonde reconnaissance à tous mes enseignants et à toutes les personnes qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui*

## Liste des figures

Figure N°	Titre	Page
1-1	Sources de biomasse	05
1-2	Catégories de biomasse lignine	06
1-3	Procédés de la pyrolyse et de la gazéification	09
2-1	Procédé de fermentation alcoolique	16
2-2	Montage de distillation simple	20
2-3	Montage de distillation fractionnée	21
2-4	Schéma de distillation discontinue "batch distillation"	22
3-1	Structure de la molécule d'éthanol	25
3-2	Etapas de production des biocarburants de 1 <sup>ère</sup> génération	28
3-3	Etapas de production des biocarburants de 2 <sup>ème</sup> génération	29
3-4	Etapas de production des biocarburants 3 <sup>ème</sup> génération	30
4-1	Mode opératoire de l'expérience	35
4-2	Principales étapes de la première expérience	37
4-3	Dispositif de distillation	38
4-4	Ethanol obtenu	38
4-5	Principales étapes de la deuxième expérience	39
4-6	Réfractomètre	40

## Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
1-1	Classification des catégories de biomasses	07
1-2	Options de valorisation énergétique	08
1-3	Procédés pour produire de l'énergie à base de biomasse	11
2-1	Type de fermentation	19
3-1	Propriétés physiques l'éthanol	26
3-2	Différentes générations de biocarburants et leurs caractéristiques	31
4.1	Résultats des analyses physicochimique du bioéthanol	39

# Table des Matières

Introduction générale	01
Chapitre 1 : La Biomasse	03
Introduction	04
1- La biomasse	04
1-1. Définition	04
1-2. Classification des ressources et catégories de biomasse	05
1-3. Composition chimique de la biomasse	06
1-4. Les procédés de transformation de la biomasse	07
1-5 : Les avantages de la biomasse	11
Conclusion	12
Chapitre 2 : Fermentation et Distillation	13
Introduction	14
2-1. La fermentation	14
2-1-1. Les procédés de fermentation	15
2-1-2. Les types de fermentation	15
2-1-3. Morphologie et métabolisme de la levure <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	16
2-1-4. Les facteurs physico-chimiques qui influencent la fermentation	17
2-2. La distillation	19
2-2-1. La distillation simple	20
2-2-2. La distillation fractionnée	21
2-2-3. La distillation discontinue	21
Conclusion	22
Chapitre 3 : Bioéthanol et biocarburants	23
Introduction	24
3-1. Le bioéthanol	24
3-1-1. Propriétés physiques	25
3-1-2. Propriétés chimiques	25
3-2. Biocarburant	26
3-3. Les générations de biocarburants	27
3-4. Le Biogaz	31
3-5. Etude des biocarburants utilisables dans les moteurs à allumage par compression	31
Conclusion	33

Chapitre 4 : Expériences et résultats	34
Introduction	35
4-1. Biomasses utilisées	35
4-2. Matériels utilisés	35
4-3. Les étapes de Production de bioéthanol	36
4-4. Résultats de l'analyse physicochimique du Produit final (bioéthanol )	40
4-5. Analyse des résultats	41
Conclusion	41
Conclusion générale	42
Bibliographie	43

# Introduction générale

De nos jours la problématique environnementale occupe l'attention des scientifiques dans le monde entier à cause du changement et du réchauffement climatique. L'augmentation des niveaux de gaz à effet de serre, l'épuisement progressif des ressources en pétrole et l'augmentation à la demande en énergie ont rendu nécessaire à la recherche de ressources alternatives propres et durables aux combustibles fossiles afin de répondre à la demande de la population tout en maintenant son niveau et sa qualité de vie et surtout pour la survie de l'humanité [1].

Les travaux présentés dans ce mémoire portent sur la proposition d'un procédé de production d'éthanol à basse de biomasse de première génération et l'utiliser comme biocarburant pour le secteur de l'automobile.

La biomasse en tant que matière organique est présente en grande quantité et offre des avantages environnementaux allant de la diminution de gaz à effet de serre et la production de bioénergie, la biomasse riche en sucre ou en amidon, offre des opportunités pour un carburant durable, plus propre, sans danger pour l'environnement, neutre en carbone et des alternatives vertes aux carburants fossiles, bien que la biomasse soit présente en quantités massives sur notre planète, elle n'est pas utilisée correctement pour la production de bioéthanol en raison de nombreux obstacles dans le processus de bioconversion comme le prétraitement, le coût élevé des enzymes, la conversion des sucres mélangés, la fermentation [2].

La production de biocarburant renouvelable et durable (bioéthanol) à partir de la biomasse suscite un intérêt considérable à l'échelle mondiale. Les biocarburants sont importants et bénéfiques d'un point de vue environnemental et économique, le "gasoil", essence mélangée à l'éthanol, utilisé pour le secteur des transports réduit considérablement les émissions de gaz à effet de serre ainsi que la consommation de combustibles fossiles. de grands efforts ont été consacrés à la technologie. amélioration du processus de bioconversion, y compris dans les domaines de l'énergie biotechnologique et métabolique [2].

L'objectif de notre étude est de choisir une biomasse accessible, disponible et de faible cout et de proposer un procédé complet, applicable, permettant la production de bioéthanol.

Nous avons structurés notre mémoire en quatre parties.

Dans le chapitre 1 nous allons donner les définitions de la biomasse, montrer les catégories de biomasses et présenter les procédés de transformation pour chaque types de biomasse.



Le chapitre 2 sera dédié au procédé de fermentation et de distillation. Les paramètres qui influencent la fermentation et la distillation y seront discutés.

Le chapitre 3 sera consacré à la production du bioéthanol et son utilisation comme biocarburant

Dans le chapitre 4 nous présenterons la partie expérimentale de notre travail, nous y présenterons les montages réalisés et les expériences effectués en laboratoire. Les résultats obtenus y seront présentés.

Enfin, une conclusion générale faisant la synthèse de l'ensemble des résultats, expérimentaux et numériques, des contributions originales de ces travaux de recherche, ainsi que des perspectives envisageables pour leur poursuite.

# **Chapitre 1**

## **La biomasse**

## **Introduction**

La biomasse est l'une des ressources utilisées pour produire de l'énergie à partir des déchets agricoles ou ménagers. Dans le but de créer de l'électricité, de la chaleur ou du biocarburant

L'énergie de la biomasse est classée comme une source d'énergie renouvelable, malgré certains facteurs environnementaux.

Le débat est toujours en cours sur la question de savoir si la biomasse est une énergie verte ou pas, par rapport aux autres ressources naturelles.

L'énergie de la biomasse semble être bénéfique : C'est une source d'énergie alternative avec beaucoup de potentiel pour être à la fois fiable et cohérente.

Aujourd'hui, plus de 45% de l'énergie consommée est renouvelable, l'énergie de la biomasse en fournit environ 12%. Cela en fait le deuxième contributeur après le vent. [1]

Dans ce chapitre, nous aborderons la définition, les applications, les types, le fonctionnement, l'effet environnemental, les avantages et les inconvénients de la biomasse. Comment la biomasse est convertie en énergie et comment elle peut être utilisée pour produire de la bioénergie

### **1- La biomasse**

#### **1-1. Définition**

La biomasse signifie simplement «matières organiques». Autrement dit, la biomasse est tout ce qui est issu du vivant, comme les déchets animaux, les déchets agricoles, etc. La biomasse capte et stocke l'énergie du soleil, les plantes absorbent l'énergie du soleil dans le processus de photosynthèse. L'énergie des plantes est transmise aux êtres vivants qui s'en nourrissent. Ainsi, l'énergie renouvelable de la biomasse dépend de la méthode de transformation de celle-ci [2].

Selon l'UE et l'ONU, la biomasse est une source d'énergie renouvelable car elle peut être renouvelée en plantant plus d'arbres et de plantes. Cependant, ce n'est peut-être pas aussi vert qu'on pourrait l'espérer car la combustion de la biomasse favorise l'émission de carbone, qui pourrait prendre jusqu'à 100 ans pour se résorber. Mais elle est toujours considérée comme une source renouvelable [2].

La diversité des matières organiques disponibles et des différents procédés technologiques, mis au point pour transformer la biomasse, permet d'obtenir différents types d'énergie ou encore des produits intermédiaires, sous formes liquide, gazeuse ou solide [2].

Les sources de biomasse qui sont disponibles sur une base renouvelable et qui sont utilisées soit directement comme combustible, soit converties en une forme ou un autre produit énergétique sont appelées matières premières.

Les matières premières de la biomasse comprennent les cultures énergétiques dédiés, les résidus de cultures agricoles, les résidus forestiers, les algues, les résidus de transformation du bois, les déchets municipaux et les déchets urbains [3].



Figure 1-1 : Sources de biomasse [2]

## 1-2. Classification des ressources et catégories de biomasse

Les ressources de la biomasse peuvent être classées en plusieurs catégories, selon leurs origines :

**a. Le bois** : sous forme de bûches, granulés et plaquettes

**b. Les sous-produits du bois** : qui couvrent l'ensemble des déchets produits par l'exploitation forestière (branchage, écorces, sciures...), et par les scieries (sciures, plaquettes...), par les industries de transformation du bois (menuiseries, fabricant de meubles), ainsi que les emballages tels que les palettes

**c. Les sous-produits de l'industrie** : tels les boues issues de la pâte à papier et les déchets des industries agroalimentaires (marcs, pulpes et pépins, écorces, etc.) [5].

**d. Les produits issus de l'agriculture traditionnelle** : résidus tels que la paille, la bagasse (céréales, oléagineux) et les nouvelles plantations à vocation énergétique telles que les taillis à court cycle (saules, miscanthus)

**e. Les déchets organiques** : tels que les déchets urbains comprenant les boues d'épuration, les ordures ménagères, etc.

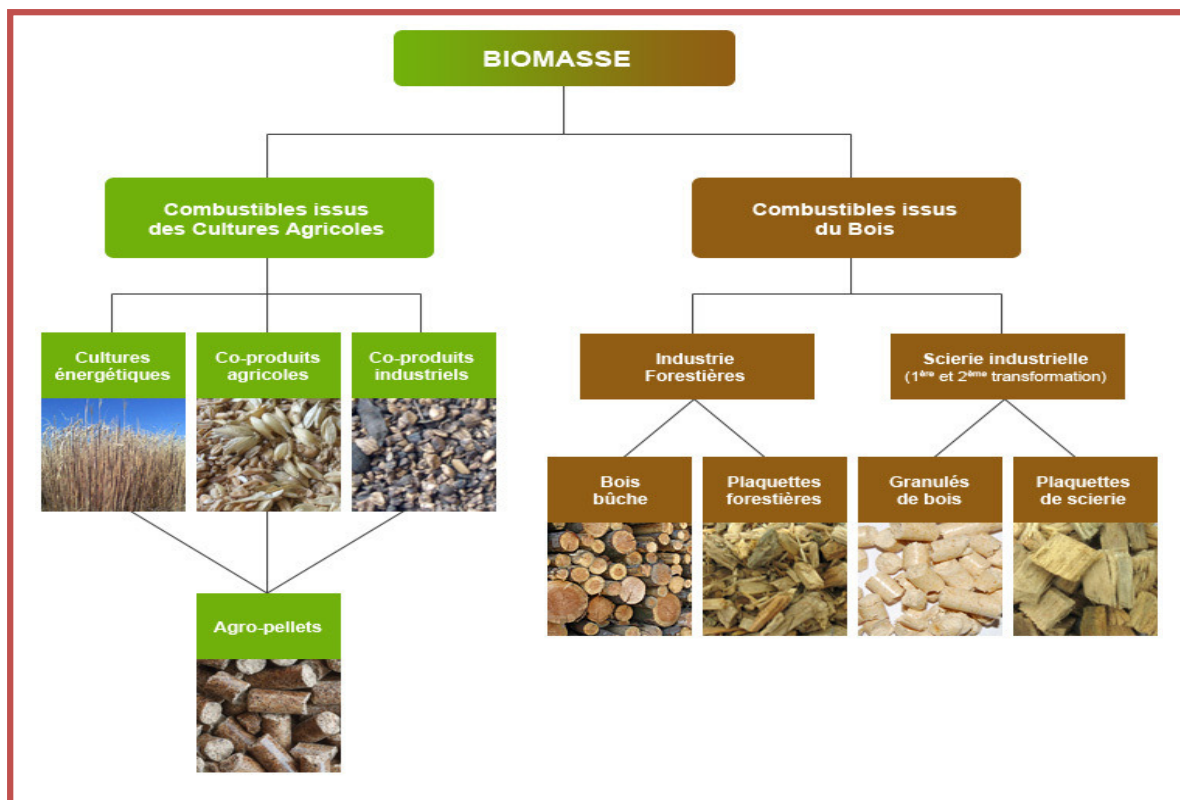


Figure 1-2 : Catégories de biomasse lignine [3]

### 1-3. Composition chimique de la biomasse

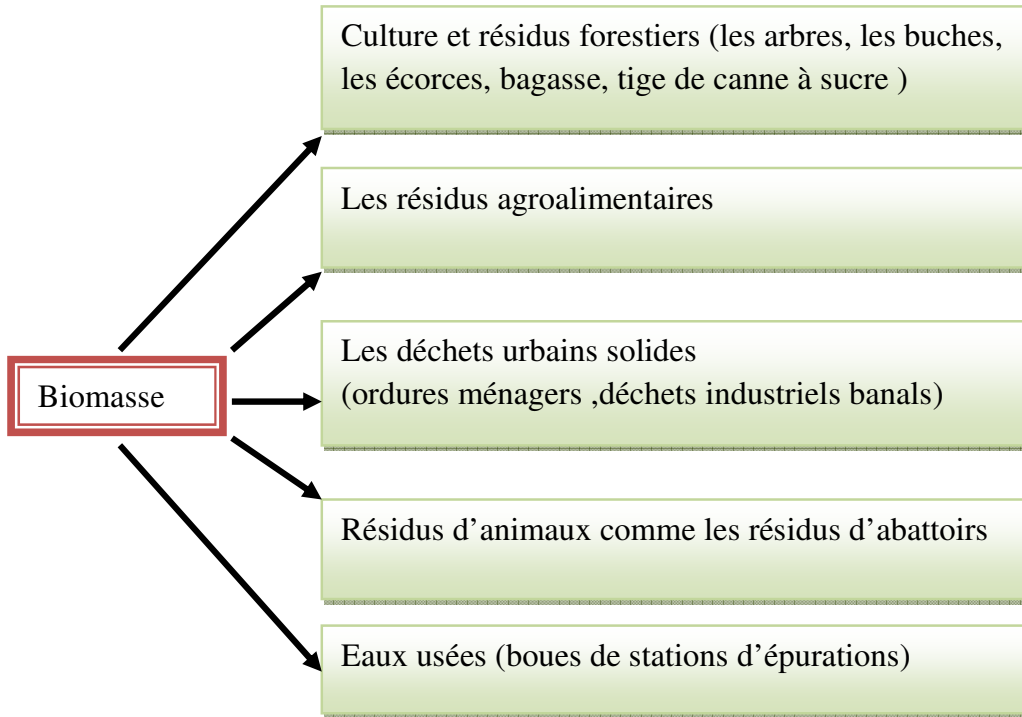
La biomasse peut prendre différentes formes :

a- La biomasse lignocellulosique (à base de matières végétales) : C'est une excellente ressource pour la production de bioéthanol. Le bioéthanol issu de la lignocellulose est une ressource énergétique durable et renouvelable ayant un grand potentiel énergétique.

b- La biomasse oléagineuse riche en lipides : colza, palmier, etc.

c- La biomasse à glucide : les céréales, les betteraves sucrières et les cannes à sucre que l'on peut facilement transformer [4].

Tableau 1-1 Classification des catégories de biomasses



#### 1-4. Les procédés de transformation de la biomasse

La biomasse est convertie en énergie par divers procédés pour produire soit de l'énergie directement soit des combustibles gazeux ou liquides [5].

- Conversion thermochimique
- Conversion chimique
- Conversion biologique

**1-4-1. La combustion directe :** est un moyen relativement efficace pour produire de la chaleur. C'est la méthode la plus courante pour convertir la biomasse en énergie utile. Toute la biomasse peut être brûlée directement pour chauffer les bâtiments et l'eau pour les procédés industriels et pour produire de l'électricité dans les turbines à vapeur.

La combustion directe consiste essentiellement à brûler la biomasse forestière. Cette technique engendre l'entière oxydation à haute température (plus de 1000 °C) de la matière et nécessite un apport constant d'une grande quantité d'air. Cette matière, qui servira à alimenter les équipements de combustion nécessite des installations adaptées telles qu'une chaudière, un générateur d'air chaud ou un four à bois.

Aussi, ce procédé a la capacité de produire séparément de la chaleur et de l'électricité, générée pendant le passage de la vapeur dans une turbine à vapeur, ou les deux simultanément. Dans ce dernier cas, on parlera alors de cogénération d'énergies [6].

Tableau 1-2 : Multiples options de valorisation énergétique [4]

De multiples options de valorisation énergétique			
Ressources		Technologies de transformation	Débouchés
<b>Cultures dédiées annuelles et pluri-annuelles</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• plantes et herbacées</li> <li>• sylviculture</li> </ul>	Collecte	<b>Voie thermo-chimique</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• combustion</li> <li>• pyrolyse</li> <li>• gazéification</li> <li>• valorisation du gaz de synthèse :               <ul style="list-style-type: none"> <li>- purification, séparation</li> <li>- procédés catalytiques (FT, MeOH, DME)</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Chaleur</li> <li>• Vapeur</li> <li>• Electricité</li> </ul>
<b>Co-produits des cultures dédiées</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• pailles et tiges de céréales et oléagineux</li> <li>• résidus forestiers</li> </ul>	Transport		
<b>Autres co-produits et résidus</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• agricoles</li> <li>• industrielles</li> <li>• ménagères</li> <li>• autres...</li> </ul>	Stockage	<b>Voie biologique</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• réactions enzymatiques</li> <li>• fermentation</li> <li>• distillation, purification...</li> </ul>	<b>Carburants &amp; combustibles</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• hydrogène</li> <li>• méthane</li> <li>• naphta</li> <li>• essences</li> <li>• distillats</li> <li>• méthanol</li> <li>• éthanol</li> <li>• DME</li> <li>• EMHV ; EEHV</li> <li>• ETBE</li> <li>• bio brut</li> <li>• charbon de bois</li> <li>• autres...</li> </ul>
	Pré-traitement	<b>Voie oléo-chimique</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• raffinage chimique et physique</li> <li>• esterification</li> <li>• hydrotraitement</li> </ul>	

**1-4-2. La pyrolyse et la gazéification** : ces deux processus de conversion thermo-chimique comprennent la décomposition thermique dans lesquels les matières premières sont chauffées dans des récipients fermés sous pression appelés gazéificateurs à haute température. Ils diffèrent principalement par les températures de traitement et la quantité d'oxygène présente pendant le processus de conversion.

La transformation de la biomasse sous hautes températures (900 à 1050 °C) en gaz de synthèse (syngas), décrit le procédé de gazéification qui se compose des étapes suivantes : séchage, pyrolyse, oxydation et réduction.

Ces températures rendent optimale la production de gaz, le procédé va décomposer la matière carbonée et former un syngas essentiellement composé de CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>.

D'abord, le syngas généré doit impérativement être dépollué du goudron; résultat direct de la gazéification. Ensuite, celui-ci peut, par exemple, être utilisé à des fins de production de chaleur ou d'électricité en étant brûlé, ou être converti par catalyses en hydrocarbures, comme le diesel ou le méthanol (avec le procédé Fischer-Tropsch) ou en gaz vecteurs d'énergie comme l'hydrogène (H<sub>2</sub>) et le méthane (CH<sub>4</sub>) [7].

Durant la pyrolyse, la matière sera décomposée à environ 500 °C et en absence d'oxygène.

Cette technique permet d'abord d'obtenir un gaz qui sera par la suite refroidi rapidement pour donner un liquide, de la bio huile ou huile pyrolytique, pour ainsi faciliter son transport, son entreposage et son utilisation. Cette bio huile est en réalité un condensat liquide noir. Outre ce liquide, une fraction solide (biocharbon) est également obtenue, mais en quantités moindres. Effectivement, la fraction liquide représentera de 60 % à 70 % de la biomasse initiale, alors que les fractions solide et gazeuse équivalent à 15 et 20 %.

Cependant, certaines difficultés sont présentes lors de son utilisation en remplacement de carburants conventionnels en raison des propriétés physico-chimiques bien différentes de l'huile pyrolytique. Par exemple, celle-ci possède une forte teneur en eau et en composés oxygénés qui engendre une grande teneur en oxygène (35 à 40 %) dans l'huile. Les composés oxygénés sont bien présents et font en sorte que la capacité calorifique de l'huile pyrolytique est 50 % moins grande que celle des carburants conventionnels. Outre cela, d'autres propriétés comme son acidité élevée (pH entre 2 et 3), sa viscosité instable et sa teneur en solide (particules fines) limitent le potentiel commercial de l'utilisation de ce produit à ce stade. Quant à la liquéfaction, celle-ci se produit à plus basse température (250 à 350 °C), mais à haute pression (10 à 20 Mpa) .Dès lors, il est possible de convertir directement la matière lignocellulosique en bio huile.

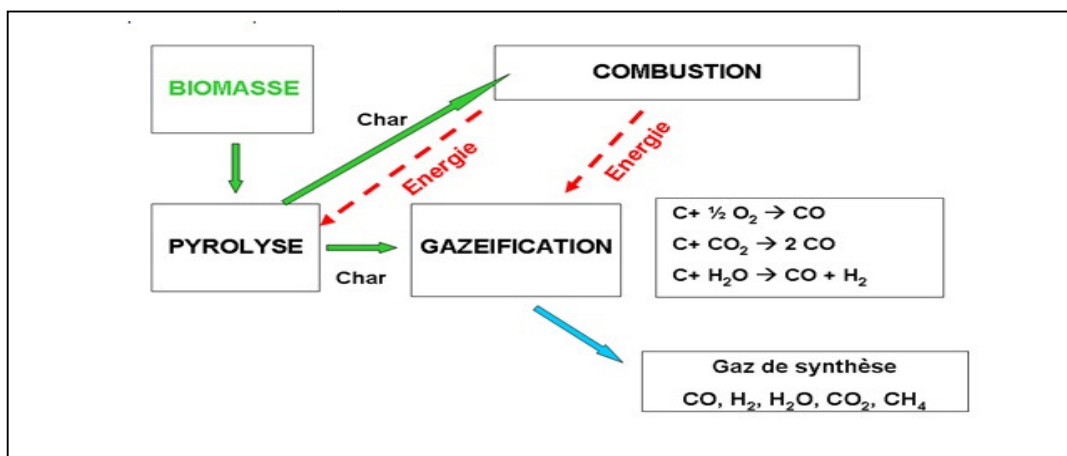


Figure 1-3 : Procédés de la pyrolyse et de la gazéification [3]

**1-4-3. La Méthanisation** : C'est la conversion de la biomasse par les bactéries en milieu anaérobie, donc en absence d'oxygène. Ce procédé génère du biogaz, composé essentiellement de méthane et de dioxyde de carbone. La composition complexe du bois nuit à l'efficacité de sa conversion en biogaz. En effet, la matière est naturellement résistante à la dégradation anaérobie et plusieurs alternatives de prétraitement (ex. l'élimination de la lignine et la diminution de la cristallinité de la cellulose) sont envisagées pour diminuer sa complexité et sa résistance. Plusieurs défis restent à surmonter pour améliorer le rendement de



ce procédé. Le gaz de synthèse peut être utilisé comme carburant, pour le chauffage et pour produire de l'électricité dans les turbines à gaz Il peut également être traité pour séparer l'hydrogène du gaz. L'hydrogène pourra être brûlé ou utilisé dans des piles à combustible. Le gaz de synthèse peut être traité ultérieurement pour produire des carburants liquides en utilisant le procédé Fischer-Tropsch.

**1-4-4. La conversion biologique ou fermentation :** De manière générale, ce procédé implique d'abord une réaction d'hydrolyse pour libérer les sucres simples : les monosaccharides.

Les matières utilisées actuellement contiennent toutes des sucres simples telles que les déchets issus de la betterave sucrière, la canne à sucre, etc. Par la suite, la fermentation et la distillation permettront de produire de l'éthanol cellulosique.[8]

Cependant, la conversion de la matière lignocellulosique avec ce procédé devient plus difficile en raison de la nature de sa composition. En effet, plusieurs molécules polysaccharidiques à chaîne plus longue se trouvent dans le bois. Ceci se traduit nécessairement par un gain en résistance et une plus grande complexité pour la conversion en un produit énergétique. Cette difficulté est absente en ce qui a trait à la production de l'éthanol de première génération avec les matières végétales agricoles contenant des sucres simples. À la fin, l'éthanol cellulosique sera propice à être utilisé comme biocarburant.

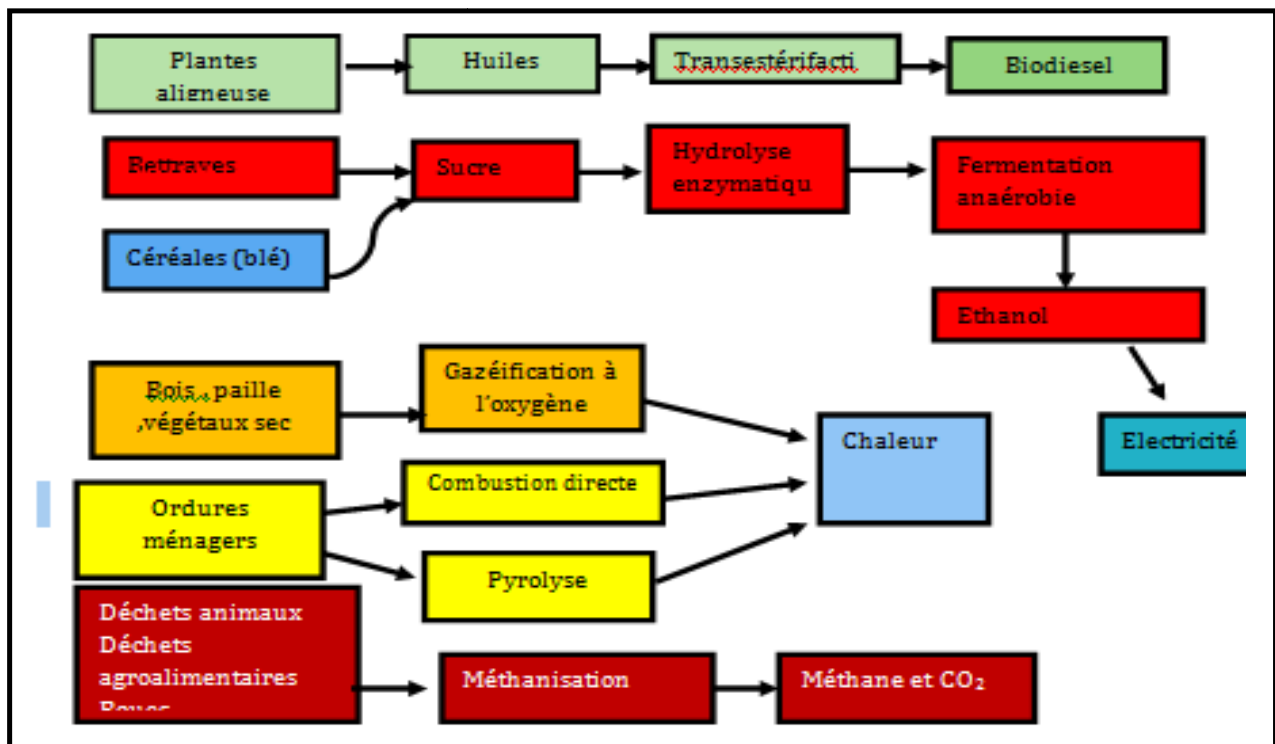
Contrairement à l'éthanol de première génération, dont la matière première provient du secteur agroalimentaire (blé, maïs, etc.), l'éthanol de deuxième génération à base de matière lignocellulosique ne met pas de pression sur le domaine de l'agriculture et sur les denrées alimentaires. Le développement de cette filière est donc considéré comme étant plus durable : il n'interfère pas avec des enjeux de sécurité alimentaire. [9].

**1-4-5. La transestérification :** C'est un procédé qui convertit les graisses et les huiles obtenue de la biomasse en biodiesel et en glycérine. Environ 100 litres d'huile ou de graisse sont mises à réagir avec 10 litres d'un alcool à chaîne courte (généralement du méthanol) en présence d'un catalyseur (généralement de l'hydroxyde de sodium [NaOH] ou de l'hydroxyde de potassium [KOH]) pour former 100 litres de biodiesel et 10 kilos de glycérine (ou glycérol). La glycérine, est un produit couramment utilisé dans la fabrication de produits pharmaceutiques et cosmétiques. [9].

## 1-5. Les avantages de la biomasse

- La valorisation énergétique du bois, des résidus de coupe, des sous-produits de l'agriculture, des sous produits de l'agro-industrie, etc.
- Le coût d'investissement compétitif et peu coûteux
- L'exploitation de la biomasse repose sur une technologie éprouvée et rentable
- Une énergie moins polluante que les énergies fossiles : pas de rejets de soufre dans les fumées. La combustion de la biomasse est neutre du point de vue des émissions de CO<sub>2</sub>
- La participation au traitement et à la destruction des déchets organiques par la valorisation énergétique
- Réduction de la dépendance à l'égard des combustibles fossiles ;
- La biomasse est une énergie de proximité : collectable localement, elle contribue au maintien des économies locales et rurales ;
- Après biodégradation ou conversion énergétique d'une biomasse propre, les résidus sont très peu polluants pour l'eau et les sols. Dans certains cas, les résidus de la valorisation de la biomasse peuvent être recyclés. Exemple : Les cendres issues de la combustion de la biomasse peuvent être valorisées comme engrais [10]
- 

• *Tableau 1-3 : Procédés pour produire de l'énergie à base de biomasse*



## **Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté les principales technologies afférentes à la biomasse. Il est très important de développer et d'améliorer constamment leurs rendements et leurs efficacités.

La biomasse est une source d'énergie disponible localement avec une grande polyvalence parmi les énergies renouvelables; car elle peut être mise à disposition sous forme solide, liquide ou gazeuse.

D'autres sources de biomasses peuvent ouvrir de nouvelles opportunités pour le développement agricole et forestier, l'emploi et l'amélioration des infrastructures rurales. Ce n'est pas par hasard que le développement de la bioénergie s'accélère dans de nombreux pays. Les ressources marines constituent une nouvelle voie pour la biomasse.

# **Chapitre 2**

# **Fermentation et**

# **Distillation**

## **Introduction**

La fermentation est une technologie très ancienne de transformation et de conservation des aliments : pain, boissons alcoolisées et vinaigre. Les Sumériens fabriquaient déjà du pain et de la bière en 8000 av. J.-C., les Babyloniens maîtrisaient la fabrication du vin de palme en 5000 av. J.-C., les Égyptiens utilisaient les levures pour la fabrication du pain et des boissons alcoolisées en 4000 av. J.-C. et les Chinois se nourrissaient de chou fermenté dans le vin en 3000 av. J.-C. Le terme de fermentation provient du latin *fervere* qui signifie bouillir : au cours de certaines fermentations apparaissait en effet un dégagement de gaz (souvent du CO<sub>2</sub>) avec formation de mousse comme c'est le cas d'un liquide en ébullition [10].

C'est au cours des années 1862 à 1877 que Louis Pasteur s'intéresse aux fermentations. Il étudie les ferments, la formation du vinaigre et la transformation de l'alcool en acide acétique par *Mycoderma aceti*. C'est entre 1900 et 1940 que se développe la fermentation industrielle avec la production d'acétone, de butanol, de glycérol, d'acide citrique et d'acide lactique. À partir de 1940, à l'aide de programmes de sélection et de mutation de souches, diverses productions comme celles d'antibiotiques, d'acides aminés, de nucléotides et d'enzymes sont réalisées. C'est ensuite à partir des années 80 que le génie génétique a permis d'améliorer les souches microbiennes à fort potentiel industriel et d'explorer de nouvelles voies biochimiques. Les fermentations industrielles concernent ainsi un grand nombre de secteurs : l'alimentaire, la chimie fine, la pharmacie, l'agro-industrie et la cosmétique [10].

### **2-1. La fermentation**

La fermentation est un processus chimique par lequel des molécules telles que le glucose sont décomposées de manière anaérobie. Plus largement, la fermentation est le moussage qui se produit lors de la fabrication du vin et de la bière, un processus vieux d'au moins 10 000 ans. La mousse résulte de l'évolution du dioxyde de carbone, bien que cela n'ait été reconnu qu'au 17<sup>ème</sup> siècle. Le chimiste et microbiologiste français Louis Pasteur au 19<sup>ème</sup> siècle a utilisé le terme fermentation dans un sens étroit pour décrire les changements provoqués par les levures et autres micro-organismes se développant en l'absence d'air (anaérobie); il a également reconnu que l'alcool éthylique et le dioxyde de carbone ne sont pas les seuls produits de la fermentation [11].

### ***2-1-1. Les 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 [12].

### ***2-1-2. Les types de fermentation***

**a. Fermentation Batch :** La culture en mode batch permet de considérer le réacteur comme un système fermé contenant une quantité fixée du milieu de culture, on l'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 [13].

**b. Fermentation fed-batch :** On peut décrire les cultures en mode fed-batch comme des cultures alimentées de façon séquentielle ou continue en éléments nutritifs et en 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 [13].

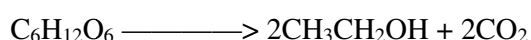
**c. La fermentation en mode continu :** Elle permet l'obtention de productivités élevées, facilite le contrôle du procédé et la maîtrise des rendements. Les inconvénients de ce mode de conduite sont la limitation du taux de dilution afin d'éviter le lessivage du réacteur ainsi que l'inhibition du métabolisme (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

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 alcool sont le glycérol, le succinate et l'acétate à 5% du substrat carboné restant [13].

**d. Fermentation alcoolique :** Dans notre travail nous avons utilisé la fermentation alcoolique schématisée sur la figure 2.1. Ce procédé concerne les déchets à forte teneur en glucides (amidon ou sucres libres). Ce procédé transforme des sucres fermentescibles par des levures

en alcool et gaz carbonique avec dégagement de chaleur. Il existe un grand nombre de microorganismes utilisés pour la fermentation. Cependant peu sont réellement compétitifs en termes de rendement en éthanol par rapport au substrat consommé, de capacité fermentaire, de tolérance élevée à l'éthanol et d'adaptation aux conditions de fermentation. L'espèce la plus utilisée au niveau industriel est la *S. cerevisiae*. Elle transforme le glucose en éthanol. Actuellement, aucun autre micro-organisme n'atteint ses performances sur le glucose en conditions non stériles, à savoir un rendement de l'ordre de 0,47 g d'éthanol par g de glucose [14].

Le procédé de fermentation représente la conversion des sucres fermentescibles (hexoses) en éthanol :



Une analyse de rentabilité améliorée pour la bioconversion de la biomasse nécessite des micro-organismes qui peuvent fermenter de manière optimale les sucres hexoses et pentoses en même temps sans formation de produits inhibiteurs toxiques. [14]

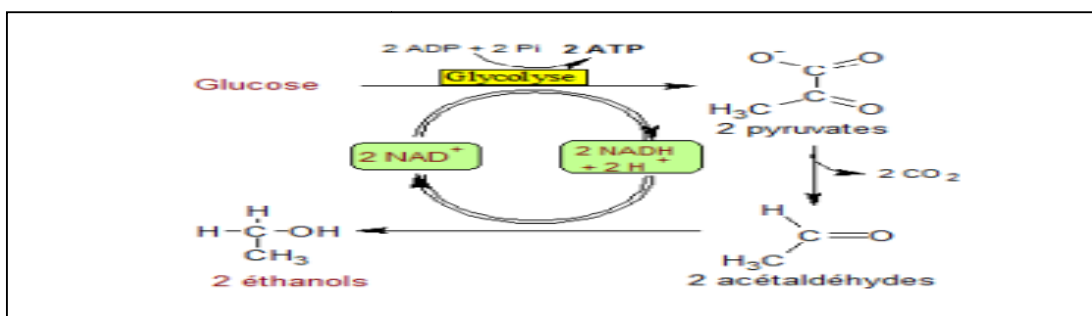


Figure 2-1 : Procédé de fermentation alcoolique [15]

### 2-1-3. Morphologie et métabolisme de la levure *Saccharomyces cerevisiae* :

Elle est reconnue par sa forme ovoïde à arrondie (phase stationnaire). La taille de la levure peut être variable de 1 à 10 µm en fonction de la composition nutritive de son milieu. Cette levure est capable de suivre deux voies métaboliques : la voie aérobie et la voie anaérobie. Cela lui permet de vivre dans des environnements divers. Pour la voie aérobie, la levure se sert de la respiration aérobie pour métaboliser les glucides en dioxyde de carbone et en eau. Pour la voie anaérobie, elle fermente les glucides et produit de l'éthanol et du CO<sub>2</sub>. [15].

L'éthanol est un alcool à indice d'octane élevé. Il est produit par la fermentation de sucre ou d'amidon prétraité, provenant de grains de blé ou de maïs; l'ajout de levure entraîne la

fermentation des sucres et produit l'éthanol qui est ensuite séparé du mélange par distillation. Les avantages de l'éthanol par rapport à l'essence sont diverses : baisse d'émissions de monoxyde de carbone, de dioxyde de carbone et d'hydrocarbure, et réduction globale des gaz à effet de serre, durabilité de la production d'éthanol due à l'utilisation de matières premières comme des grains et des produits du bois, marché supplémentaire pour le maïs et les autres matières premières agricoles utilisées dans la production d'éthanol et réduction de la dépendance à l'égard des produits pétroliers importés [15].

#### ***2-1-4. Les facteurs physico-chimiques qui influencent la fermentation***

Au cours du processus de fermentation, plusieurs facteurs physico-chimiques tels que la température, l'oxygène dissous, le pH et les nutriments doivent être contrôlés pour le développement approprié des micro-organismes. Une fois ces paramètres ajustés, la fermentation démarre et se déroule généralement en batch, afin d'éviter la formation excessive de gaz et de mousse. Les cuves de fermentation sont généralement fermées et disposent d'un système de contrôle de température interne et externe. Ainsi plusieurs facteurs influencent la production de bioéthanol, notamment la température, la concentration en sucre, le pH, le temps de fermentation, la vitesse d'agitation et le volume de l'inoculum à base de levure [16]. Le taux de croissance des micro-organismes est directement affecté par la température. Une température élevée, défavorable à la croissance cellulaire, devient un facteur de stress pour les micro-organismes. La plage de température idéale pour la fermentation se situe entre 20°C et 35°C. Les cellules libres de *S. cerevisiae* ont une température optimale proche de 30°C tandis que les cellules immobilisées ont une température optimale légèrement supérieure en raison de leur capacité à transférer la chaleur de la surface des particules à l'intérieur des cellules [16].

##### **2-1-4-1. Effet de la concentration en sucres**

L'augmentation de la concentration en sucres jusqu'à un certain niveau permet d'augmenter le taux de conversion en éthanol. Cependant, l'utilisation d'une concentration excessive de sucre entraînera un taux de fermentation stable, qui est atteint lorsque la concentration en sucre utilisée dépasse la capacité d'absorption des cellules microbiennes. Généralement, le rendement maximal de production d'éthanol est atteint lors de l'utilisation de sucres à la concentration de 150 g/L. La concentration initiale en sucre est également considérée comme un facteur important dans la production d'éthanol. Une productivité et un rendement élevés en éthanol en fermentation discontinue peuvent être obtenus en utilisant une



concentration initiale en sucre plus élevée. Cependant, ce mode de culture nécessite un temps de fermentation plus long et induit un coût de récupération de l'éthanol plus élevé [16].

#### **2-1-4-2. Effet du pH**

La production d'éthanol est influencée par le pH du milieu de culture car elle affecte la contamination bactérienne, la croissance des levures, le taux de fermentation et la formation de sous-produits. La perméabilité de certains nutriments essentiels aux cellules est influencée par la concentration en  $H^+$  dans le moût de fermentation. De plus, la survie et la croissance des levures sont influencées par le pH de 2,75 à 4,25. En fermentation pour la production d'éthanol, la plage de pH optimale de *S. cerevisiae* est de 4,0 à 5,0. Lorsque le pH est inférieur à 4,0, une période d'incubation plus longue est nécessaire, mais la concentration d'éthanol est réduite de manière significative. Cependant, lorsque le pH est supérieur à 5,0, la concentration d'éthanol diminue considérablement [16].

#### **2-1-4-3. Effet de la durée de fermentation**

La durée de fermentation affecte la croissance des micro-organismes. Une durée plus courte induit une fermentation peu efficace en raison d'une croissance plus faible des micro-organismes. D'un autre côté, un temps de fermentation trop long produit un effet toxique sur la croissance microbienne, en particulier en mode discontinu en raison de la forte concentration d'éthanol dans le moût de fermentation. Une fermentation complète peut être obtenue à une température plus basse en utilisant une durée de fermentation plus longue qui se traduit par un rendement en éthanol plus faible [16].

#### **2-1-4-4. Effet de l'agitation**

La vitesse d'agitation contrôle le transfert des nutriments du moût de fermentation vers l'intérieur des cellules, ainsi que l'excrétion de l'éthanol de la cellule vers le moût de fermentation. Plus l'agitation est intense, plus la quantité d'éthanol produit est élevée. En outre, elle augmente la consommation de sucre et réduit l'inhibition de l'éthanol sur les cellules. En laboratoire, une gamme de vitesse d'agitation communément employée pour la fermentation par des levures est de 150 à 200 tr/min

### 2-1-4-5. Effet de la concentration de l'inoculum :

La concentration en inoculum ne donne pas d'effets significatifs sur la concentration finale en éthanol, mais elle affecte le taux de consommation de sucre et la productivité de l'éthanol

La production d'éthanol augmente avec l'augmentation du nombre de cellules de 10<sup>4</sup> à 10<sup>7</sup> cellules par ml, mais aucune production significative d'éthanol n'a été trouvée entre 10<sup>7</sup> et 10<sup>8</sup> cellules par ml. En effet, l'augmentation de la concentration cellulaire dans une certaine plage réduit la durée de fermentation car les cellules se développent rapidement et transforment directement les sucres en éthanol [16].

*Tableau 2-1 Types de fermentation*

Type de fermentations	Fermentation alcoolique	Fermentation lactique	Fermentation acétique	Fermentation ion butyrique	Fermentation méthanique
<b>Matière organique utilisé</b>	<b>glucose</b>	<b>lactose</b>	<b>Ethanol</b>	<b>Cellulose Amidon</b>	<b>Déchets urbains</b>
<b>Micro-organisme utilisé</b>	<b>Levure de bière</b>	<b>Bacilles lactille</b>	<b>Bactéries acétifiantes</b>	<b>clostridium</b>	<b>Bactéries</b>
<b>Mode de vie demicro-organisme</b>	<b>Anaérobie</b>	<b>Aérobie</b>	<b>Aérobie</b>	<b>Anaérobie stricte</b>	<b>Anaérobie</b>
<b>Substance organique obtenue</b>	<b>Ethanol</b>	<b>Acide lactique</b>	<b>Acide acétique</b>	<b>Acide butyrique</b>	<b>Méthane</b>
<b>Application</b>	<b>Fabrication de la bière</b>	<b>Fabrication des aliments laitier</b>	<b>Fabrication de vinaigre</b>		<b>Fabrication des engrais ,biogaz</b>

### 2-2. La distillation

La distillation est la technique de séparation des composants d'un mélange par chauffage et refroidissement continus. Il existe deux formes principales de distillations : la distillation discontinue et la distillation continue. La différence entre les deux réside dans le

fait que la distillation discontinue est effectuée par lots, tandis que la distillation continue est effectuée en continu.

La distillation est une technique de séparation utilisée pour purifier un liquide ou un mélange de liquides en chauffant puis en refroidissant celui-ci. Lorsqu'un mélange de liquides est chauffé, les composants qui ont des points d'ébullition différents passent en phase gazeuse à différents moments. La condensation de la vapeur permet de la liquéfier et ainsi de séparer différents composants.

Il existe plusieurs techniques de distillation adaptées en fonction de la composition du mélange liquide. Ce sont la distillation simple, la distillation fractionnée et la distillation à la vapeur.

La principale différence entre la distillation fractionnée et la distillation simple est que la dernière s'applique aux liquides qui ont un intervalle d'ébullitions d'au moins 50 degrés, tandis que la distillation fractionnée sépare les liquides ayant des points d'ébullitions proches [17].

### 2-2-1. La distillation simple :

Elle est utilisée lorsque le composant du mélange liquide présente des différences aux points d'ébullitions proches de cinquante degrés. Cela implique tout d'abord de faire bouillir le mélange et le composé ayant le point d'ébullition le plus bas commencera à s'évaporer. Considérons un mélange de deux liquides : La vapeur formée sera riche en composé ayant le point d'ébullition le plus bas. À ce stade, la température reste stable jusqu'à ce que la fraction du composé présentant le point d'ébullition le plus bas du mélange liquide atteigne zéro. Ensuite, la température recommence à monter jusqu'à atteindre le point d'ébullition du composé avec le point d'ébullition le plus élevé. [17].

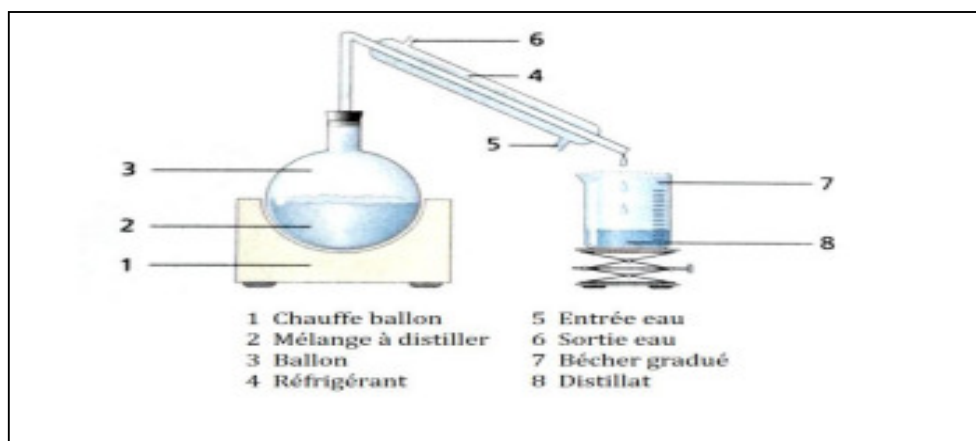


Figure 2-2 : Montage de distillation simple [16]

### 2-2-2. La distillation fractionnée :

C'est une technique utilisée pour de nombreux mélanges liquides complexes, c'est-à-dire des mélanges avec des composants ayant des points d'ébullition proches. Pour de tels systèmes, une simple distillation n'aura aucun sens. Par conséquent, une distillation modifiée est nécessaire. Pour que la distillation fractionnée soit efficace, les composants doivent être miscibles.

L'appareil de ce procédé est quelque peu différent de l'appareil de distillation simple. Une colonne de fractionnement fixée au ballon contient le mélange liquide. La colonne de fractionnement contient des billes de verre pour fournir une plus grande surface pour la vaporisation et la condensation. La quantité totale du composant ayant le point d'ébullition le plus bas sera progressivement collectée dans le ballon, et celui ayant le point d'ébullition le plus élevé reste dans le ballon [17].

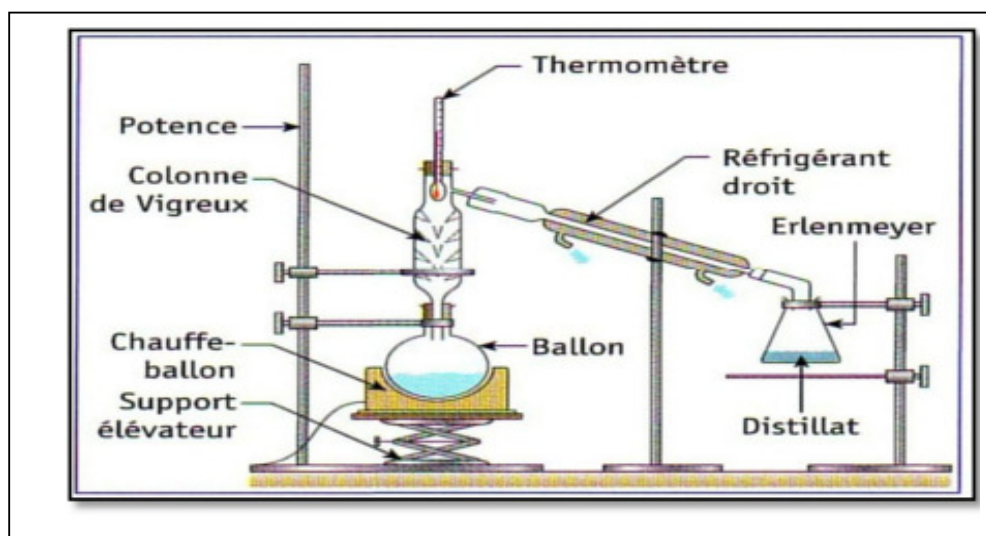


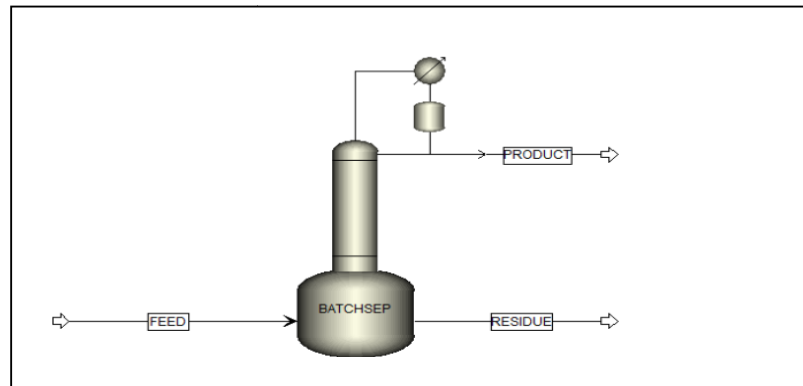
Figure 2-3 : Montage de distillation fractionnée [17]

### 2-2-3. La distillation discontinue :

C'est la méthode de séparation des composants d'un mélange par lots. Dans cette méthode, la séparation par distillation est effectuée à plusieurs reprises. La distillation discontinue est facile à réaliser. Ce processus donne une très grande pureté du produit chimique séparé et une flexibilité maximale du processus.

Une distillation discontinue peut être effectuée dans une seule colonne de distillation. Là, plusieurs composants peuvent être séparés dans des réservoirs récepteurs séparés. Lorsque la distillation d'un lot est terminée, la colonne peut être utilisée pour un mélange de composants.

complètement différent rapidement et efficacement. Et aussi, ce processus peut être complètement automatisé [17].



*Figure 2-4 : Schéma de distillation discontinue "batch distillation" [17]*

## Conclusion

La fermentation et la distillation sont deux procédés physico-chimiques permettent de produire du bioéthanol ou l'éthanol à partir de biomasse.

# **Chapitre 3**

## **Bioéthanol et biocarburants**

## Introduction

Les combustibles fossiles sont utilisés comme principale source d'énergie depuis de nombreuses années, cependant leur utilisation n'est pas durable et peut causer des problèmes environnementaux liés à leurs rejets. L'idée de trouver d'autres sources d'énergies qui peuvent les remplacer, telles que les biocarburants, s'impose de plus en plus.

Avec les demandes croissantes de réduction des émissions de dioxyde de carbone, les biocarburants jouent un rôle de plus en plus précieux dans la production d'énergie propre.

Dans ce chapitre nous allons étudier les biocarburants produits à base de biomasse ainsi nous allons donner les différentes générations de biocarburants et comment produire du biocarburant à base de bioéthanol.

L'étape finale de la production de bioénergie, définie comme l'énergie issue de la biomasse est la consommation de biocarburants pour produire de l'électricité, de la chaleur ou de la vapeur. La chaleur est de la forme de l'énergie utilisée dans les moteurs à combustion, que nous associons généralement à la consommation de biocarburants. La biomasse non transformée peut également être directement brûlée pour produire de la chaleur.

### 3-1. Le bioéthanol :

Connu sous le nom d'alcool éthylique, sa formule moléculaire est  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ . Le bioéthanol, est le biocarburant liquide le plus utilisé au monde. Il est principalement produit par fermentation microbienne de sucre ou d'amidon à partir de diverses matières premières, y compris la canne à sucre, la betterave à sucre, le maïs, les céréales, les déchets agricoles, les déchets forestiers, les déchets municipaux, les fumiers de bétail, etc. Lorsque les sucres sont présents sous forme de polysaccharides, un processus d'hydrolyse (acide ou enzymatique) est généralement utilisé pour la délignification et la formation de sucres fermentescibles avant la fermentation. À l'aide de micro-organismes (par exemple, la levure), les sucres hydrolysés (par exemple, le glucose) sont convertis en éthanol (bioéthanol) pendant le processus de fermentation. La distillation et la déshydratation sont ensuite utilisées pour produire un alcool sans indice d'octane élevé, également appelé éthanol déshydraté ou éthanol anhydre. [18]

L'éthanol ou encore alcool éthylique, molécule de formule chimique  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  comporte deux atomes de carbone liés (C), l'un portant trois atomes d'hydrogène (H), l'autre deux atomes d'hydrogène et une fonction hydroxyle (OH) [18].

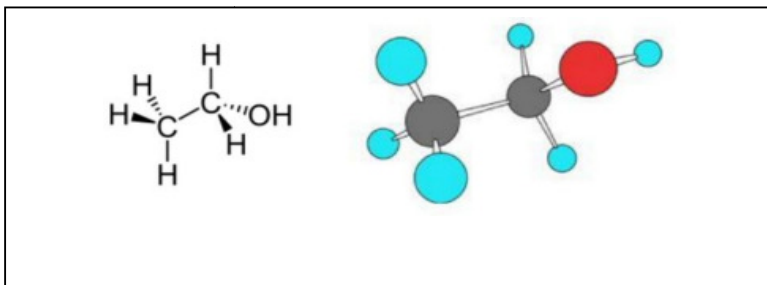


Figure 3-1 : Structure de la molécule de l'éthanol [13]

### 3-1-1. Propriétés physiques

L'éthanol est un liquide incolore, volatil, d'odeur plutôt agréable. L'éthanol est miscible à l'eau, le mélange se faisant avec dégagement de chaleur, par contre il y a expansion du liquide lorsque l'éthanol est mélangé à de l'essence. L'éthanol est également miscible à la plupart des solvants usuels. C'est un bon solvant de graisses. Le titre d'un mélange eau/éthanol est le rapport entre le volume d'alcool absolu contenu dans ce mélange et le volume de celui-ci à 15°C; il est exprimé en % du volume. L'éthanol peut être commercialisé sous forme anhydre (éthanol à 100 % en volume appelé aussi alcool absolu) ou à différentes concentrations dans l'eau, principalement à 95 % et, pour des usages antiseptiques, à 70 %. Pour les usages autres qu'alimentaires, des dénaturants sont ajoutés. L'éthanol dénaturé, que l'on trouve également dans le commerce sous le nom d'alcool à brûler, est de l'éthanol dans lequel on a dissous divers produits pour le rendre impropre à la consommation [18].

### 3-1-2. Propriétés chimiques

Dans les conditions normales, l'éthanol est un produit stable. Il possède les propriétés générales des alcools primaires (réactions d'oxydation, déshydrogénation, déshydratation et estérification). Il peut réagir vivement avec les oxydants puissants : acide nitrique, acide perchlorique, perchlorates, peroxydes, permanganates, trioxyde de chrome. La réaction avec les métaux alcalins conduit à la formation d'éthylate et à un dégagement d'hydrogène; elle peut être brutale sauf si elle est réalisée en l'absence d'air pour éviter la formation de mélanges explosifs air-hydrogène. Le magnésium et l'aluminium peuvent également former des éthylates, la plupart des autres métaux usuels étant insensibles à l'éthanol [18].



*Tableau 3-1 : Propriétés physiques de l'éthanol [13]*

NOM SUBSTANCE	DÉTAILS	
Éthanol	N° CAS	64-17-5
	Etat Physique	Liquide
	Masse molaire	46,07
	Point de fusion	-114°C
	Point d'ébullition	78 à 78,5 °C
	Densité	0,789
	Densité gaz / vapeur	1,59
	Pression de vapeur	5,9 kPa à 20 °C 10 kPa à 30 °C 29,3 kPa à 50 °C
	Indice d'évaporation	8,3 (oxyde de diéthyle = 1), 2,4 (acétate de n-butyle = 1)
	Point d'éclair	13 °C (éthanol pur) ; 17 °C (éthanol à 95 % vol.) ; 21 °C (éthanol à 70 % vol.) ; 49 °C (éthanol à 10 % vol.) ; 62 °C (éthanol à 5 % vol.) (coupelle fermée)
	Température d'auto-inflammation	423 - 425 °C ; 363 °C (selon les sources)
	Limites d'explosivité ou d'inflammabilité (en volume % dans l'air)	limite inférieure : 3,3 % limite supérieure : 19 %
	Coefficient de partage n-octanol / eau (log Pow)	- 0,31

### 3-2. Biocarburants

Le biocarburant est défini comme tout combustible liquide, gazeux ou solide produit à partir de matières organiques végétales ou animales.

Les biocarburants sont dérivés de divers processus de conversion. On distingue trois générations de biocarburants selon l'origine de la biomasse utilisée et les procédés de transformation associés. Aujourd'hui, la première génération a atteint le stade industriel et la seconde génération est en phase de développement.

La réglementation des biocarburants s'effectue également en fonction de la nature de la matière première utilisée : les biocarburants conventionnels élaborés à partir d'une matière première en concurrence avec l'alimentaire et les biocarburants avancés élaborés à partir d'autres matières premières [19].

La conversion de la biomasse en biocarburant peut également entraîner des sous-produits, qui sont généralement des parties de plantes et des matériaux qui ne peuvent pas être convertis en raison de contraintes chimiques [20].

Le bioéthanol, d'origine biologique et agricole obtenu par fermentation du sucre extrait de la plante sucrière ou par hydrolyse enzymatique de l'amidon contenu dans les céréales produit,

peut être directement utilisé comme substitut de l'essence. Il est utilisé comme biocarburant dans les moteurs à essence. Les végétaux contenant du saccharose (betterave, canne à sucre...) ou de l'amidon (blé, maïs...) peuvent être transformés pour donner du bioéthanol. On parle généralement de filière "sucre" pour désigner cette filière de production du bioéthanol. Il peut être mélangé à l'essence en des proportions allant de 5 à 85 %, on parle alors de carburant E5 (éthanol 5%) à E85. Au-delà de 10 %, des adaptations des moteurs de voitures sont souvent nécessaires.

### **3-3. Les générations de biocarburants :**

Il existe trois types de biocarburants, Ils se caractérisent par la source de biomasse utilisée, leurs limites en tant que source d'énergie renouvelable et leur technologie de transformation . Le principal inconvénient des biocarburants de première génération est qu'ils sont issus d'une source de nourriture comme les pommes de terres, les betteraves, etc. Les biocarburants de deuxième génération proviennent de la biomasse non alimentaire, mais restent en concurrence avec la production alimentaire pour les terres agricoles. Enfin, les biocarburants de 3<sup>ème</sup> génération, essentiellement à base d'algues marines, présentent la meilleure possibilité de carburant alternatif car ils ne rivalisent pas avec la nourriture. Cependant, il reste encore des défis à relever pour le rendre économiquement rentables [20].

#### **3-3-1. Les biocarburants de première génération**

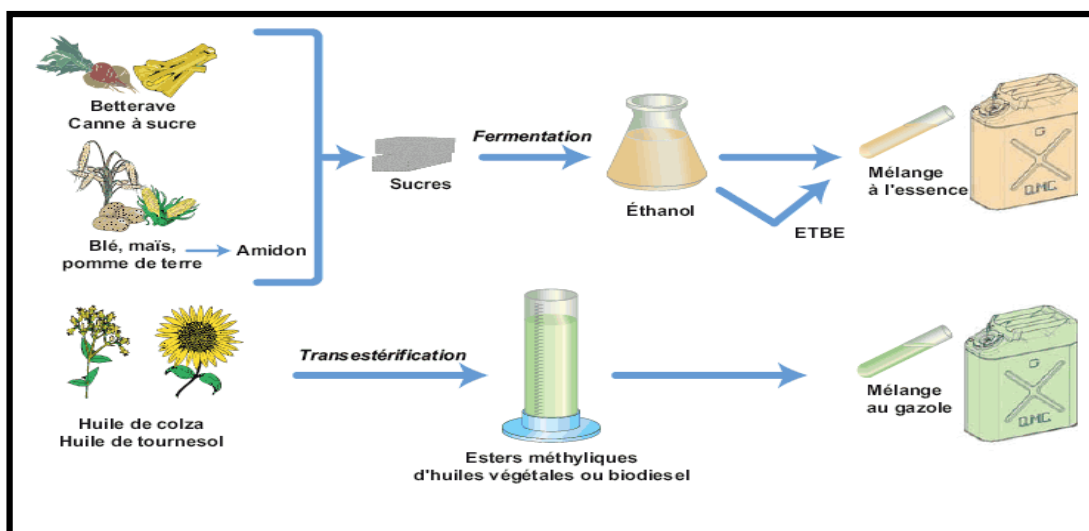
Ils sont fabriqués à partir de sucre, l'amidon ou huile végétale . Ils sont produits grâce à des technologies bien maîtrisées et des processus comme la fermentation, la distillation et la transestérification.

Les sucres et les amidons sont fermentés pour produire principalement l'éthanol qui contient un tiers de la densité énergétique de l'essence mais est actuellement utilisé dans de nombreux pays, un avantage de l'éthanol est qu'il brûle plus proprement que l'essence et produit moins de gaz à effet de serre. Un autre biocarburant de 1<sup>ère</sup> génération appelé biodiesel , est produit lorsque l'huile végétale ou de la graisse animale passe par un processus appelé transestérification. Ce processus consiste à exposer des huiles à un alcool tel que le méthanol en présence d'un catalyseur. Le processus de distillation consiste à séparer le produit principal de tous les sous-produits de la réaction [21].

Les biocarburants de première génération symbolisent une étape vers l'indépendance énergétique et le sevrage du fossile combustibles pour les demandes énergétiques. Ces biocarburants soutiennent également les industries agricoles et les communautés grâce à une demande accrue de cultures.

Les biocarburants de 1<sup>ère</sup> génération présentent plusieurs inconvénients. Ils constituent une menace pour les prix des produits alimentaires puisque la biomasse utilisée est alimentaire. Ils ont également le potentiel d'avoir un impact négatif sur la biodiversité et l'eau dans certaines régions. De plus, la biomasse pour les biocarburants de première génération nécessite beaucoup de terres arables. Ils n'offrent également qu'un petit avantage par rapport aux combustibles fossiles en ce qui concerne gaz à effet de serre, car ils nécessitent encore de grandes quantités d'énergie pour être développées, collectés et transformés.

Les pratiques de production actuelles utilisent des combustibles fossiles pour l'énergie. Les biocarburants de première génération sont également plus coûteux que l'essence, ce qui les rend économiquement défavorables [22].]



La figure 3-2 : Etapes de fabrication des biocarburants de 1<sup>ère</sup> génération [16]

### 3-3-2. Les biocarburants de deuxième génération

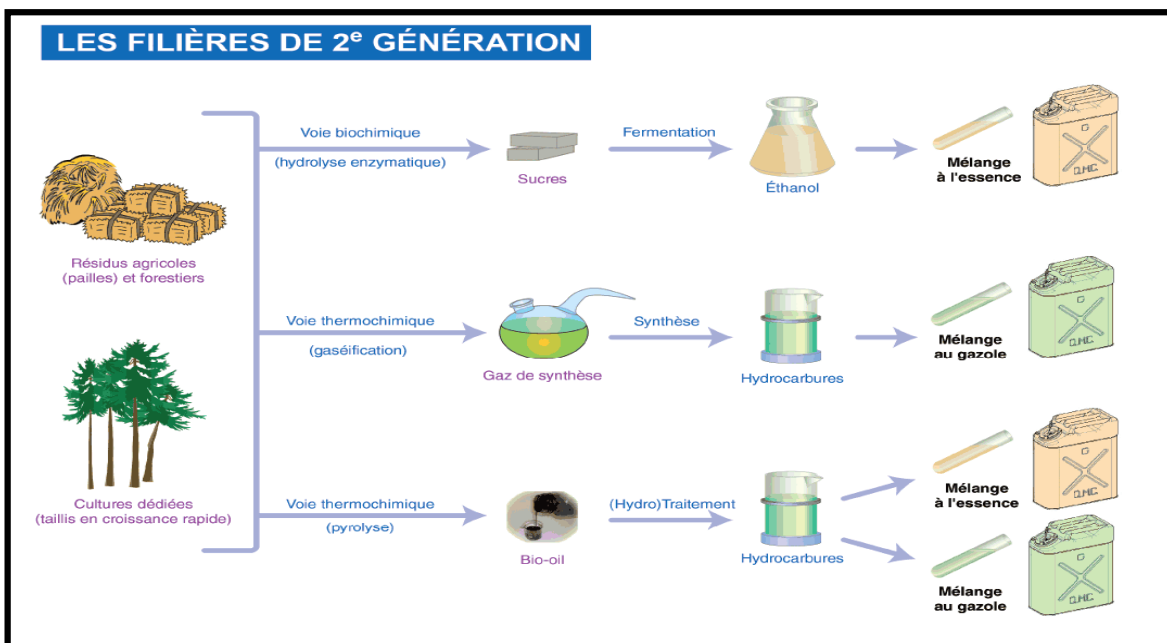
La biomasse pour les biocarburants de deuxième génération comprend le bois et certains déchets alimentaires. Une série de réactions chimiques de prétraitement qui décomposent la lignine et libèrent les sucres intégrés dans les fibres de la plante afin d'en faire du carburant.

Après cette étape le processus de production de l'éthanol ressemble à celui de la production de 1<sup>ère</sup> génération.

Les biocarburants de deuxième génération répondent à de nombreux problèmes associés aux biocarburants de première génération car ils ne font pas concurrence aux carburants et aux cultures vivrières. Les biocarburants de Seconde génération génèrent également des rendements énergétiques par acre plus élevés que les carburants de première génération puisqu'elles sont issues de biomasse distincte.

Ils permettent l'utilisation de terres de moins bonne qualité où les cultures vivrières peuvent ne pas être en mesure de pousser.

Cependant certains biomasse pour les biocarburants de deuxième génération sont encore en concurrence avec l'utilisation des terres puisqu'une partie de la biomasse pousse dans le même climat que les cultures vivrières. Des sources cellulose qui sont plantées à cotés des cultures vivrières pourrait être utilisé pour la biomasse, comme les tiges et les feuilles de maïs. [22]

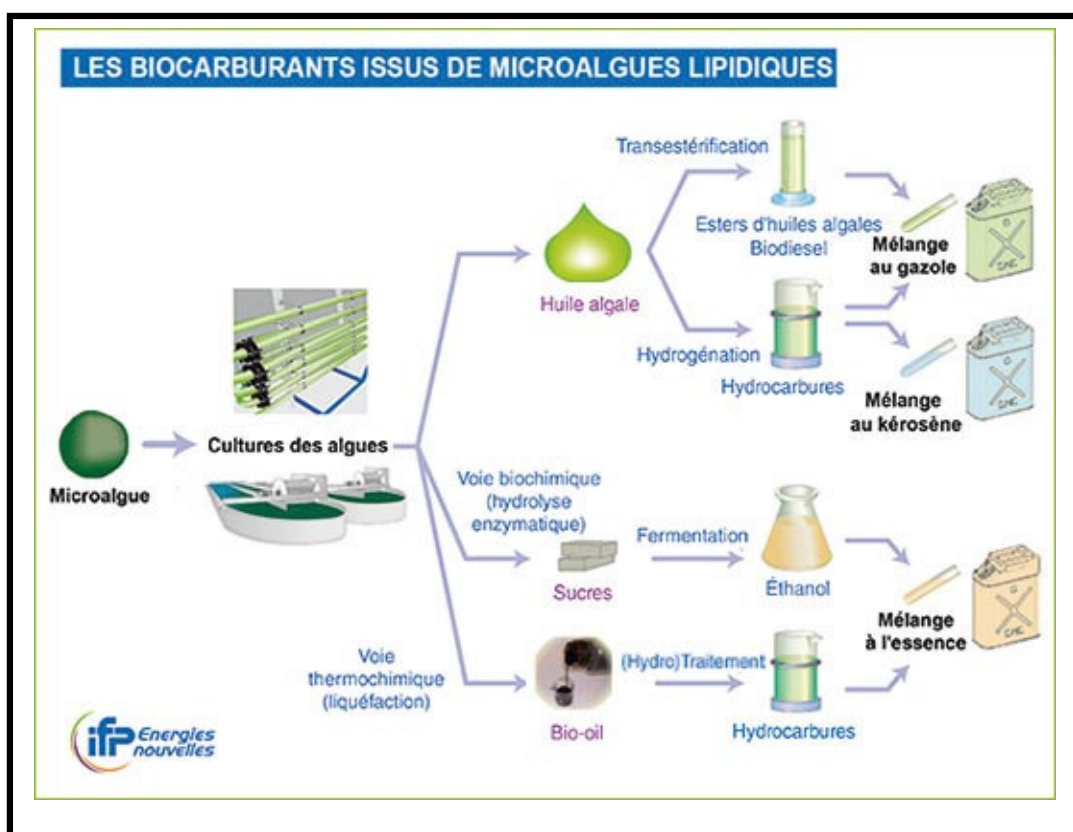


La figure3- 3 : Etapes de fabrication des biocarburants de 2<sup>ème</sup> génération [16]

### 3-3-3. Les biocarburants de troisième génération

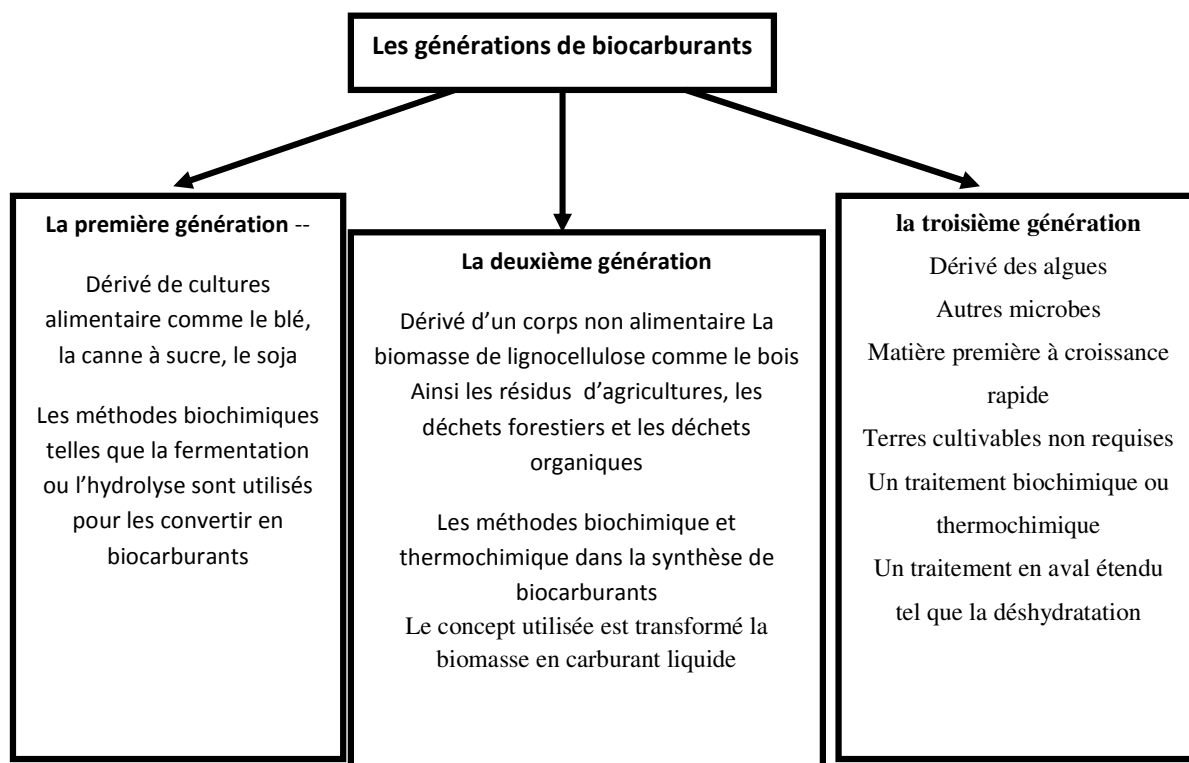
Ils utilisent des cultures spécifiques telles que les algues comme source d'énergie. Les algues sont cultivées et récoltées pour en extraire l'huile qui peut alors être transformée en biodiesel par un processus similaire à celui des biocarburants de première génération ou il peut être raffiné en d'autres carburants en remplacement des carburants à base de pétrole

Les biocarburants de troisième génération sont plus denses en énergie que les biocarburants de 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> génération par surface de récolte. Ils sont cultivés comme des sources d'énergie à faible coût et à haute énergie entièrement renouvelable. Les algues ont l'avantage de pouvoir pousser dans des zones inadaptées aux cultures de première et deuxième génération, ce qui réduirait le stress sur l'eau et les terres arables utilisées. Il peut être cultivé à l'aide d'eaux usées, ou l'eau salée, comme les océans ou les lacs salés. Cependant, d'autres recherches restent à faire pour faire avancer le processus d'extraction afin de le rendre financièrement compétitif aux carburants à base pétrole [23].



La figure 3-4 : Etapes de fabrication des biocarburants de 3<sup>ème</sup> génération [16]

Tableau 3-2 : Différentes générations de biocarburants et leurs caractéristiques



### 3-4. Le Biogaz

Un biogaz peut être produit à partir de la biomasse des décharges, des exploitations d'élevage, des eaux usées ou d'autres sources. Ce biogaz capté doit ensuite être épuré pour éliminer l'eau, le dioxyde de carbone et d'autres éléments afin de répondre aux normes requises [24].

### 3-5. Etude des biocarburants utilisables dans les moteurs à allumage par compression

Le fonctionnement des moteurs à allumage par compression se base sur l'aptitude du carburant à se volatiliser en quelques millisecondes quand il est injecté dans un milieu comburant porté à des pressions de l'ordre de 20 à 50 bars et à des températures de 500 à 700°C.

#### a. Le biodiesel

Obtenu par la transformation des triglycérides qui constituent les huiles végétales, la transestérification de ces huiles, avec du méthanol ou de l'éthanol, produit des Esters d'Huile végétale, respectivement méthyliques (EMHV) et éthyliques (EEHV), dont les molécules plus

petites peuvent alors être utilisées comme carburant (sans soufre, non toxique et hautement biodégradable) dans les moteurs à allumage par compression [24].

#### **b. Le Biométhane**

Le biométhane est le principal constituant du biogaz issu de la fermentation méthanique (ou méthanisation) de matières organiques animales ou végétales riches en sucres (amidon, cellulose, plus difficilement les résidus ligneux) par des micro-organismes méthanogènes qui vivent dans des milieux anaérobies. Les principales sources sont les boues des stations d'épuration, les lisiers d'élevages, les effluents des industries agroalimentaires et les déchets ménagers. Les gaz issus de la fermentation sont composés de 65 % de méthane, 34 % de CO<sub>2</sub> et 1 % d'autres gaz dont le sulfure d'hydrogène et le diazote. Le méthane est un gaz pouvant se substituer au gaz naturel (ce dernier est composé de plus de 95 % de méthane). Il peut être utilisé soit dans des moteurs à allumage commandé (technologie des moteurs à essence) soit dans des moteurs dits dual-fuel [25].

#### **c. Le Bioéthanol**

L'éthanol, par nature chimique n'est pas un substitut des fiouls et gazoles mais bien un substitut des essences. Cependant, il y a un intérêt à l'utiliser dans les moteurs diesels car ils équipent la totalité des parcs agricoles et des véhicules de transports de marchandises et de passagers.

Au cours des années 80, plusieurs procédés ont été développés pour utiliser de l'éthanol de préférence non-anhydre (éthanol 95 %) dans les moteurs diesels [25].

**d. Aptitude du Bioéthanol à la combustion :** L'indice d'octane de 5 révèle que l'éthanol n'est pas apte à l'auto-inflammation dans les conditions technologiques des moteurs Diesel. L'allumage et le déroulement de la combustion devront donc être initiés et contrôlés, soit par un autre carburant (mode dual-fuel), soit par un additif spécifique, soit par un système à décharge électrique classique (mode allumage assisté). Le contenu calorifique des mélanges air/carburant, stoechiométriques, indique une puissance attendue plus élevée à l'éthanol qu'au gasoil. La faible viscosité cinématique de l'éthanol peut être une contrainte [25].

## **Conclusion**

Cette technologie décrit une nouvelle filière de production de biocarburants issu de la biomasse, elle offre aussi de solides perspectives quant aux développements des technologies et des systèmes énergétiques durables. C'est aussi une solution pour diminuer la dépendance au énergies fossiles pour diminuer la pollution à effet de serre

En précisant notamment la disponibilité des ressources végétales utiles à leur fabrication. Essentiellement pour les biomasses de 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> générations.



# **Chapitre 4**

## **Expériences et résultats**

## **Introduction**

La mise en œuvre d'une expérience pour produire du bioéthanol à partir de résidus agricoles et industriels est présentée dans ce chapitre. Le choix d'une biomasse disponible et non coûteuse s'est porté sur les déchets de dattes comme produit naturel et sur la mélasse qui constitue un déchet industriel issu de la transformation du sucre. Dans le but est de valoriser ces déchets et les transformer en bioénergies nous avons procédé à leurs fermentations et à leurs distillations.

Enfin nous avons récupéré le bioéthanol, mesuré le rendement en volume et étudié quelques caractéristiques pour les comparer avec l'éthanol pur.

### **4-1. Biomasses utilisées**

Deux types de biomasse ont été utilisés dans cette étude :

- Des dattes sèches récupérées gratuitement au niveau de la décharge du marché de gros de Mostaganem

- La mélasse récupérée gratuitement de l'usine de sucre de Berrahal à Mostaganem

Le choix de ces matières premières se justifie par leurs abondances et leurs richesses en sucre simples qui facilitent la fermentation.

Les dattes invendables sont jetées dans un lieu spécifique au niveau du marché de gros de Mostaganem; les quantités récupérables quotidiennement peuvent dépasser la centaine de kg d'après les marchands de dattes. La matière récupérée est généralement en début de fermentation naturelle, ce qui favorisera son utilisation dans le procédé de transformation envisagé.

La mélasse, sous produit du raffinage industriel du sucre, est disponible en grande quantité au niveau de toutes les usines de production du sucre blanc cristallisé.

Au niveau de l'usine de Berrahal, la quantité disponible s'élève à 3800 tonnes par an. Durant le mois de mai 2022, la production de mélasse a atteint 330 tonnes

Cette matière est vendue à un prix dérisoire, 12000 DA la tonne. Elle a été vendue pour des entreprises qui produisent de l'alcool et des engrais.

### **4-2. Matériels utilisés**

Nous avons utilisé uniquement des matières naturelles disponibles à savoir les dattes et la mélasse. Pour accélérer le processus de fermentation nous avons utilisé de la levure boulangère de type *Saccharomyces Cerevisiae*, largement disponible dans le commerce.

### 4-3. Les étapes de Production de bioéthanol

Les principales étapes pour produire de l'éthanol sont schématisées sur la figure 4.1. L'opération a été répétée plusieurs fois pour des produits purs et des mélanges. Il est à noter que pour les dattes, la fermentation avait commencé de manière spontanée durant le stockage de ceux-ci. Nous avons fabriqué deux types de fermentateurs le premier d'une capacité de 15 l et le second d'une capacité de 2 l. Pour les besoins de notre expérience nous avons surtout eu recours au fermentateur de petite capacité.

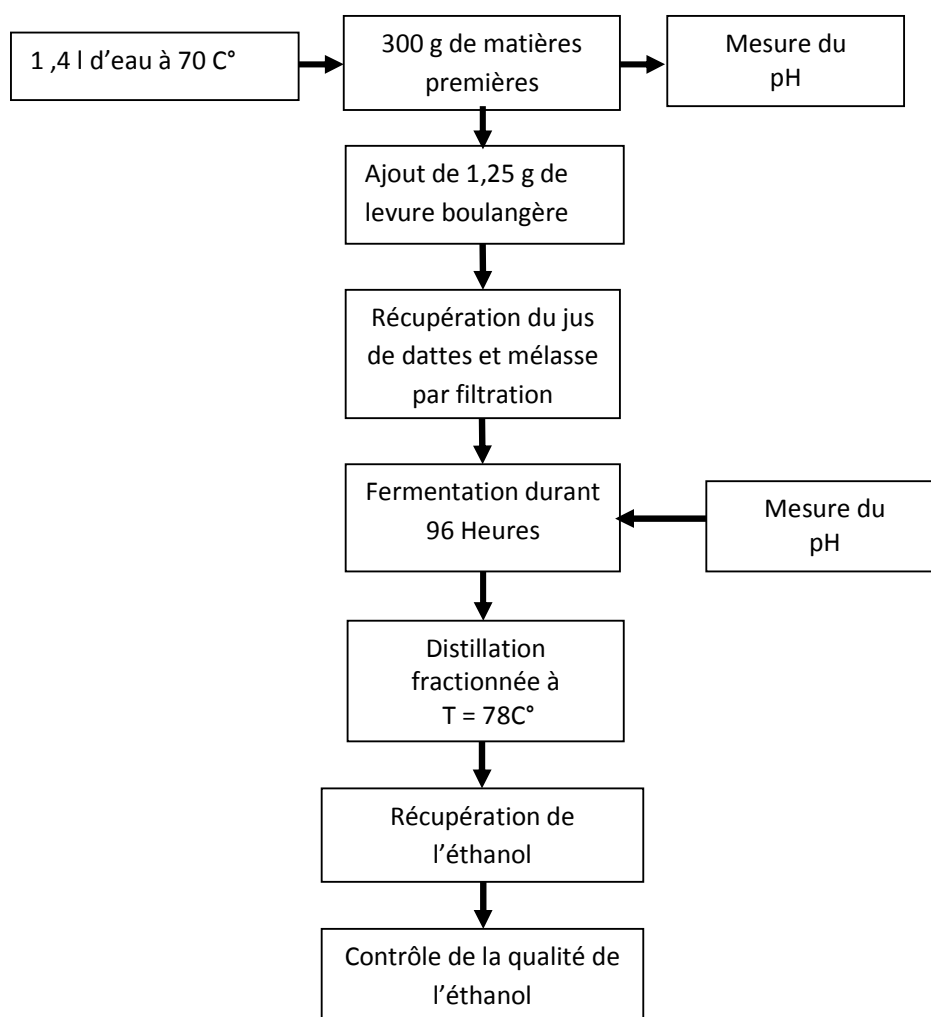


Figure 4-1 : Mode opératoire de l'expérience

La fermentation a été conduite en milieu anaérobique pendant 92 heures pour les dattes et 120 heures pour la mélasse; en moyenne.

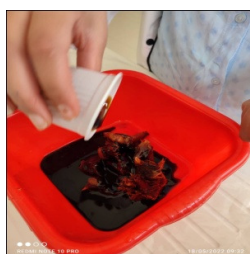
Nous avons suivi l'évolution de la fermentation en observant l'émission du gaz carbonique dans le barboteur. Dès la fin du dégazage, le produit est filtré sous vide. Le liquide obtenu est alors distillé à environ 78 °C

Le pH est mesuré à l'aide d'un pH mètre lors de chaque étape à température ambiante.

La densité du liquide à distiller est mesurée à température ambiante.



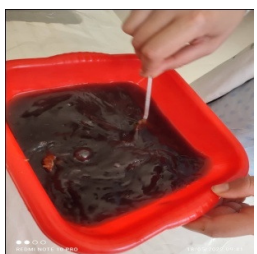
1. Dattes naturelles



2. Mélange Dattes et Mélasse



3. Dilution avec de l'eau chaude



4. Agitation et dissolution après ajout de la levure



5. Mesure du pH



6. Fermentation



7. Produit de la fermentation

**Figure 4-2 Principales étapes de la première expérience**

La fermentation naturelle s'est effectuée dans les conditions du laboratoire, nous avons procédé à une agitation manuelle des mélanges à intervalles réguliers pour homogénéiser les produits.

Une fois la fermentation réalisée nous avons procédé à une distillation fractionnée pour optimiser la séparation des produits. La figure 4.3 représente le dispositif de distillation utilisé

Un ballon rond, contenant le mélange de liquides à séparer est chauffé a  $78^{\circ}\text{C}$  par un chauffe ballon thermostaté. Une colonne à fractionnement (colonne de Vigreux) est reliée au ballon par un tube de jonction. Un thermomètre permet de suivre la température de la vapeur ascendante. Un réfrigérant permet de condenser le distillat et sa récupération dans une fiole (figure 4.4).

Des pierres ponce sont utilisées pour contrôler la température.



*Figure 4-3 : Dispositif de distillation*



*Figure 4-4 : Ethanol obtenu*

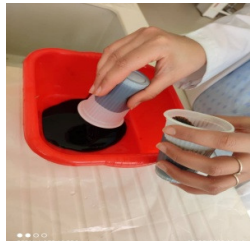
Pour la deuxième expérience nous avons choisi la mélasse en passant par les étapes suivantes nous avons mélangé une quantité  $m= 300\text{ g}$  de mélasse avec de l'eau à  $T=78^{\circ}\text{C}$ .

La solution a été filtrée puis fermentée durant 120 heures puis nous sommes passés à la distillation.

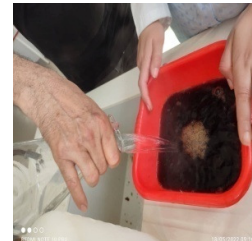
Durant la distillation nous avons contrôlé la température pour produire de l'éthanol à base de mélasse.



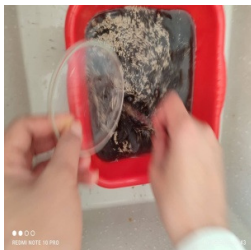
1. mélasse et levure



2.300g de mélasse



3- dilution avec l'eau chaud



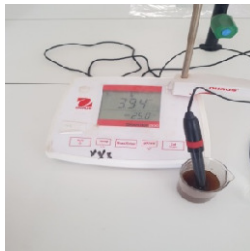
4 .la levure boulangère



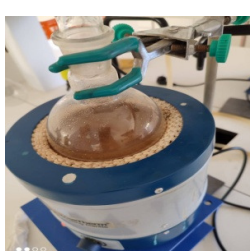
5. la fermentation



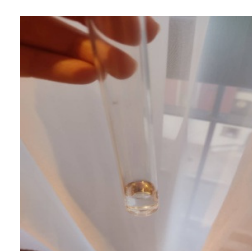
6. après 120heure de fermentation



7.mesure de PH



8 .la distillation



8. l'éthanol obtenue



9- l'éthanol inflammable

*Figure 4-5 Principales étapes de la deuxième expérience*

#### 4-4. Résultats de l'analyse physicochimique du Produit final (bioéthanol )

Les résultats des analyses physicochimique moyennes du bioéthanol produit à partir des dattes et de la mélasse sont représentés dans le tableau 4.1 , d'après les résultats obtenus on peut dire que le bioéthanol produit est conforme aux normes.

Chaque opération a été répétée au moins trois fois pour contrôler la répétabilité des résultats

*Tableau 4.1 . Résultats des analyses physicochimiques du bioéthanol*

<b>Paramètre</b>	<b>Dattes (23°C)</b>	<b>Mélasse et dattes (22°C)</b>	<b>Mélasse (22°C)</b>	<b>Ethanol pur (20°C)</b>
<b>pH</b>	5,2	4,2	3,2	4
<b>La densité</b>	0,854	0,799	0,791	0.789
<b>Le volume récupéré</b>	6ml	5ml	4,5ml	15ml
<b>Indice de réfraction</b>	1,352	1,362	1.363	1.361
<b>redement</b>	faible	Moyen	Moyen	Référence

Nous avons utiliser un réfractomètre qui permet de déterminer l'indice de réfraction (exemple pour l'eau = 1,33 pour l'air = 1). Cet indice s'observe par la déviation d'un faisceau lumineux suivant la nature du milieu dans lequel il se propage

*Figure 4-6 : Réfractomètre*



## **4-5. Analyse des résultats**

Nous avons obtenu dans le présent travail expérimental un bioéthanol de bonne qualité (volatil, inflammable, limpide et possédant une odeur piquante). Le rendement obtenu est moyen, il est supérieur à celui obtenu dans d'autres travaux.

L'utilisation du réfractomètre nous a donné un indice de réfraction qui s'approche de l'indice de l'éthanol pur.

Nous avons tenté de procéder à d'autres analyses plus poussées pour déterminer la composition de notre produit mais malheureusement les techniques nécessaires n'étaient pas disponibles au moment de la réalisation de ce travail

Nous pouvons conclure que la valorisation de la mélasse et les dattes nous a permis d'avoir une bonne productivité en éthanol, en exploitant les meilleures variations du système microorganisme/substrats et sa capacité à fermenter le glucose en éthanol.

Nous avons procédé de la manière la plus simple pour mener cette étude, en jetant les premiers pavés; il reste cependant beaucoup de choses à faire dans ce domaine.

L'optimisation des mélanges, des températures et des temps de fermentation font parties des perspectives de ce travail.

## **Conclusion**

La production d'éthanol à base de déchets de dattes et de mélasse par transformation par voie fermentaire est réussit premièrement puisque ses déchets sont riche en sucre fermentescibles et simple à réaliser

Le bioéthanol produit par fermentation peut remplacer celui obtenu par voie chimique à partir des produits pétroliers et il constitue une solution intéressante sur le plan socio-économique et industrielle à grande échelle.

Le bioéthanol peut aussi remplacer le pétrole léger comme biocarburant en le mixant à l'essence avec de pourcentage (5 à 10% d'éthanol). Une telle industrie de bioéthanol doit être mise en œuvre dans notre pays puisque elle caractérise un potentiel énergétique important et une forte disponibilité de déchets de dattes de faible valeur marchande en plus rejet .Enfin, il faut encourager les recherches et les études pour améliorer les connaissances dans ce domaine.



## Conclusions générale

Il est bien établi que la biomasse reste une solution alternative partielle aux ressources fossiles pour une énergie plus propre et renouvelable.

La biomasse participe à la lutte contre les émissions à gaz à effet de serre. Elle permet d'éliminer les déchets et les convertir en bioénergie pour éviter la pollution de l'environnement et permettre la stabilité énergétique grâce aux bioéthanol ou biodiesel, qui constitue une bonne alternative aux combustibles fossiles.

A travers les résultats obtenus nous concluons que nous avons atteint une partie importante de nos objectifs fixés.

Le choix de la biomasse à traiter, à savoir les dattes et la mélasse, s'est avéré judicieux sur le plan économique et facile à valoriser pour les transformer en bioéthanol.

Les montages réalisés aussi bien pour de faibles quantités que pour des quantités plus importantes nous ont permis de démontrer l'efficacité du procédé jusqu'à la production de bioéthanol.

Nous avons utilisé des moyens simples et accessibles pour réaliser notre travail, les résultats obtenus sont assez satisfaisants et nous permettes d'envisager la continuité du sujet.

Il est clair qu'une optimisation plus poussée des conditions opératoires et des technologies du procédé est encore nécessaire. Les deux pistes principales résident d'une part dans une diminution de la durée et de la température du prétraitement afin de réduire son coût énergétique, et d'autre part dans la recherche de nouvelles technologies alternatives performantes, permettant d'optimiser et de simplifier le procédé. Enfin, une analyse technico-économique détaillée qui prendra en compte ces technologies reste une étape indispensable et elle devra faire l'objet d'une étude dédiée dans le futur.

# Bibliographies

- [1] Leonel J. R. Nunes and João C. O. Matias "Application of Biomass for the Production of Energy in the Portuguese Textile Industry", *International Conference on Renewable Energy Research and Applications*, 20-23 October 2013.
- [2] Naili A. Messaoudi .L « Valorisation énergétique de la biomasse en Algérie et prospective à l'horizon 2050 », Université Kasdi Merbah Ouargla *mémoire de MASTER*, 2017, page 27
- [3] B.BENABED, « Etude des propriétés thermophysiques des mélanges contenant des composés dérivés de la biomasse », université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen *MEMOIRE de MASTER*, 2014, page 15
- [4] J. Boucher , "Etude des possibilités de production d'éthanol hémicellulosique dans le cadre d'une bio raffinerie papetière », thèse pour obtenir le cadre de docteur de l'université de Grenoble, 7 août 2006.
- [5] A. Singh , A.Devi , S. Bajar D. Pant , Z. Ud Din , "Ethanol from lignocellulosic biomass: An in-depth analysis of pre-treatment methods, fermentation approaches and detoxification processes", June 8, 2021.
- [6] F. Zamora , " Chapter 1 Biochemistry of Alcoholic Fermentation", Springer Science+Business Media, 2009
- [7] Cardona, C. A., & Sánchez, Ó. J. (2007). " Fuel ethanol production: process design trends and integration opportunities. *Bioresource technology*", 98(12).
- [8] Oscar J. Sánchez, S. Montoya, "Production of Bioethanol from Biomass: An Overview", Springer science business , August 2013.
- [9] Switzenbaum, M. S., Giraldo-Gomez, E., & Hickey, R. F. (1990). *Monitoring of the anaerobic methane fermentation process. Enzyme and Microbial Technology*, 12(10).
- [10] Eloutassi N., Louaste B., Boudine L., Remmal A. (2014), " Production de bioéthanol et de protéines d'organismes unicellulaires PAR *Erwinia chrysanthemi* EC 3665 a partir des déchets de distilleries des plantes" *Revue des Bio Ressources*, Vol 4.
- [11] Volynets, B., Ein-Mozaffari, F., & Dahman, Y. (2017). *Biomass processing into ethanol: pretreatment, enzymatic hydrolysis, fermentation, rheology, and mixing. Green Processing and Synthesis*, 6(1).
- [12] Lu, J., Li, X., Zhao, J., & Qu, Y. (2012). *Enzymatic saccharification and ethanol fermentation of reed pretreated with liquid hot water. Journal of Biomedicine and Biotechnology*, 2012 .
- [13] Shang, X. , "Preparation of ethanol by fermentation from mechanical grinding washing waters in laboratory scale", Faculty of Technology, Imatra Paper Technologie , 2011.
- [14] D. Ballerini « Les biocarburants état des lieux perspectives et enjeux du développement », livre de IFP publication , 2006.
- [15] Chibane .I et Ghoubal .R « La bio-production d'éthanol par *Saccharomyces cerevisiae* cultivé sur milieu à base de déchets de dattes », Université L'Arbi Ben Mhidi Oum El Bouaghi, *Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master*, 2021.
- [16] ZEROUALI . A HAMAMI .H, « Valorisation de la mélasse de canne à sucre (raffinerie groupe Berrahel) pour la production du bioéthanol », Université Abdelhamid Ibn Badis-Mostaganem , pour l'obtention du diplôme de Master en BIOLOGIE 2019, page 22,32
- [17] Thanh Dat N « Protection de la levure *Saccharomyces cerevisiae* par un système biopolymérique multicouche » THÈSE présentée à AgroSup Dijon en vue de l'obtention du grade de Docteur de l'Université de Bourgogne, 2016.
- [18] Maarouf .A « Production de bioéthanol à partir d'une biomasse lignocellulosique multi-ressources locale par prétraitement Organosolv et hydrolyse enzymatique », Université Clermont Auvergne THÈSE en vue d'obtenir le grade de Doctorat 2020.
- [19] Hadroug .F, « Utilisation d'une ressource végétale pour la production du bioéthanol : cas de la betterave », Université Djilali BOUNAAMA - KHEMIS MILIANA ,Mémoire de Master 2019, page 67
- [20] F.Kaidi et A.Touzi « Production du Bioalcool a partir des déchets de dattes », article publié de Laboratoire de biomasse centre de développement des énergies Renouvelable, 2001.
- [21] Sadi .M « Valorisation énergétique durable des dattes Algériennes en vue de produire du bioéthanol » Université Djilali BOUNAAMA - KHEMIS MILIANA mémoire de master, 2019.
- [22] B. Schmit S, Drogue « les biocarburants de premières génération ;un bilan mondial mitige », INRA sciences sociales, Mars, 2012.
- [23] Montoya, S., Patiño, A., & Sánchez, Ó. J. (2021). *Production of lignocellulolytic enzymes and biomass of *Trametes versicolor* from agro-industrial residues in a novel fixed-bed bioreactor with natural convection and forced aeration at pilot scale. Processes*, 9(2).
- [24] Alleman, T. L., McCormick, R. L., Christensen, E. D., Fioroni, G., Moriarty, K., & Yanowitz, J. (2016). *Biodiesel handling and use guide (No. NREL/BK-5400-66521; DOE/GO-102016-4875). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).*
- [25] F. Chaa , "Production du bioéthanol. Analyse et modélisation par la loi de Mechaelis-Menten, », Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostagane ,Mémoire de master académique ,2019.
- [26] E. de Combustão , « Utilisation des biocarburants dans les moteurs a allumage par compression », agritrop.cirad.fr 2013.