

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد الصديق بن يحيى جيجل

Faculté des Sciences de la Nature  
et de la Vie  
Département de Microbiologie  
Appliquée et Sciences Alimentaires



كلية علوم الطبيعة والحياة  
قسم الميكروبيولوجيا التطبيقية  
وعلوم التغذية

## Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme :  
Master Académique en Sciences de la Nature et de la Vie  
Filière : Sciences Biologiques  
Option : Microbiologie Appliquée

### Thème

Technologie de production de biodiesel et bioéthanol

#### Membres de Jury

Présidente : Dr. BEKKA Fahima  
Examinatrice : Dr. LEHAÇANI Sarra  
Encadrant : Dr. AMIRA Samiya

#### Présenté par

M<sup>elle</sup> : DOUKHANE Amal  
M<sup>elle</sup> : DJINI Ines  
M<sup>elle</sup> : HARROUCHE Khedidja

Année Universitaire 2022-2023

Numéro d'ordre (bibliothèque) : .....

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد الصديق بن يحيى جيجل

Faculté des Sciences de la Nature  
et de la Vie  
Département de Microbiologie  
Appliquée et Sciences Alimentaires



كلية علوم الطبيعة والحياة  
قسم الميكروبيولوجيا التطبيقية  
وعلوم التغذية

## Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme :  
Master Académique en Sciences de la Nature et de la Vie  
Filière : Sciences Biologiques  
Option : Microbiologie Appliquée

Thème

Technologie de production de biodiesel et bioéthanol

### Membres de Jury

Présidente : Dr. BEKKA Fahima  
Examinatrice : Dr. LEHAÇANI Sarra  
Encadrant : Dr. AMIRA Samiya

### Présenté par

M<sup>elle</sup> : DOUKHANE Amal  
M<sup>elle</sup> : DJINI Ines  
M<sup>elle</sup> : Harrouche Khedidja

Année Universitaire 2022-2023

Numéro d'ordre (bibliothèque) : .....

# Remerciements

On remercie Dieu le tout puissant de nous avoir donné la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Nous tenons à exprimer toutes nos reconnaissances à notre directrice de mémoire, *Dr. AMIRA Samiya*. Nous la remercions de nous avoir encadrées, orientées, aidées et conseillées.

On remercie les membres de notre jury , notre présidente Dr.BEKKA Fahima et notre examinatrice Dr.LEHAÇANI Sarra pour le grand honneur qu'elles nous font en acceptant de juger ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les enseignants, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté.

De nous rencontrer et de répondre à nos questions durant notre recherche. Nous remercions profondément, nos familles, nos amis ainsi que les personnes qui nous ont soutenues de près ou de loin au cours de la réalisation de ce mémoire.

# Dédicace

Je dédie ce travail :

À la mémoire de mon père

À ma petite famille

À tout ce qui me sont chers

*Inès.*

# Dédicace

## Je dédie ce travail :

Aux deux êtres les plus chers, mon père *Abdelhakim* et ma mère *Samira* pour

Leur amour, leur soutien et leurs sacrifices, en témoignage

De mon profond respect et mon amour pour eux !

A ma grande- mère *Werida* et mon grand-père *Ahmed*

A mes très chers frères : *Said, Abed raouf* et *Chamsseddine*

A ma très chère sœur : *Sarah*

A Mes grandes familles *DOUKHANE* et *CHOUIA*

A mes collègues dans ce travail : Ines et khedidja

A tous mes amis et en particulier ma chère amie *Ines* et à toutes les personnes

qui ont participés de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

A tous ce qui m'ont enseigné tout au long de mon parcours scolaire !

*AMAL*

# Dédicace

*À l'aide de dieu tout puissant, qui m'a tracé le chemin de ma vie, J'ai*

*Pu réaliser ce travail que je dédie à*

*Mon cher père "MOURAD"*

*Mon support dans ma vie qu'il trouve ici le fruit de son encouragement, son soutien,*

*Surtout pour son amour et son sacrifice afin que rien n'entrave le déroulement*

*De mes études.*

*Ma chère mère "MESSOUDA"*

*Symbole d'amour et d'affection, qui me donne toujours l'espoir de vivre et*

*Continue de l'être pour faire mon bonheur. Que dieu protège et lui donne bonne*

*Santé et qu'elle trouve ici la preuve de ma reconnaissance infinie.*

*Mes très chers frères*

*"MOHAMMED", "SEIF-EDDINE", "AHCENE" et "YASSINE".*

*Mes belles sœurs*

*Qui m'avez toujours soutenu et encouragé durant ces années d'études.*

*Toute ma grande famille*

*Qui a toujours cru en moi et qui m'a toujours soutenue.*

*Mon trinômes "INES" et "AMAL"*

*Pour ses soutiens moraux, ses patiences et ses compréhensions tout au long de ce projet.*

*Meilleure amie "ASMA"*

*Tous ceux ou celles que je n'ai pas mentionné mais je n'ai pas oublié.*

Khedidja



# Sommaire

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

<b>Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I Biocarburant Définition de biocarburants</b>	
<b>I.1. Comparaison entre les biocarburants et les carburant fossiles.....</b>	<b>4</b>
<b>I.2. Classification des biocarburants.....</b>	<b>5</b>
<b>I.2.1. Selon l'origine.....</b>	<b>5</b>
<b>I.2.2. Selon la forme.....</b>	<b>7</b>
<b>I.2.3. Selon la technologie de production.....</b>	<b>8</b>
<b>I.3. Utilisation des biocarburants.....</b>	<b>9</b>
<b>I.4. Avantages et inconvénients des biocarburants.....</b>	<b>10</b>
<b>I.5. Microorganismes impliqués dans la production des biocarburants.....</b>	<b>12</b>
<b>I.6. Principaux producteurs mondiale de biocarburant.....</b>	<b>12</b>
<b>Chapitre II Biodiesel et technologie de production</b>	
<b>II.1. Historique de biodiesel.....</b>	<b>14</b>
<b>II.2. Définition de biodiesel.....</b>	<b>15</b>
<b>II.3. Matières premières de biodiesel.....</b>	<b>15</b>
<b>II.4. Types de biodiesel.....</b>	<b>16</b>
<b>II.4.1. Premier type de biodiesel.....</b>	<b>16</b>

II.4.2. Deuxième type de biodiesel.....	16
II.4.3. Troisième type de biodiesel.....	17
II.4.4. Quatrième type de biodiesel.....	18
II.5. Avantages et inconvénients des matières premières.....	18
II.6. Caractéristiques de biodiesel.....	19
II.7. Utilisation de biodiesel.....	22
II.8. Procédés d'extraction et de production de biodiesel.....	22
II.8.1. Techniques d'extraction d'huile.....	23
II.8.1.1. Extraction mécanique.....	23
II.8.1.2. Extraction par solvant (Extraction chimique) .....	24
II.8.1.3. Extraction enzymatique.....	24
II.8.2. Technologies de production de biodiésel.....	24
II.8.2.1. Pyrolyse.....	25
II.8.2.2. Microémulsification.....	26
II.8.2.3. Dilution.....	26
II.8.2.4. Transestérification.....	27
II.9. Paramètres importants de la réaction de Trans-estérification des huiles.....	28
II.10. Séparation et purification de biodiesel.....	29
II.10.1. Séparation et purification par lavage humide.....	30
II.10.2. Séparation et purification par lavage à sec.....	30
II.10.3. Séparation et purification de biodiesel par la technologie membranaire.....	31
.....	31
II.11. Marché mondiale de biodiesel.....	32
II.11.1. Production mondiale de biodiesel.....	32
II.11.2. Consommation mondiale de biodiesel.....	33
<b>Chapitre III Bioéthanol et technologie de production</b>	
III.1. Historique de bioéthanol.....	37

<b>III.2. Définition de bioéthanol.....</b>	<b>37</b>
<b>III.3. Matières premières de bioéthanol.....</b>	<b>38</b>
<b>III.4. Générations de bioéthanol.....</b>	<b>39</b>
<b>III.4.1. Première génération de bioéthanol.....</b>	<b>39</b>
<b>III.4.2. Deuxième génération de Bioéthanol.....</b>	<b>39</b>
<b>III.4.3. Troisième génération de bioéthanol.....</b>	<b>40</b>
<b>III.4.4. Quatrième génération de bioéthanol.....</b>	<b>40</b>
<b>III.5. Propriétés physico-chimiques de bioéthanol.....</b>	<b>41</b>
<b>III.6. Utilisation de bioéthanol.....</b>	<b>42</b>
<b>III.7. Technologie de la production de bioéthanol.....</b>	<b>43</b>
<b>III.7.1. Processus global de production de bioéthanol.....</b>	<b>43</b>
<b>III.7.2. Technologie de la production du bioéthanol à partir de biomasse sucrée.....</b>	<b>44</b>
<b>III.7.2.1. Fermentation.....</b>	<b>44</b>
<b>III.7.2.2. Distillation et déshydratation.....</b>	<b>45</b>
<b>III.7.3. Technologie de la production du bioéthanol à partir de biomasse amylacée .....</b>	<b>45</b>
<b>III.7.3.1. Broyage à sec du maïs.....</b>	<b>46</b>
<b>III.7.3.2. Broyage humide du maïs.....</b>	<b>47</b>
<b>III.7.4. Technologie de production du bioéthanol à partir de biomasse lignocellulosique .....</b>	<b>49</b>
<b>III.7.4.1 Prétraitement.....</b>	<b>50</b>
<b>III.7.4.2. Hydrolyse.....</b>	<b>52</b>
<b>III.7.4.3 Fermentation.....</b>	<b>53</b>
<b>III.7.4.4. Distillation.....</b>	<b>56</b>
<b>III.7.5. Production du bioéthanol à partir de biomasse algal.....</b>	<b>56</b>
<b>III.7.5.1. Hydrolyse.....</b>	<b>57</b>
<b>III.7.5.2. Fermentation.....</b>	<b>57</b>

<b>III.8. Séparation et purification de bioéthanol.....</b>	<b>58</b>
<b>III.9. Microorganismes producteurs de bioéthanol.....</b>	<b>58</b>
<b>III.10. Marché mondial de bioéthanol.....</b>	<b>60</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>62</b>
<b>Références bibliographie.....</b>	<b>63</b>
<b>Résumé</b>	

## Liste des abréviations

---

**AGL** : Acides Gras Libres.

**AIE** : Agence Internationale de l'Energie.

**CE** : Conformité Européenne.

**DD** : Drêches de Distillerie.

**DDSS** : Drêches de Distillerie Séchées avec Solubles.

**E10** : 10% d'Ethanol.

**E85** : 85% d'Ethanol.

**EMAG** : Ester Méthylique d'Acide Gras.

**FAO** : Organisation des nations unies pour l'Alimentation et l'Agriculture.

**GNC** : Gaz Naturel Comprimé.

**GNL** : Gaz Naturel Liquéfié.

**HFS** : Hydrolyse et la Fermentation Séparées.

**NAMT** : Norme Américaine de Matériel Technique.

**OCDE** : Organisation de Coopération et de Développement Économiques.

**SCFS** : Saccharification et Co-Fermentation Simultanée.

**SFS** : Saccharification et Fermentation Simultanées.

**UE** : Union Européenne.

## Liste des tableaux

---

<b>Tableau I.1</b> : Quelques avantages et inconvénients des biocarburants et des carburants fossiles.....	4
<b>Tableau I.2</b> : Composition des micro-algues les plus utilisés dans la production des biocarburants.....	6
<b>Tableau I.3</b> : Domaines d'utilisations des biocarburants .....	10
<b>Tableau I.4</b> : Avantages des biocarburants.....	10
<b>Tableau I.5</b> : Inconvénients des biocarburants.....	11
<b>Tableau II.1</b> : Avantages et inconvénients de trois générations de matières premières .....	20
<b>Tableau II.2</b> : Principaux producteurs de biodiesel.....	35
<b>Tableau III.1</b> : Propriétés physico-chimiques de l'éthanol.....	41
<b>Tableau III.2</b> : Souches de bactéries et de levures productrices d'éthanol comme produit majeur de fermentation.....	58
<b>Tableau III.3</b> : Principaux producteurs de bioéthanol.....	59

## Liste des figures

---

<b>Figure I.1</b> : Générations de biocarburants à partir de leurs matières premières.....	8
<b>Figure I.2</b> : Principaux microorganismes impliqués dans la production de biocarburants. .....	13
<b>Figure I.3</b> : Évolution de la production mondiale de biocarburants.....	13
<b>Figure I.4</b> : Production mondiale des biocarburants par pays.....	14
<b>Figure II.1</b> : Matières premières utilisées pour la production de biodiesel.....	17
<b>Figure II.2</b> : Matières premières de première type de biodiesel.....	17
<b>Figure II.3</b> : Matières premières de deuxième type de biodiesel.....	18
<b>Figure II.4</b> : <i>Mucor circinelloides</i> .....	18
<b>Figure II.5</b> : Micro-algues génétiquement modifiées utilisées dans la production de quatrième type de biodiesel.....	19
<b>Figure II.6</b> : Utilisations du biodiesel dans différents secteurs.....	23
<b>Figure II.7</b> : Procédés de production utilisés pour les différents types de biodiesel.....	24
<b>Figure II.8</b> : Schéma réactionnel de production de biodiesel par voie thermochimique (pyrolyse).....	27
<b>Figure II.9</b> : Réaction de transestérification pour la production de biodiesel.....	28
<b>Figure II.10</b> : Évolution de la production mondiale de biodiesel.....	34
<b>Figure II.11</b> : Consommation de biodiesel par région en 2019 et différence avec la production .....	35
<b>Figure III.1</b> : Matières premières utilisées pour la production de bioéthanol.....	38
<b>Figure III.2</b> : Les quatre générations de bioéthanol.....	40
<b>Figure III.3</b> : Diagramme de conversion de biomasse en bioéthanol.....	42
<b>Figure III.4</b> : Fermentation des substrats sucriers.....	44
<b>Figure III.5</b> : Processus de Broyage à sec du maïs.....	46
<b>Figure III.6</b> : Processus de Broyage à humide du maïs.....	48
<b>Figure III.7</b> : Fermentation de biomasse lignocellulosique.....	52
<b>Figure III.8</b> : Organigramme de processus HFS.....	53
<b>Figure III.9</b> : Organigramme du processus SFS.....	54
<b>Figure III.10</b> : Organigramme du processus SSC.....	55

# **Introduction**

## **Introduction**

---

L'épuisement des réserves de combustibles fossiles pourrait probablement constituer la menace d'une crise énergétique. D'autre part, le monde est confronté au problème de réchauffement climatique (Saravanan et al., 2023). Ces deux épreuves sont reliées entre elles, la recherche des sources alternatives devient de plus en plus une nécessité plutôt qu'un choix. Parmi les solutions qui présentent un grand intérêt que ce soit économique, environnemental ou social, on trouve les biocarburants.

Les « biocarburants » sont les produits chimiques solides ; liquides et gazeux, enrichis d'énergie produits par les processus biologiques ou dérivés de la biomasse d'organismes vivants, comme les micro-algues, les plantes et les bactéries (Rodionova et al, 2017). En plus d'être renouvelable, le biocarburant est également non toxique, ce qui provoque moins d'émissions de carbone que le carburant fossile (Liew et al., 2014).

Sur la base des matières premières et de la méthode de production, les biocarburants sont classés en différents groupes appelés biocarburants de première, deuxième, troisième et quatrième génération (Liew et al., 2014). Il y'a plusieurs types de biocarburants : le butanol, l'hydrogène, le méthane, l'huile végétale, l'isoprène, qui sont obtenus par plusieurs technologies. Cependant, le bioéthanol et le biodiesel s'avèrent les biocarburants les plus couramment utilisés dans le monde entier (Saravanan et al., 2023).

Le biodiesel est un carburant produit à partir de sources végétales ou animales, la technologie de production de ce carburant en un processus chimique appelé transestérification, dans lequel les triglycérides présents dans les huiles végétales ou les graisses animales sont convertis en esters méthyliques ou éthyliques. Ces esters sont ensuite mélangés avec du diesel conventionnel pour produire du biodiesel prêt à être utilisé dans les moteurs diesel.

Le bioéthanol, quant à lui, est principalement produit à partir de matières premières riches en sucre ou en amidon. Le processus de production du bioéthanol implique la fermentation des sucres présents dans les matières premières à l'aide de levures spéciales, suivie d'une distillation pour obtenir de l'éthanol pur. L'éthanol ainsi produit peut-être mélangé avec de l'essence conventionnelle pour former des mélanges tels que l'E10 (contenant 10% d'éthanol) ou l'E85 (contenant 85% d'éthanol), utilisé comme carburants pour les véhicules à essence. La production mondiale de biocarburants a augmenté de 11,4 % entre 2007 et 2017. Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la production mondiale de biocarburants a atteint un record de 154 milliards de litres en 2018. Selon les prévisions, il augmentera de 25 % d'ici 2024, avec une augmentation annuelle moyenne de 3% (Cheng et al., 2011).

L'objectif de ce travail est de synthétiser les technologies de production de biodiesel et de bioéthanol comme principaux biocarburants et ceci selon trois chapitres :

## **Introduction**

---

Dans le premier chapitre nous allons parler sur les biocarburants comme source d'énergie , nous allons voir une définition de biocarburants , puis nous allons étudier la classification de ces biocarburants selon leurs origines , leurs formes et leurs technologie de production . après ça on vas passer a la situation mondiale des biocarburants sans oublier de citer quelques avantages et inconvénients de ces derniers.

Dans le deuxième chapitre on vas discuter le sujet de biodiesel ,nous allons mentionner une définition , les matières de base pour la fabrication de biodiesel et la technologie de cette fabrication.

Pour le dernier chapitre qui est intitulé le bioéthanol , nous allons parler sûr la définition de ce biocarburant , les matières essentielles pour sa production et la méthode de la production de bioéthanol et on finit le travail avec une conclusion générale.

**Chapitre I**  
**Biocarburants**

Les carburants sont des substances utilisées comme source d'énergie pour les moteurs à combustion interne. Ils fournissent l'énergie nécessaire pour faire fonctionner les véhicules, les machines et d'autre équipement (Luque et al., 2008). Il existe différents types de carburants utilisés dans divers secteurs : les carburants fossiles (essence, diesel et gaz naturel), les carburants renouvelables ou biocarburants (biodiesel, éthanol et biogaz), les carburants alternatifs (hydrogène, électricité et propane) et carburants spéciaux (carburacteur et carburants de courses) (Kabar et Kadja, 2017).

Il est important de noter que les types de carburants disponibles peuvent varier en fonction des régions, des réglementations et des infrastructures de distribution. De plus, de nouvelles recherches et avancées technologiques continuent d'introduire de nouveaux types de carburants plus durables et innovants (Nuhu, 2013).

Les carburants fossiles sont des combustibles d'origine naturelle formés à partir de matières organiques enfouies dans la Terre depuis des millions d'années. Ils sont principalement constitués de composés d'hydrocarbures, qui sont des combinaisons d'atomes de carbone et d'hydrogène. Les principaux types de carburants fossiles sont : le pétrole, le gaz naturel et le charbon. Ces carburants fossiles sont des sources d'énergie largement utilisées dans le monde, mais ils présentent des inconvénients environnementaux majeurs, notamment les émissions de gaz à effet de serre responsables du changement climatique.

En raison de leur impact sur l'environnement et de l'épuisement progressif de leurs réserves, il y a un fort intérêt pour le développement et l'adoption de sources d'énergie alternatives et renouvelables pour réduire la dépendance aux carburants fossiles (Arshad et al., 2018).

Les biocarburants, sont apparus comme une véritable alternative. Ils peuvent être une source viable d'énergie renouvelable, ils comprennent tous les produits chimiques enrichis d'énergie produits directement par les processus biologiques ou dérivés de la conversion chimique de la biomasse d'organismes vivants antérieurs (Barnard et al., 2010).

Les biocarburants sont principalement produits à partir d'organismes photosynthétiques comme les bactéries photosynthétiques, les micro-algues, les macro-algues et les plantes terrestres vasculaires. Les principaux produits des biocarburants peuvent être du gaz, du liquide ou de la forme solide (Stančin et al., 2020).

L'utilisation d'énergies d'origine renouvelable devrait fortement augmenter d'ici 2050 dans le double contexte d'une demande énergétique croissante et d'une raréfaction progressive des ressources énergétiques non renouvelable (Khiari et al., 2016).

### I.1. Définition de biocarburants

Selon la directive européenne n° 2003/30/Conformité Européenne (CE) de Mai 2003, la définition des biocarburants est la suivante : « Combustibles liquides ou gazeux utilisés pour le transport et produits à partir de la biomasse », dont la biomasse signifie les matières organiques végétales ou animales non fossiles (Poitrat, 2009).

Les biocarburants sont des combustibles dérivés de l'agriculture. Ils sont obtenus à partir des matières organiques végétales ou animales (ainsi appelées biomasse) et employés dans les moteurs ». Les biocarburants les plus courants sont le biodiesel et les bioalcools, dont le bioéthanol et le biobutanol (aussi appelé bioessence). Les biocarburants sont assimilés à une source d'énergie renouvelable et durable (Luque et al., 2008).

### I.2. Comparaison entre les biocarburants et les carburants fossiles

Le Tableau I.1 représente quelques avantages et inconvénients des biocarburants et des carburants fossiles.

**Tableau I.1** : Quelques avantages et inconvénients des biocarburants et des carburants fossiles.

Biocarburants	Carburant fossils
L'utilisation des biocarburants permet la réduction des factures pétrolières ainsi que la diversification et la décentralisation des approvisionnements énergétiques (Dorin et Gitz,2008).	L'utilisation des carburants fossiles dans divers secteurs à provoqué l'apparition de pénuries des carburants dû à l'épuisement des réserves (Égalité, 2008).
Les biocarburants peuvent permettre réduction de l'émission des gaz à effet de serre, ainsi que la réduction de l'émission du CO, HC, SO2 (Dorin et Gitz, 2008) (Cortez et Leite, 2012) (Stolarski et al., 2019).	Les combustibles fossiles augmentent l'effet de serre (Bobin et al., 2021).
Son utilisation est encore limitée (Al-Haj, 2014).	Donne 80% de la consommation d'énergie (Khiari et al., 2016).
Augmente le développement économique rural.	L'augmentation de ses prix et l'inflation de sa

	facture de production due à la demande croissante de ses produits (dans de nombreux secteurs).
Il est encore à l'étude et à la modification.	La source d'énergie la plus importante aujourd'hui (Feng, 2009).
La plupart de ses sources sont des déchets organiques (Al-Haj, 2014).	Source fossile.
Ressources durables et renouvelables (Feng, 2009).	Ressource limitée insoutenable Épuisement de l'approvisionnement.
L'utilisation des biocarburants peut contribuer au maintien et à l'amélioration des revenus et emplois agricoles, par contre elle peut avoir un effet négatif sur le prix mondial du produit agricole et sur la sécurité alimentaire (notamment ceux de la première génération).	Les carburants fossiles participent à la pollution de l'eau utilisée pour l'irrigation en agriculture (Cellier et Genermont, 2016).

### I.3. Classification des biocarburants

#### I.3.1. Selon l'origine

Les biocarburants peuvent être classés en fonction de leur origine en quatre générations :

- **Première génération de biocarburants**

Ces biocarburants sont produits à partir de cultures agricoles spécifiquement cultivées pour la production de biocarburants. Cela comprend des cultures telles que le maïs, la canne à sucre, le colza, le blé et d'autres cultures riches en sucre, en amidon ou en huiles. Les exemples courants de ces biocarburants comprennent l'éthanol et le biodiesel (Naik et al., 2010).

- **Deuxième générations de biocarburants**

Ils sont produits à partir de déchets agricoles et forestiers tels que les tiges, les pailles, les coques, les résidus de récolte et les copeaux de bois. Ils utilisent des matières premières non alimentaires. Les exemples incluent le bioéthanol cellulosique produit à partir de la biomasse lignocellulosique et le biogaz provenant de la fermentation anaérobie de résidus organiques (Carriquiry et al., 2011).

- **Troisième génération de biocarburants**

Ces biocarburants sont produits à partir de micro-algues ou de macro-algues (algues marines). Les algues peuvent être cultivées dans des systèmes d'aquaculture et utilisent la photosynthèse pour produire des huiles ou des lipides qui peuvent être transformés en biocarburants tels que le biodiesel. Les biocarburants issus d'algues sont considérés comme prometteurs en raison de leur potentiel de production élevé et de leur capacité à pousser dans des zones non arables (Dragone et al., 2010). Le tableau I.2 montre les principales espèces algales utilisées comme source de la troisième génération ainsi que leurs compositions.

**Tableau I.2 :** Composition des micro-algues les plus utilisés dans la production des biocarburants (Hussain et Mahmud, 2019).

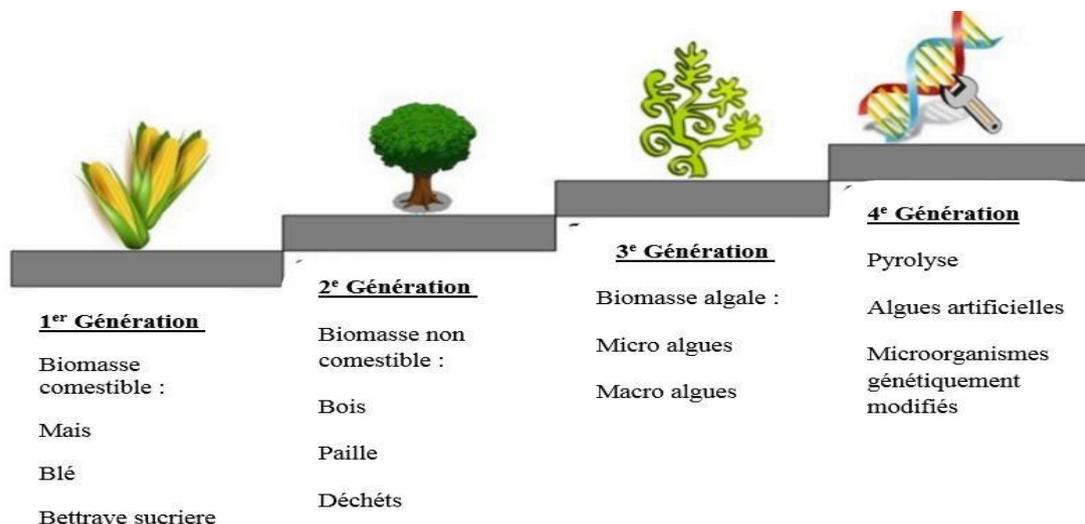
Types de microalgae	Sucre (%)	Protéine (%)	Lipides (%)
<i>Spirulina platensis.</i>	60	12	8
<i>Dunaliella salina.</i>	57	32	6
<i>Bellerochea sp.</i>	3	24	15
<i>Chaetoceros sp.</i>	2	18	18
<i>Rhodomonas sp.</i>	9	74	15
<i>Chlamydomonas reinhardtii.</i>	48	17	21
<i>Chlorella sp.</i>	56	22	19
<i>Spirogyra sp.</i>	20	55	16
<i>Porphyridium cruentum.</i>	35	50	11

- **Quatrième génération de biocarburants**

Ces biocarburants sont produits à partir de déchets organiques tels que les déchets alimentaires, les boues d'épuration, les graisses animales et les huiles de cuisson usagées. Ils sont généralement transformés en biogaz par le processus de digestion anaérobie ou en biodiesel par le biais de procédés de conversion spécifiques (Alalwan et al., 2019).

Les matières premières de quatrième génération sont une source potentiellement durable pour la production future de biocarburants. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires

pour trouver une alternative peu coûteuse à la production de biocarburants tout en améliorant l'efficacité énergétique (Mat Aron et al., 2020). La figure suivante I.1 représente les générations de biocarburants à partir de leurs matières premières.



**Figure I.1 :** Générations de biocarburants à partir de leurs matière premières (Alalwan et al., 2019).

### I.3.2. Selon la forme

Les biocarburants peuvent également être classés en fonction de leur forme physique ou chimique.

- **Biocarburants liquides**

Ce sont les formes les plus courantes de biocarburants. Ils sont généralement utilisés comme substituts aux carburants fossiles dans les moteurs à combustion interne. Les exemples courants de biocarburants liquides comprennent l'éthanol et le biodiesel (Nigam et Singh, 2011).

- **Biocarburants gazeux**

Ces biocarburants sont sous forme gazeuse et sont principalement utilisés pour la production d'électricité et de chaleur. Le biogaz est un exemple courant de biocarburant gazeux, produit par la fermentation anaérobie de matières organiques telles que les déchets agricoles, les déchets alimentaires et les boues d'épuration. Il est composé principalement de méthane et de dioxyde de carbone, avec des quantités variables d'autres gaz (Palz, 2005).

- **Biocarburants solides**

Bien que moins courants que les biocarburants liquides et gazeux, il existe également des biocarburants sous forme solide. Le bois, la biomasse ligneuse et les pellets de biomasse sont des exemples de biocarburants solides. Ils sont principalement utilisés pour le chauffage domestique et industriel, ainsi que pour la production d'électricité dans les centrales thermiques à biomasse (Obernberger et al., 2006).

Il est important de noter que certains biocarburants peuvent être transformés d'une forme à une autre pour répondre aux besoins spécifiques. Par exemple, le biogaz peut être converti en biocarburant liquide tel que le biométhane, qui peut être utilisé dans les véhicules fonctionnant au gaz naturel comprimé (GNC) ou au gaz naturel liquéfié (GNL).

### **I.3.3. Selon la technologie de production**

Les biocarburants peuvent aussi être classés en fonction de la technologie utilisée pour les produire (Ballerini et Alazard-Toux, 2006) :

- **Biocarburants de fermentation**

Ces biocarburants sont produits par fermentation de matières premières contenant des sucres ou de l'amidon. L'éthanol est le biocarburant le plus couramment produit par fermentation, à partir de cultures telles que le maïs, la canne à sucre, la betterave à sucre et d'autres cultures riches en sucres. La fermentation convertit les sucres en éthanol à l'aide de levures ou de bactéries spécifiques (Liew et al., 2013).

- **Biocarburants de Trans-estérification**

Ces biocarburants sont produits par le processus de Trans-estérification, qui convertit les huiles végétales ou animales en biodiesel. Dans ce processus, les huiles sont réagies avec un alcool, généralement le méthanol, en présence d'un catalyseur pour produire du biodiesel et de la glycérine en tant que sous-produit (Akubude et al., 2019).

- **Biocarburants de pyrolyse**

Ces biocarburants sont produits par la pyrolyse de biomasse. La pyrolyse est un processus de chauffage de la biomasse à des températures élevées en l'absence d'oxygène, ce qui entraîne la décomposition de la biomasse en gaz, en liquides et en charbon de bois. Les liquides produits par la pyrolyse, connus sous le nom de biohuile ou d'huile pyrolytique, peuvent être utilisés comme carburants (Laurent et al., 2011).

- **Biocarburants de gazéification**

Ces biocarburants sont produits par gazéification de la biomasse. La gazéification est un processus thermochimique qui convertit la biomasse en gaz de synthèse, principalement composé de monoxyde de carbone et d'hydrogène. Ce gaz de synthèse peut ensuite être utilisé pour produire du biogaz, du biodiesel ou d'autres produits chimiques (Molino et al., 2018).

- **Biocarburants d'hydrotraitement**

Ces biocarburants sont produits par hydrotraitement des huiles végétales ou animales. L'hydrotraitement est un processus dans lequel les huiles sont traitées avec de l'hydrogène à haute température et sous pression en présence de catalyseurs pour produire des hydrocarbures similaires aux carburants fossiles, tels que l'hydrotraitement des huiles végétales pour produire du diesel renouvelable (Starck et al., 2016).

Il convient de noter que ces classifications ne sont pas exhaustives, car de nouvelles technologies et méthodes de production de biocarburants sont continuellement développées et améliorées. De plus, certaines technologies peuvent être combinées pour produire des biocarburants mixtes ou hybrides (Le Gleuher et Farhi, 2005).

#### **I.4. Utilisation des biocarburants**

Avec le développement actuel dans le monde et les besoins croissants en énergie dans tous les pays il existe de nombreuses utilisations des biocarburants dans de nombreux domaines (Vermeersch, 2002), quelques-unes sont montrées dans le tableau I.3.

**Tableau I.3 :** Domaines d'utilisations des biocarburants (Ballerini et al., 2006).

Domaine d'utilisations des biocarburants				
Secteurs des Transport (voitures, camions, trainset avions).	Production d'énergie thermique (chauffages au bioalcool).	Fabrication de plastiques, conservateurs et boissons alcooliques.	Industrie pharmaceutique, cosmétique, produits alimentaires (bioéthanol de deuxième génération).	Fabrication de nombreux produits chimiques (peinture détergente, agent antiseptique, alcools et hydrocarbures...).

### I.5. Avantages et inconvénients des biocarburants

Le tableau I.4 et le tableau I.5 montrés ci-dessous récapitulent les avantages et les inconvénients des biocarburants :

**Tableau I.4 :** Avantages des biocarburants (Guo et Buhain., 2015).

Biocarburants		Avantages
Solide	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Bois de chauffage.</li> <li>-Roipeaux de bois.</li> <li>-Granulés de bois.</li> <li>-Charbon de bois.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Renouvelable, facilement accessible, pas cher, le plus éco-énergétique.</li> <li>-Plus pratique à transporter, à manipuler et à entreposer que le bois de chauffage ; émissions de SO<sub>2</sub> et de NO<sub>x</sub> inférieures à celles du charbon lors de la combustion.</li> <li>-Pratique pour le transport, la manutention et le stockage ; faibles émissions de SO<sub>2</sub> et de NO<sub>x</sub> ; convient à une combustion précise.</li> </ul>
Liquides	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Maïs/éthanol-sucre.</li> <li>-Éthanol cellulosique.</li> <li>-Biodiesel.</li> <li>-Bio-huile de pyrolyse.</li> <li>-Carburants gratuits.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Substitut renouvelable de l'essence ; faibles émissions de combustion ; systèmes de production de matières premières existants.</li> <li>-Une alternative à l'essence issue de la biomasse non alimentaire.</li> <li>-Substitut renouvelable au diesel-essence ; systèmes de production de matières premières existants.</li> <li>-Matières premières renouvelables ; technologie de conversion simple.</li> <li>-Matière première renouvelable ; succédané d'essence ; compatible avec les systèmes de carburant existants.</li> </ul>
Gazeux	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Biogaz.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-À partir de déchets organiques et de résidus, grandes Sources de matières premières ; convient au réseau de gaz naturel existant.</li> <li>-Technologie de production mature ; comme matière</li> </ul>

	-Gaz de synthèse.	Première pour les produits chimiques industriels.
--	-------------------	---

Tableau I.5 : Inconvénients des biocarburants (Guo et Buhain., 2015).

Biocarburants		Inconvénients
Solide	-Bois de chauffage.	-Encombrant, faible densité d'énergie ; émissions dangereuses élevées dues à une combustion incomplète ; inadapté pour brûleurs automatisés.
	-Ropeaux de bois.	-Entraîne des coûts de déchetage ; tend à se désintégrer pendant le stockage ; plus volumineux et d'une densité énergétique inférieure à celle du charbon ; scories de cendres et encrassement des chaudières ; ne convient pas à une combustion précise.
	-Granulés de bois.	-Coût de traitement plus élevé ; teneur en énergie inférieure à celle du charbon ; utilisation uniquement dans les brûleurs à combustible solide.
	-Charbon de bois	-Coût de production élevé ; vrac, peu pratique pour le transport ; ne peut pas être utilisé dans le carburant liquide et le gaz brûleurs.
Liquides	-Maïs/éthanol-sucre.	-Faible efficacité énergétique nette ; corrosif pour les dispositifs de carburant à essence existants ; en concurrence avec les aliments et aliments pour matières premières.
	-Éthanol cellulosique.	-Faible efficacité énergétique nette ; pas rentable.
	-Biodiesel.	-Fait concurrence à la production alimentaire ; la matière première est limitée aux lipides ; corrosive aux dispositifs de carburant diesel existants ; coût de transformation important
	-Bio-huile de pyrolyse.	-Une mise à niveau est nécessaire avant l'utilisation des combustibles ; techniques de mise à niveau immatures.
	-Carburants gratuits	-Une mise à niveau est nécessaire avant l'utilisation des combustibles ; techniques de mise à niveau immatures.
Gazeux	-Biogaz.	-Habituellement dans les zones rurales ; nécessite une collecte intensive des matières premières et l'élimination des déchets.
	-Gaz de synthèse.	-Char et bio-huile en tant que sous-produits ; exigences strictes pour les matières premières.

### I.6. Microorganismes impliqués dans la production des biocarburants

Les micro-organismes sont aussi impliqués dans la production des biocarburants, il s’agit de des bactéries, des levures et des champignons filamenteux (Hamlou, 2021).

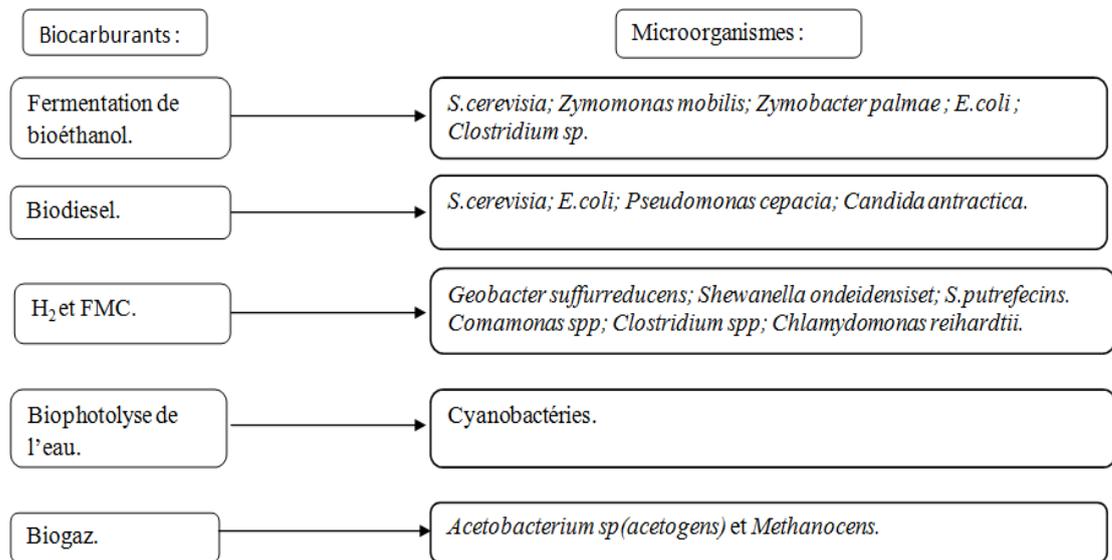


Figure I.2 : Principaux microorganismes impliqués dans la production de biocarburants.

### I.7. Principaux producteurs mondiale de biocarburant

La figure I. 3 montre l’évolution de la production mondiale des biocarburants avec le temps, une production maximale a été noté en 2019 avec 1,79 millions de barils /jour.

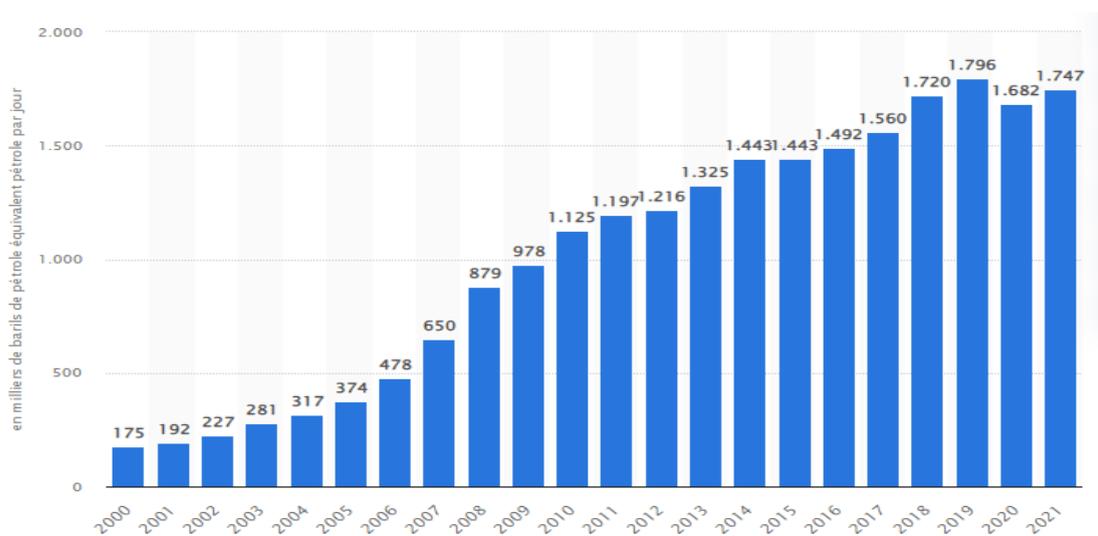
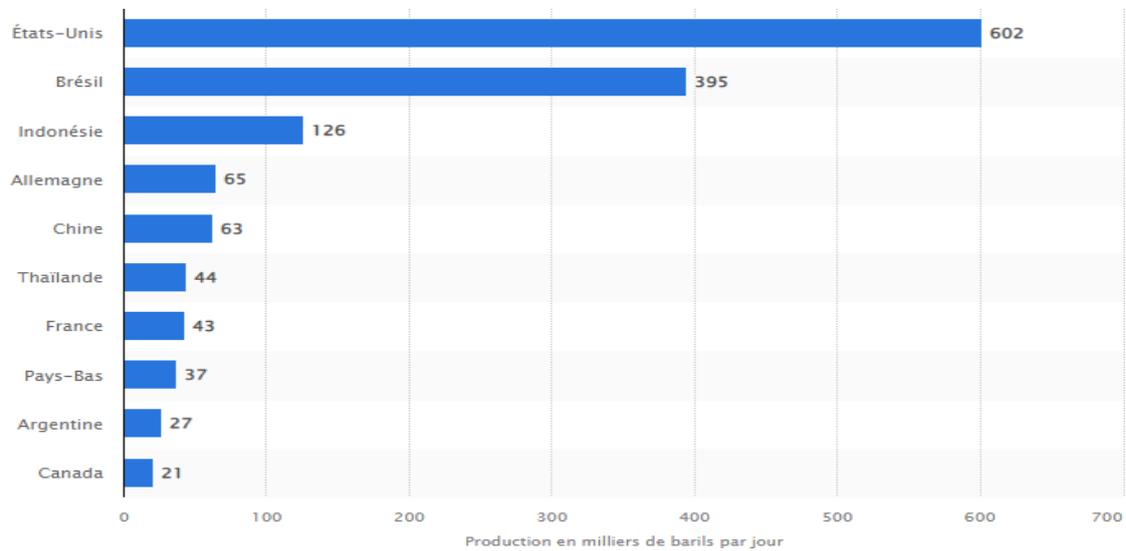


Figure I. 3 : Évolution de la production mondiale de biocarburants (Payer Muñoz,2023).

Les dix pays les plus producteurs sont les Etats Unis en premier rang, suivi par le Brésil, ensuite l'Indonésie, l'Allemagne, la Chine, la Thaïlande, la France, les pays bas, l'Argentine et le Canada. Les taux de production sont illustrés dans la figure I.4.



**Figure I.4 :** Production mondiale des biocarburants par pays (Payer Muñoz,2023).

**Chapitre II**  
**Biodiesel et technologie de**  
**production**

La demande mondiale d'énergie, les prix du pétrole et les préoccupations environnementales concernant la pollution continuent d'augmenter. La solution la plus pratique à ces problèmes est d'utiliser des alternatifs (Atadashi, 2015). Le biodiesel défini comme les esters mono-alkyliques d'huiles végétales ou de graisses animales, obtenus en transestérifiant une huile ou une graisse avec un alcool ; l'utilisation de ce carburant est un virage vers une « énergie durable » (Knothe, 2010).

La méthode la plus fréquente de production de biodiesel est la transestérification, la réaction de triglycérides (issus d'huiles végétales et de graisses animales) avec des alcools à chaîne courte en présence de catalyseurs acides, basiques ou enzymatiques. En tant que produit de la réaction des esters alkylés d'acides gras (biodiesel), la glycérine et le savon sont formés comme sous-produits. D'autres techniques de production de biodiesel moins largement utilisées sont : la dilution, la microémulsion et la pyrolyse (Berrios et al., 2008). La production de biodiesel augmente pour réduire la dépendance vis-à-vis du biodiesel importé (Al-zuhair, 2007).

### **II.1. Historique de biodiesel**

L'histoire du biodiesel est plus politique et économique que technologique. La production de biodiesel à partir d'huiles végétales n'est pas un nouveau procédé. La conversion d'huiles végétales ou de graisses animales en des esters monoalkyliques ou biodiesel est connue comme Trans-estérification. Duffy et Patrick ont mené la transestérification dès 1853 (Ali et al., 2013). La vie pour le moteur diesel a commencé en 1893, lorsque Docteur Rudolph Diesel a publié un document intitulé « La théorie et la construction d'un moteur thermique rationnel », il a conçu le moteur diesel à l'origine pour fonctionner à l'huile végétale et il voulait construire un moteur à taux de compression le plus élevé possible. Le Diesel a reçu un brevet en 1893 et a démontré un moteur réalisable en 1897. Dr. Diesel a utilisé l'huile d'arachide pour alimenter un de ses moteurs à l'Exposition universelle de Paris de 1900 (Junker et Liousse, 2008).

Une des premières utilisations de l'huile végétale transestérifiée a alimenté les véhicules lourds en Afrique du Sud avant la Seconde Guerre mondiale. Les huiles végétales ont été utilisées dans les moteurs diesel jusqu'aux années 1920. Durant les années 1920, les fabricants de moteurs diesel ont modifié leurs moteurs à utiliser la plus faible viscosité du pétrole diesel, plutôt que de l'huile végétale (Demirbaş, 2002).

## II.2. Définition de biodiesel

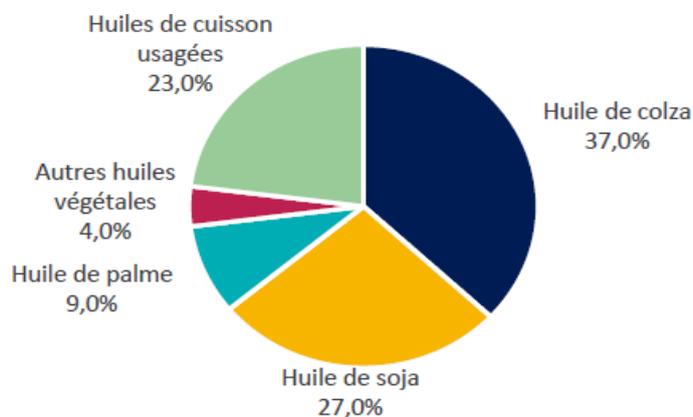
Le Biodiesel (Grec, bio= vie + diesel de Rudolf Diesel) se réfère un diesel équivalent, c'est un liquide jaunâtre dérivée d'une huile végétale ou de graisse animale avec du méthanol ou de l'éthanol en présence d'un catalyseur pour donner les esters méthyliques ou éthyliques (biodiesel) et de la glycérine (Guo et Buhain, 2015).

En général, le biodiesel peut être défini comme un carburant propre et renouvelable qui a récemment été considéré comme un meilleur candidat pour remplacer le diesel car il peut être utilisé dans n'importe quel moteur à allumage par compression sans modification. Peut être utilisé avec du diesel conventionnel pour réduire la quantité de polluants et de gaz nocifs pour l'environnement produits par l'essence, le diesel et d'autres carburants (Pandit et al., 2023).

## II.3. Matières premières de biodiesel

Dans le monde, plus de 350 cultures oléagineuses ont été identifiées comme sources possibles de biodiesel. Le large éventail de matières premières disponibles est l'une des caractéristiques les plus importantes de la production de biodiesel. Les matières premières doivent autant que possible répondre à deux caractéristiques principales : un faible coût de production, une grande échelle de production, Le climat régional, la situation géographique, les caractéristiques locales du sol et les méthodes agricoles affecteront tous la disponibilité des matières premières pour la production de biodiesel (Al-Zuhair, 2007).

En général, les sources d'huiles comestibles, les sources d'huiles non comestibles, les huiles comestibles usagées et les graisses animales, et les algues sont les quatre principales catégories de matières premières du biodiesel (Moser, 2009).



**Figure II.1 :** Matières premières utilisées pour la production de biodiesel (OCDE-FAO,2020-2029).

**II.4. Types de biodiesel**

Le biodiesel est généralement divisé en première génération, deuxième génération et troisième génération, qui sont principalement basées sur l'origine de la matière première, tandis que la quatrième génération est issue des personnes, des outils biologiques et de la recherche fondamentale (Singh et al, 2020).

**II.4.1. Premier type de biodiesel**

Le biodiesel de premier génération est produit à partir de matières premières comestibles, le tableau suivant montre quelque exemple de ces dernières (Benti et al., 2022) :

 <p>Huile de colza.</p>	 <p>Huile de soja.</p>	 <p>Huile de coco.</p>	 <p>Huile de riz.</p>
 <p>Huile de maïs.</p>	 <p>Huile de palme.</p>	 <p>Huile de moutarde.</p>	 <p>Huile d'olive.</p>

**Figure II.2 :** Matières premières de premier type de biodiesel.

**II.4.2. Deuxième type de biodiesel**

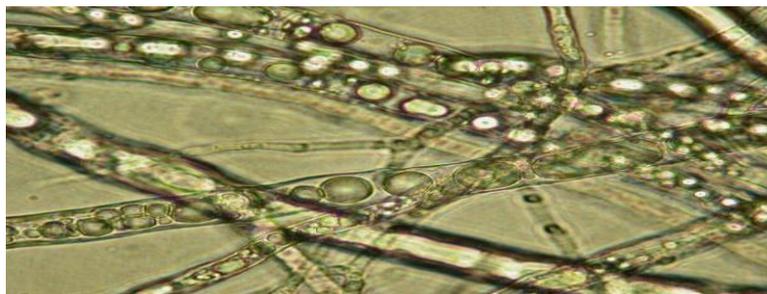
Le biodiesel de deuxième génération est produit à partir de matières premières non comestibles telles que celles présentés ci-dessous (Galafassi, 2012) :

 <p>Huile de neem.</p>	 <p>Huile de jatropha.</p>	 <p>Huile de Nag champa.</p>
 <p>Huile de karanja. (<i>Millettia pinnata.</i>)</p>	 <p>Huile Takamaka. (<i>Calophyllum inophyllum.</i>)</p>	 <p>Huile de graines de caoutchouc.</p>

**Figure II.3 :** Matières premières de deuxième type de biodiesel.

#### II.4.3. Troisième type de biodiesel

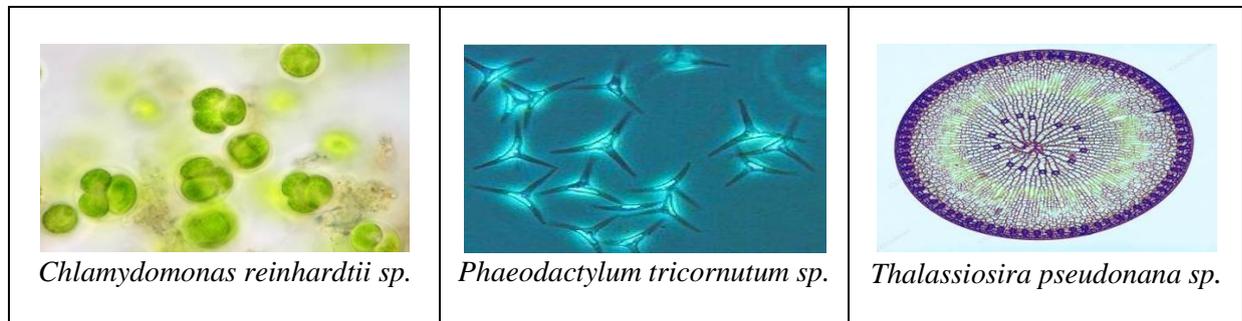
Le biodiesel produit à partir des huiles usagées et des micro-organismes tels que les bactéries, les micro-algues, les champignons et les levures est appelé de troisième génération. La première huile d'un micro-organisme est issue de champignon *Mucor circinelloides* (Williams et Laurens, 2010).



**Figure II.4 :** *Mucor circinelloides.*

#### II.4.4. Quatrième type de biodiesel

Les matières premières de la quatrième génération pour la production de biodiesel sont des micro-algues génétiquement modifiées, quelques exemples sont présentés dans la figure II.5 (Pandit et al., 2023).



**Figure II.5 :** Micro-algues génétiquement modifiées utilisées dans la production de quatrième type de biodiesel.

Ces microbes ont subi des modifications génétiques pour stimuler la photosynthèse, accélérer leur développement et améliorer leur capacité à s'épanouir dans des environnements peu nutritifs, produire plus de biocarburants et créer un puits de carbone artificiel (Pandit et al., 2023).

#### II.5. Avantages et inconvénients des matières premières

Les matières premières des trois premiers types de biodiesel présentent leurs propres avantages et inconvénients, dont quelques-uns sont énumérés dans le tableau suivant (Firoz, 2017) :

**Tableau II.1 :** Avantages et inconvénients de trois générations de matières premières (Gebremariam et Marchetti, 2017).

Type de Biodiesel	Source	Avantages	Inconvénients
Premier	Huile comestible.	-Salubrité de l'environnement. -Facile à manipuler. -Durable.	-Aliments et aliments du bétail. -Manque de terres agricoles pour un rendement élevé des matières premières et le biodiesel .
Deuxième	Huile non comestible.	-Durable. -Facile à manipuler. -Économiquement plus viable. -Duel sans nourriture contre carburant. -Favorise le recyclage.	-Un processus de purification est nécessaire, souvent complexe.
Troisième	Levure, algues, microbienne biomasse.	-Durable. -Rendement élevé du biodiesel. -Facilement disponible. -Économiquement viable, s'il est utilisé à son plein potentiel. - Ne mène pas à la concurrence entre aliments et aliments pour animaux.	-N'a pas été appliqué dans les configurations commerciales. -Manque de connaissances statistiques sur la mise à l'échelle.

## II.6. Caractéristiques de biodiesel

Les différentes sources de biodiesel sont produites en faisant varier les qualités et les propriétés physicochimique (Maheswari et al., 2022). Ces propriétés physiques et chimiques variaient en fonctionde la composition en acides gras. Certaines de ces caractéristiques sont :

- **Viscosité**

La viscosité diminue avec l'augmentation de l'insaturation et augmente avec l'augmentation du nombre de carbone, tout comme l'indice de cétane. Une viscosité cinématique plus élevée crée des problèmes tels que des dépôts dans le moteur. La Trans-estérification est donc bénéfique pour abaisser la viscosité de l'huile, typiquement à des valeurs de 4-6 mm<sup>2</sup>/s (Tyson et al., 2006).

- **Densité de carburant et densité relative**

La densité est une caractéristique importante pour les matières premières liquides à valeur ajoutée utilisées comme source de production de biocarburants. La densité du biodiesel mesurée à la température de référence de 15 ou 20 C° et la densité relative du biodiesel est une mesure de l'homogénéité dans les réservoirs de biodiesel (Khiari et al., 2016).

- **Pouvoir calorifique**

Le pouvoir calorifique désigne si le biodiesel convient à la combustion dans un moteur diesel. Le pouvoir calorifique augmente avec la longueur de la chaîne carbonée. A partir de lipides extraits de micro-algues hétérotrophes en présence de Sulfate d'hydrogène (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) dans du méthanol, un biodiesel au pouvoir calorifique de 41 MJ/kg a été obtenu, ce qui se situe dans la gamme du carburant diesel (Miao et Wu, 2006).

- **Point trouble et point d'écoulement**

Le biodiesel commence à geler à une basse température, lorsqu'il est refroidi sans agitation dans des conditions standard. Le rôle de point d'écoulement est d'indiquer cette température (MbuyiKatshiatshia et al., 2018). La température du point de trouble diminue avec l'augmentation de la fraction molaire des composés insaturés et augmente légèrement avec l'augmentation de la longueur de la chaîne carbonée (Alloune et al., 2012).

Généralement, le point de trouble et le point d'écoulement augmentent avec le rapport volumique du biodiesel dans le carburant diesel à base de pétrole (Tyson et al., 2006).

- **Point d'éclair**

Le point d'éclair est la température la plus basse à laquelle l'application d'une flamme provoque l'inflammation d'une partie de vapeur dans des conditions spécifiques de test (MbuyiKatshiatshia et al., 2018).

- **Indice de cétane**

L'indice de cétane permet d'apprécier l'aptitude à l'auto-inflammation d'un carburant diesel sur une échelle de 0 à 100. Il mesure l'aptitude à l'allumage d'un carburant sous l'effet de la pression. Habituellement, les huiles végétales présentent de faibles valeurs d'indice de cétane par rapport au diesel. En effet, plus la valeur de l'indice de cétane n'est élevée; de plus le temps d'auto-inflammation du carburant est court. Dans cette condition, la combustion est facilement atteinte avec un pourcentage élevé de matières brûlées (hydrocarbures, monoxyde de carbone, etc.) (MbuyiKatshiatshia et al., 2018).

- **Indice d'acide**

Est le milligramme d'hydroxyde de sodium (NaOH) nécessaire pour neutraliser les acides libres de 1 g de matière grasse. C'est l'un des meilleurs moyens de déterminer le degré d'altération par hydrolyse (Alloune et al., 2012).

- **Indice d'iode**

L'indice d'iode est une mesure importante qui permet de déterminer le degré d'insaturation du carburant est le nombre de gramme d'iode fixés par 100 g de corps gras. Cet indice nous renseigne sur le degré d'insaturation globale des chaînes grasses analysé, plus une huile est insaturée, plus l'indice d'iode est élevé (Alloune et al., 2012).

- **Pouvoir lubrifiant**

La définition de la lubricité du diesel est influencée par ces caractéristiques, dont les composés soufrés, la viscosité, la teneur en eau et l'acidité. Même avec des additifs, le biodiesel (0,114 et 0,117) a une friction mesurée plus faible que le diesel (0,238 et 0,210) à 25 et 60°C. Par conséquent, l'un des avantages de l'ajout de biodiesel à faible teneur en soufre au diesel pétrolier conventionnel est d'améliorer son pouvoir lubrifiant (Knothe, 2010).

- **Teneur en eau**

Le carburant infecté par l'eau peut réagir avec les triglycérides pour former du savon ou de la glycérine. Il peut aussi causer la rouille du moteur (Maheswari et al., 2022).

- **Teneur en alcool**

La présence d'alcool dans le biodiesel abaisse son point d'auto-inflammation, possiblement en dessous du seuil recommandé par la norme (Maheswari et al., 2022).

## II.7. Utilisation de biodiesel

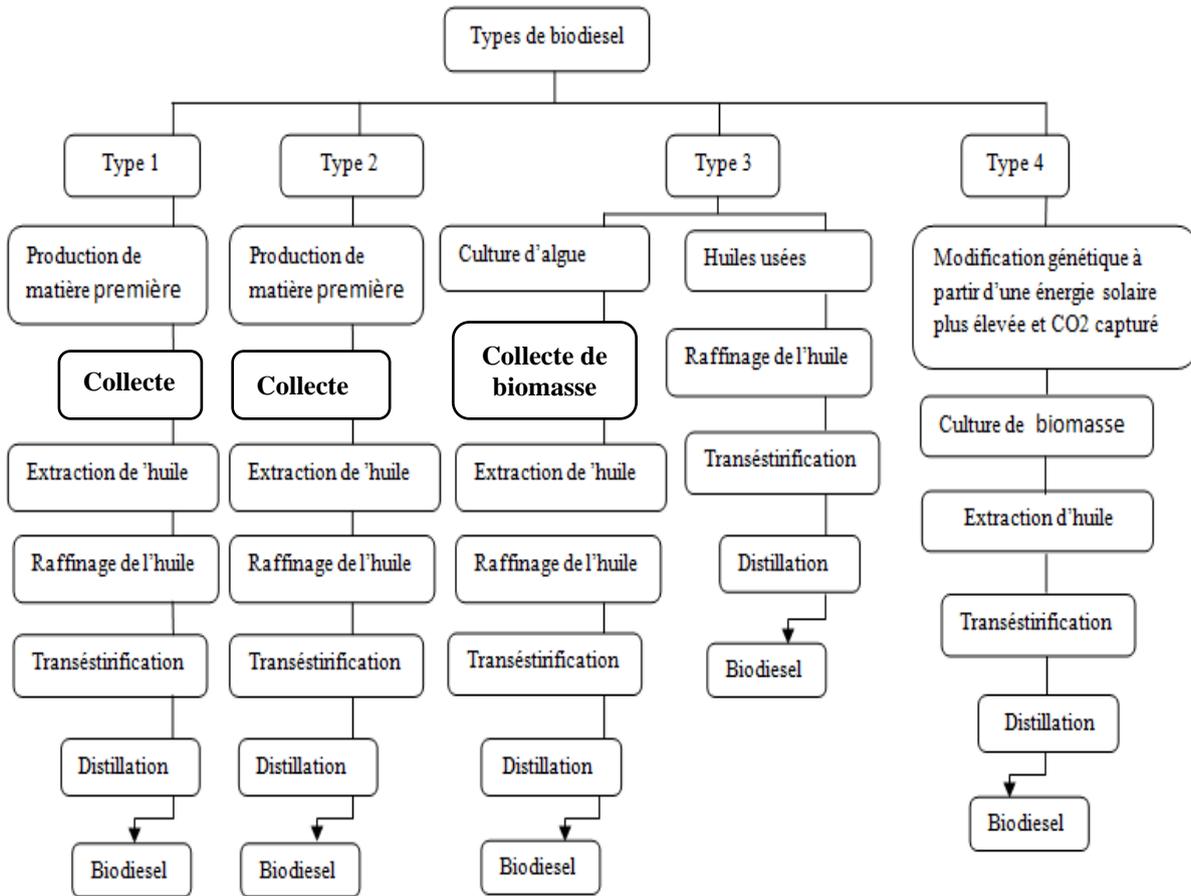
Le biodiesel pur peut être utilisé comme carburant pour les moteurs automobiles. Il est couramment utilisé comme additif diesel pour réduire les hydrocarbures, le monoxyde de carbone et les particules dans les véhicules à moteur diesel (Nabgan et al., 2022). Comme montre la figure II.6, le biodiesel a été utilisé dans une grande variété d'applications :



**Figure II.6 :** Utilisations du biodiesel dans différents secteurs (Nabgan et al., 2022).

## II.8. Procédés d'extraction et de production de biodiesel

Les procédés de production de biodiesel diffèrent selon la matière première utilisée, par conséquent, plusieurs étapes sont utilisées. La figure II.7 montre ces procédés :



**Figure II.7 :** Procédés de production utilisés pour les différents types de biodiesel (Singh et al., 2020).

**II.8.1. Techniques d'extraction d'huile**

L'huile est extraite des graines à l'aide d'une méthode d'extraction d'huile. Les trois principales techniques d'extraction sont : l'extraction mécanique ; l'extraction par solvant et l'extraction enzymatique. Les deux méthodes d'extraction d'huile commerciale les plus courantes sont le pressage mécanique et l'extraction par solvant (Yaashikaa et al., 2022).

**II.8.1.1. Extraction mécanique**

Parmi les différentes méthodes, les presses mécaniques, les presses à piston manuelles ou les presses à vis motorisées sont les plus couramment utilisées. Les presses à vis électriques peuvent extraire 68 à 80 % de l'huile utilisable, tandis que les presses à huile à piston ne peuvent extraire que 60 à 65 %. Cette plus grande gamme est due au fait que les graines peuvent être pressées pour diverses extractions. L'huile de la presse mécanique doit être filtrée et dégommée. Un autre problème avec cette méthode d'extraction est que sa conception est optimisée pour une

graine spécifique, donc si elle est utilisée sur d'autres graines, le rendement sera plus faible. Il a été démontré que la cuisson augmente le rendement en huile des presses à vis jusqu'à 89 % après un seul passage et jusqu'à 91 % après un double passage (Atabani et al., 2013).

### **II.8.1.2. Extraction par solvant (Extraction chimique)**

Le processus d'utilisation d'un solvant liquide pour extraire un seul composant d'un solide est appelé extraction par solvant. Le rendement d'extraction est affecté par plusieurs facteurs, notamment la taille des particules, le type de liquide, la température et l'agitation du solvant.

L'utilisation de particules minuscules est avantageuse car une plus grande surface d'interface est nécessaire entre le solide et le liquide. Le liquide doit être un bon solvant sélectif à faible viscosité, ce qui le rend facile à déplacer. La température affecte également les taux d'extraction. La solubilité d'une substance augmente avec l'augmentation de la température. L'agitation du solvant a également un effet, car elle augmente l'étalement turbulent et donc l'élimination de matière de la surface des particules. Seule la production à grande échelle de biodiesel de plus de 50 tonnes par jour peut être rentable avec cette méthode (Zulqarnain, 2021).

### **II.8.1.3. Extraction enzymatique**

Dans cette technique, l'huile est extraite des graines broyées à l'aide d'enzymes appropriées. Son principal avantage est qu'il est non toxique pour l'environnement et ne produit pas de composés organiques volatils (Benti et al., 2022).

## **II.8.2. Technologies de production de biodiésel**

La production de biodiesel ; les huiles provenant de matières premières végétales, les micro-algues, les graisses animales et les huiles usagées sont utilisées. Le rendement en biodiesel des oléagineux dépend principalement de l'espèce. Le rendement du biodiesel produit à partir des huiles de la troisième génération est inférieur à celui des huiles de la première et de la deuxième génération. La production de biodiesel comporte deux étapes principales. Le premier est la production d'huile à partir de graines ou de biomasse d'algues, que la conversion

d'huile en biodiesel en utilisant différentes techniques majeures comme la pyrolyse, la microémulsification, dilution, transestérification (Singh et al., 2020).

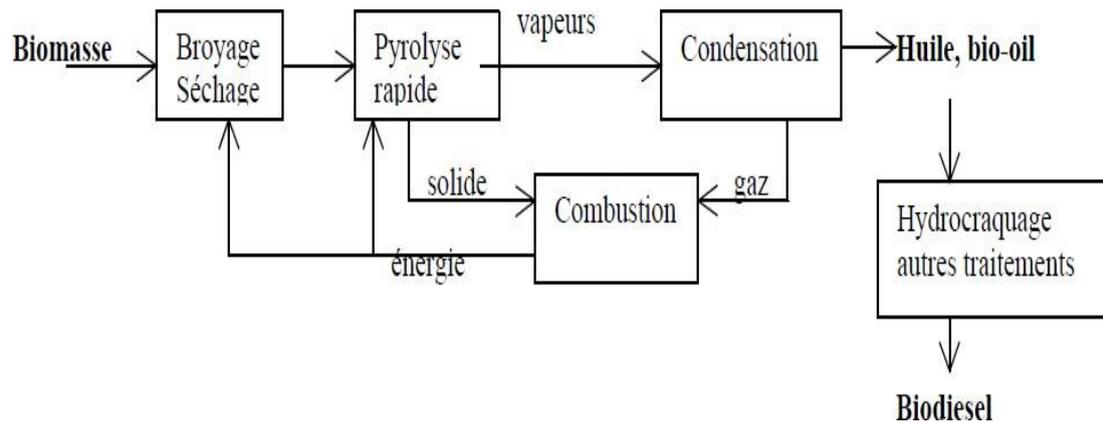
De nombreuses initiatives sont en cours dans le monde pour développer et améliorer la qualité des huiles végétales afin qu'elles puissent se rapprocher des propriétés des carburants diesel. Le principal problème qui empêche l'utilisation directe d'huiles végétales dans les moteurs diesel conventionnels est la viscosité. Ces problèmes peuvent être résolus par quatre techniques; pyrolyse, dilution par mélange d'hydrocarbures, microémulsion et transestérification. Le processus de transestérification est l'un des plus économiques avec un rendement élevé en biodiesel, donc c'est la plus adaptative méthode de production commerciale de biodiesel (Benti et al., 2022).

### **II.8.2.1. Pyrolyse**

La pyrolyse est une méthode utilisée pour la production de biodiesel. Dans cette méthode, la décomposition thermique du matériau se produit à haute température en l'absence d'air ou dans une atmosphère inerte. Ce processus est affecté par la variation de la composition chimique du matériau. Lorsque le pétrole est utilisé comme matière première pendant le chauffage, il se cassera et caractéristiques de sa partie liquide est comme le carburant diesel (Lédé, 2010).

Les caractéristiques du carburant obtenu par pyrolyse ont une valeur calorifique similaire à celle du carburant diesel ; le point d'écoulement, la viscosité et le point d'éclair sont inférieurs à ceux du diesel. Le nombre de cétanes est inférieur à celui du diesel de biodiesel produit par pyrolyse. Produit par ce procédé a une quantité suffisante d'eau et de soufre, mais il a en quantité suffisante de carbone résiduel et de cendres (Lédé, 2010).

Le coût d'installation élevé est le principal inconvénient de ce processus. Basé sur les paramètres de fonctionnement méthode de pyrolyse est de classer en trois sous-catégories : pyrolyse éclair, la pyrolyse classique et pyrolyse rapide. (Nema et Ganeshprasad, 2002).



**Figure II.8 :** Schéma réactionnel de production de biodiesel par voie thermo-chimique (pyrolyse) (Vincent, 2006).

### II.8.2.2. Microémulsification

La question de la viscosité de l'huile végétale peut être éliminée par la fabrication de micro émulsion. C'est le mélange stable, transparent et isotrope d'eau, d'huile et de surfactant. C'est la dispersion colloïdale qui est thermodynamiquement stable. La gamme de diamètre des gouttelettes varie de 100 à 1000 Å.

Pour la préparation de microémulsion d'huiles ; Cosolvant, alcool, Cétane améliorant et surfactant sont ajoutés. La viscosité maximale requise pour le carburant peut être satisfaite en réalisant une microémulsion avec du butanol, de l'hexanol et de l'octanol. Le processus de microémulsion est facile. Moins la volatilité, la stabilité et la viscosité élevée sont quelques-uns des problèmes de microémulsification (Murray et al., 2019).

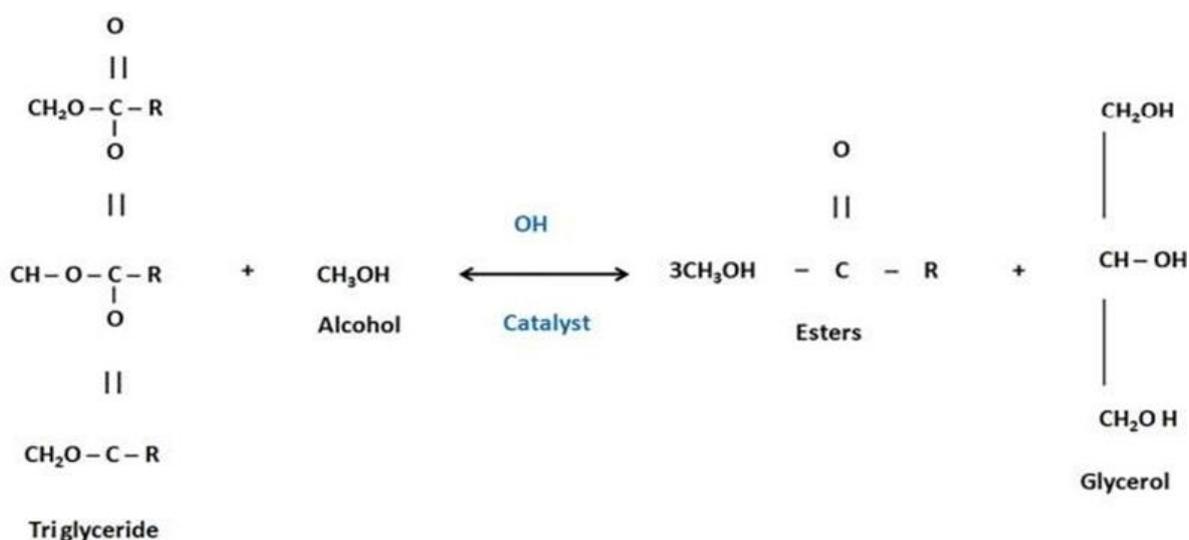
### II.8.2.3. Dilution

La dilution est la méthode de réduction de la quantité de soluté dans une solution en augmentant la quantité de solvant. L'éthanol et le diesel peuvent être utilisés comme solvants pour diluer l'huile. Le résultat de ce processus est une réduction de la densité et de la viscosité de l'huile. Si 4% de solvant (de l'éthanol au diesel) est ajouté à l'huile au lieu de la force de freinage, l'efficacité thermique de freinage et le couple de freinage augmenteront, et la consommation de carburant spécifique au freinage diminuera.

Le diesel a un point d'ébullition plus élevé que l'éthanol, c'est pourquoi l'éthanol facilite le processus de combustion par rapport au mélange non brûlé. Le processus de dilution est simple, mais il y a quelques problèmes, tels que des dépôts de carbone dans le cylindre du moteur et une combustion incomplète (Daud et al., 2015).

### II.8.2.4 Transestérification

La Transestérification (également appelée alcoolisation) est la réaction chimique bien établie des huiles végétales et des graisses animales avec des alcools pour former des esters alkylés d'acides gras et du glycérol. Les huiles végétales pures et les graisses animales ne peuvent pas être directement utilisées dans les moteurs diesel en raison de leur viscosité élevée et de leur faible volatilité, et l'objectif principal de la transestérification est de surmonter ces problèmes. Un rapport alcool/huile (stœchiométrique) est nécessaire pour achever la réaction ; cependant, comme la réaction est réversible, l'excès d'alcool sert en fait à déplacer l'équilibre vers le côté produit et à augmenter le rendement du produit. La figure suivante montre la réaction de Trans-estérification pour la production de biodiesel (Gebremariam et Marchetti., 2017).



**Figure II.9 :** Réaction de transestérification pour la production de biodiesel (Benti et al., 2022).

- **Alcool**

En ce qui concerne l'utilisation d'alcool pour la production de biodiesel, divers types d'alcools peuvent être utilisés, notamment le méthanol, l'éthanol, le propanol et le butanol. Le rendement d'estérification ne dépend pas du type d'alcool utilisé. Il est sélectionné en fonction de la question du coût et de l'efficacité. À cet égard, le méthanol est largement utilisé en raison de son prix abordable (Riyadi et al., 2023).

- **Catalyseur**

Les catalyseurs sont des substances (chimiques ou biologiques) qui aident à accélérer les réactions chimiques sans être consommées dans le processus. Les catalyseurs pour la synthèse du biodiesel se répartissent en trois catégories : les alcalis, les acides et les enzymes. Les catalyseurs alcalins et acides sont divisés en deux groupes : les catalyseurs homogènes et les catalyseurs hétérogènes, et ils sont plus fréquemment utilisés dans la génération de biodiesel que les catalyseurs enzymatiques (Amini et al., 2017).

## **II.9. Paramètres importants de la réaction de Trans-estérification des huiles**

Le rendement en biodiesel est affecté par certains paramètres clés de la réaction de Trans-estérification. Pour une efficacité de conversion maximale, ces variables doivent être optimisées. La variable la plus importante dans la réaction de transestérification est (Ballerini et al., 2006).

- **Teneur en eau**

La quantité d'eau présente dans la matière première va accélérer la réaction d'hydrolyse tout en réduisant la formation d'esters. La teneur en eau doit être inférieure à 0,5 % pour atteindre un rendement de biodiesel de 90 %, ce qui est essentiel pour les réactions catalysées par les acides et les bases (Maheswari et al., 2022).

- **Type d'alcools**

Le méthanol est principalement utilisé pour le biodiesel en raison de son extraction directe du produit fini (John et al., 2021).

- **Rapport alcool/huile**

3 mol d'alcool et 1 mol de triglycéride sont essentiels pour former une mole d'ester alkylrique (Işık, 2021). Le taux de formation du produit augmente avec la concentration d'alcool (Maheswari et al., 2022).

- **Type et concentration de catalyseur**

En l'absence de catalyseurs, des conditions de température élevées sont nécessaires pour convertir l'huile ou la graisse en biocarburants (Maheswari et al., 2022). Le rendement du produit augmente avec la concentration du catalyseur ; cela est dû à l'augmentation de la vitesse de réaction. La conversion diminue avec un excès de catalyseur, ce qui entraîne une viscosité plus élevée du mélange réactionnel (Tang et al., 2012).

- **Vitesse de l'agitateur**

Pour compléter la réaction de Trans-estérification et améliorer la production du Ester Méthylique d'Acide Gras (EMAG) , le mélange des réactifs est d'une grande importance (Chakraborty et al., 2011). L'agitation augmente les collisions entre les particules et provoque la diffusion des particules dans le mélange catalytique. On augmentant la vitesse d'agitation, le temps de réaction est réduit et la conversion est augmentée (Boulal et al., 2016).

- **Température de réaction**

La vitesse de réaction et le rendement du produit augmentent avec l'augmentation de la température. Si la température de réaction est inférieure à 50°C, la viscosité du biodiesel augmentera (Maheswari et al., 2022).

- **Temps de réaction**

Pour des temps de réaction plus longs, même des conversions de 99 % peuvent être atteintes. La conversion est affectée par la disponibilité des réactifs dans le mélange réactionnel. Si les paramètres de réaction ne correspondent pas exactement, une réaction inverse peut se produire, réduisant la conversion (Silitonga et al., 2017).

## **II.10. Séparation et purification de biodiesel**

La première étape habituellement employée pour récupérer le biodiesel après la réaction de Trans-estérification est la séparation du biodiesel brut du sous-produit, le glycérol. La séparation rapide du biodiesel et du glycérol est due à des différences de polarité et de densité. La densité du biodiesel et du glycérol est de 0,88 g/cc et de 1,05 g/cc ou plus respectivement. La densité du glycérol dépend de la quantité d'eau, de catalyseur et de méthanol qu'il contient. Cette différence de densité est suffisante pour utiliser une technique de séparation par gravité simple pour séparer la phase biodiesel de la phase glycérol. Cependant, le processus de séparation entre le biodiesel et le glycérol peut être difficile en présence de savons qui se solidifient et forment une substance semi-solide (Bateni et al., 2017).

La séparation qui se fait par décantation est rentable. Cependant, le processus exige une longue période de temps allant de 1 à 8 h pour obtenir une bonne séparation. Par conséquent, pour accélérer le processus de séparation des produits, la technique de centrifugation est principalement employée. Récemment, des membranes sont appliquées pour séparer et purifier le biodiesel brut. Le procédé semble prometteur pour fournir du biodiesel de haute qualité, en plus d'être écoénergétique (Atadashi et al., 2011).

Ils peuvent généralement être divisés en procédés de lavage par voie humide et sèche. Les deux méthodes sont généralement acceptées et appliquées à l'échelle commerciale (Batani et al., 2017).

### **II.10.1. Séparation et purification par lavage humide**

C'est la méthode la plus courante pour purifier le biodiesel. Il s'agit d'ajouter une certaine quantité d'eau au biodiesel brut et de le secouer doucement pour éviter la formation d'une émulsion. Ce processus a été répété jusqu'à ce qu'une eau de lavage incolore soit obtenue, indiquant une élimination complète des impuretés. Les processus de nettoyage par voie humide nécessitent généralement de grandes quantités d'eau, environ 28 % de solution de lavage à l'eau (par volume d'huile) et 1 gramme d'acide tannique par litre d'eau. De grands volumes d'eau créent de grands volumes d'eaux usées et entraînent des coûts énergétiques élevés. Le nettoyage humide consiste principalement à laver avec de l'eau ionisée, de l'acide (5% d'acide phosphorique), de l'eau et des solvants organiques et de l'eau (Atadashi et al., 2011).

### **II.10.2. Séparation et purification par lavage à sec**

Couramment utilisée pour purifier le biodiesel brut, elle est généralement réalisée grâce à l'utilisation de silicates (magnésium ou trisyle), les résines échangeuses d'ions (amberlite ou purolite), cellulosique, argile activée, carbone activé, fibres activées, etc. Ces adsorbants se composent de sites d'adsorption (liaison) acides et basiques et ont une forte affinité pour les composés polaires tels que le méthanol, la glycérine, les glycérides, les métaux et le savon. Le lavage à sec est habituellement effectué à une température de 65 °C et le processus se termine en 20 à 30 minutes, la quantité de glycérides et de glycérol total dans le biodiesel brut est abaissée à un niveau raisonnable. La procédure de lavage à sec est sans eau, améliore la qualité du carburant et réduit le temps de lavage (Atadashi et al., 2011).

**II.10.3. Séparation et purification de biodiesel par la technologie membranaire**

Par conséquent, les problèmes associés aux deux méthodes conventionnelles de purification du biodiesel ont conduit à l'exploration et au développement de la technologie membranaire pour séparer le biodiesel des impuretés, qui présente plusieurs avantages par rapport aux autres technologies, telles que la minimisation des coûts d'investissement (Saleh, 2011). Les dispositifs membranaires pour le raffinage du biodiesel sont généralement constitués de membranes céramiques microporeuses inorganiques, qui ont généralement de nombreuses applications en biotechnologie. Ces membranes sont prometteuses pour une utilisation dans les biocarburants. Voici quelques-uns des équipements les plus efficaces utilisés pour séparer et purifier le biodiesel brut : Réacteurs à membrane et séparateurs à membrane en céramique (Atadashi et al., 2011).

- **Réacteurs à membrane**

Un réacteur à membrane ou réacteur à membrane est un dispositif physique qui combine un processus de conversion chimique avec un processus de séparation membranaire pour ajouter des réactifs ou éliminer les produits de réaction.

Les réacteurs à membrane ont des propriétés intrinsèques telles qu'un rendement élevé, un fonctionnement simple et flexible, une sélectivité et une perméabilité relativement élevées. A fait ses preuves dans de nombreuses applications et opérations, telles que la séparation moléculaire, le fractionnement, la concentration, la purification, la clarification, l'émulsification, la cristallisation, etc (Kolhe et al., 2017).

- **Membrane céramique séparative**

Les membranes céramiques sont des membranes artificielles constituées de matériaux inorganiques non métalliques. Comme toutes les membranes, elle permet à certaines substances de s'arrêter ou de passer sélectivement entre les deux milieux qu'elle sépare.

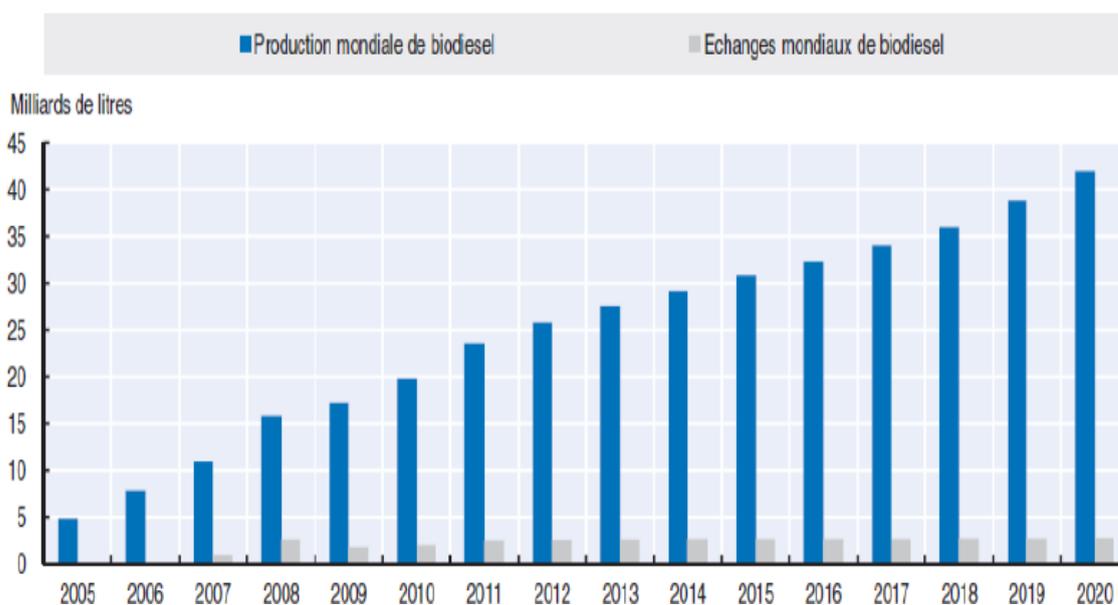
La technologie sépare avec succès l'huile émulsifiée non réfléchissante des produits de transestérification, un facteur clé dans la production de biodiesel. D'autres tentatives ont été faites pour purifier le biodiesel brut sans utiliser de procédé de lavage à l'eau (Atadashi et al., 2011).

## II.11. Marché mondiale de biodiesel

### II.11.1 Production mondiale de biodiesel

La production de biodiesel a considérablement augmenté depuis les années 1990, avec un taux de croissance annuel moyen de 35 % dans l'Union européenne (UE). En effet, depuis 1991, la production de biodiesel est passée de 200 tonnes à 800 000 tonnes. En 2003, 5 000 tonnes d'huile de colza pure ont été utilisées pour plus de 4 000 véhicules agricoles. En Allemagne et en Autriche, le biodiesel est utilisé à l'état pur (B100) et n'est pas mélangé au diesel conventionnel (Khiari, 2016).

La production mondiale de biodiesel atteint 41 milliards de litres en 2022. L'Union européenne reste le premier producteur et utilisateur de biodiesel. L'évolution de marché de biodiesel est affichée dans la figure suivante :



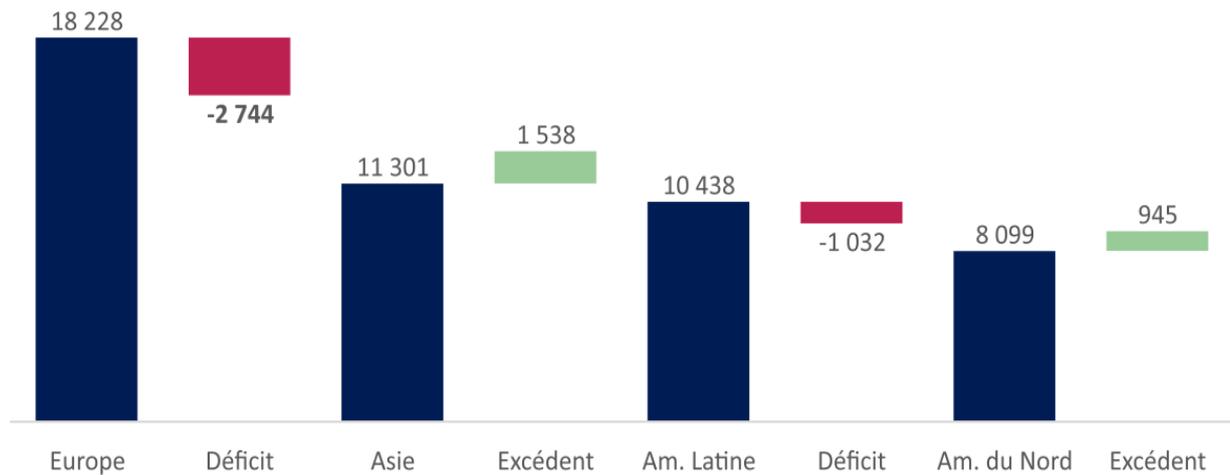
**Figure II.10 :** Évolution de la production mondiale de biodiesel (Payer Muñoz,2023).

Tableau II.2 : Principaux producteurs de biodiesel (Antoine et al., 2021).

Pays/région	Production en 2019 (million de litres)	
Union Européen	14600	Premier producteur mondial de biodiesel, l'Europe était pourtant un importateur net de biodiesel en 2019. La production européenne de biodiesel a augmenté de 36 % entre 2010 et 2019 mais un recul est attendu à l'horizon 2029 en raison de la baisse de la demande en diesel sur le marché européen. la principale matière première du biodiesel est le soja.
Etats-Unis	9031	2 <sup>e</sup> producteur mondial de biodiesel, la matière première utilisée est le soja.
Indonésie	7380	Elle est devenue le troisième producteur mondial de biodiesel. Sa production est principalement basée sur l'huile de palme. Malgré la baisse de la consommation de diesel (-12,5 %) en 2019, la production indonésienne a encore augmenté en 2020. Le pays était l'un des principaux exportateurs mondiaux de biodiesels en 2019. Il exportait l'équivalent de 16 % de sa production nationale en 2019.
Brésil	5800	Le Brésil représentait 12 % de la production mondiale de biodiesel et occupait le 4 <sup>ème</sup> rang mondial en 2019. Sa production s'appuie sur les huiles végétales et plus particulièrement la culture du soja.
Argentine	2500	L'Argentine était le 5 <sup>e</sup> producteur mondial et l'un des principaux exportateurs de biodiesel en 2019. Le pays vendait la moitié de sa production de biodiesel à destination de l'Union Européenne et des États-Unis. L'industrie du biodiesel argentin est basée sur le soja, dont le pays est le troisième producteur et exportateur mondial.

### II.11.2. Consommation mondiale de biodiesel

L'Europe était le plus grand consommateur de biodiesel en 2019. Mais sa consommation a dépassé largement sa production. L'Europe accuse un déficit de 2,7 milliards de litres, soit 15 % de sa consommation totale. C'est le plus grand déficit au monde. L'Asie est le deuxième consommateur mondial avec un excédent de production d'environ 1,5 milliard de litres (Antoine et al., 2021), la figure ci-dessous montre la consommation régionale de ce carburant :



**Figure II.11** : Consommation de biodiesel par région en 2019 et différence avec la production (OCDE-FAO, 2020-2029).

La croissance de la consommation mondiale de biodiesel devrait ralentir considérablement d'ici 2029 par rapport à la décennie précédente. L'Organisation des Nations unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) et l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) prévoient une baisse de la demande mondiale de biodiesel d'ici 2029 (Antoine et al., 2021).

## **Chapitre III**

### **Bioéthanol et technologie de production**

Le bioéthanol produit par fermentation alcoolique est considéré comme biocarburant renouvelable pour remplacer les combustibles fossiles. Actuellement, le bioéthanol est très populaire à travers le monde en raison de son impact positif sur l'environnement. Différents types de biomasse sont utilisés comme matières premières pour la production de bioéthanol, cette biomasse d'abord été cultivée et élevée par l'homme pour son alimentation, mais elle fournit également des matériaux de construction (Xiang et al., 2022).

A l'heure actuelle, trois générations de bioéthanol ont été développés on se basant sur les différentes sources de matières premières : première génération de bioéthanol (sucre/amidon), deuxième génération (substrats cellulosiques), troisième génération (algues) et plus la quatrième génération de bioéthanol qui est en cours de développement (Gurram et al., 2016).

Plusieurs bioprocédés ont été développés pour la production de bioéthanol, de nombreux microorganismes tels que les levures et les bactéries peuvent être participé pour transformer lesbiomasses en éthanol (Karvonen et Klemola, 2019).

### **III.1. Historique de bioéthanol**

L'utilisation de l'éthanol comme carburant dans les transports n'est pas une idée récente. En fait, dès 1895, Nicholas Otto a suggéré l'utilisation de l'éthanol. Il utilisa de l'éthanol comme carburant dans son premier moteur à combustion dès 1897. Les deux crises du pétrole de 1973 et 1979 ont ravivé la recherche sur l'utilisation de l'éthanol comme carburant alternatif (Ghosh et Nag, 2008). Au niveau de la production d'éthanol, le processus de fermentation pour la production de boissons alcoolisées comme le vin est exploité par l'homme depuis des millénaires. C'est en 1815 que Gay-Lussac établit l'équation stoechiométrique suivante de la transformation du glucose en éthanol :  $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2$  (Ballerini et al., 2006). En 1857, Pasteur précise et quantifie le processus de conversion du glucose en éthanol. Il démontre, entre autres, que plusieurs coproduits sont associés à la synthèse de l'éthanol et de gaz carbonique (Aissaoui, 2017).

### **III.2. Définition de bioéthanol**

Le bioéthanol, un carburant renouvelable fabriqué à partir de la fermentation de biomasse (Chibi et El-Hadi, 2018). C'est un liquide incolore, inflammable et volatil avec une

odeur légèrement agréable. Dans une solution aqueuse diluée, il a une saveur un peu sucrée, mais dans des solutions plus concentrées, il donne une sensation de brûlure au goûter. L'alcool éthylique est un autre nom pour l'éthanol. Sa structure chimique est  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ , également appelé éthanol biosource (Wiloso et al., 2012).

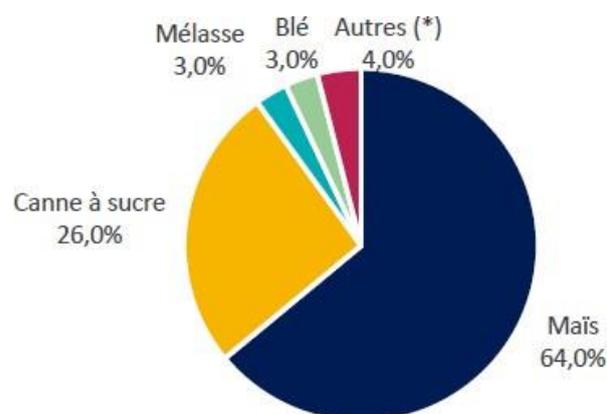
Il peut être vendu sous deux formes différentes : anhydre (100% d'éthanol en volume, souvent appelé alcool absolu), ou à diverses concentrations d'eau, typiquement à 95% et 70% à des fins antiseptiques (Walker, 2010).

### III.3. Matières premières de bioéthanol

Il existe différentes formes de ressources en biomasse dans le monde, Les processus de fermentation de toute matière contenant du sucre pourraient produire de l'éthanol. Les diverses matières premières utilisées dans la fabrication de l'éthanol sont commodément classées en trois principaux types (Lin et Tanaka, 2006) :

- De substrats riches en sucrose et amidon : canne à sucre ; betteraves ; dattes ; pommes de terre ; maïs ; orge et blé (Nagarajan et al., 2017).
- De substrats cellulosiques : résidus agricoles (paille ou tiges de maïs) ; résidus forestiers ; cultures énergétiques (panic raide ou arbres à courte rotation) (Lin et Tanaka, 2006).
- Les algues et les micro-algues : comme les micro-algues vertes (*Chlorophyceae*) ; micro-algues dorées (*Cheyosiphyceae*) ; les macro-algues marrons (*Phaeophyceae*) et les macro-algues rouges (*Rhodophyceae*) (Puspawati et al., 2015).

La figure III.1 suivante montre les matières premières utilisées pour la production de bioéthanol.



**Figure III.1** : Matières premières utilisées pour la production de bioéthanol (OCDE-FAO, 2020-2029).

### III.4 Générations de bioéthanol

Selon la matière première utilisée, quatre types peuvent être distingués :

#### III.4.1. Première génération de bioéthanol

Le bioéthanol de première génération est directement lié à la biomasse communément comestible. Il est généralement produit par fermentation de sucres à six carbones (principalement du glucose) par des micro-organismes tels que *S.cerevisiae*. Les matières premières utilisées sont principalement la canne à sucre, le maïs, lactosérum, orge, pomme de terre, betterave à sucre (Lee et Lavoie, 2013).

#### III.4.2. Deuxième génération de Bioéthanol

Le bioéthanol de deuxième génération est défini comme carburant produit à partir d'un large éventail de matières premières différentes, mais qui ne se limite pas à la biomasse lignocellulosique non comestible. La biomasse pour la production de bioéthanol de deuxième génération est généralement divisée en trois catégories (Taylor et al., 2009) :

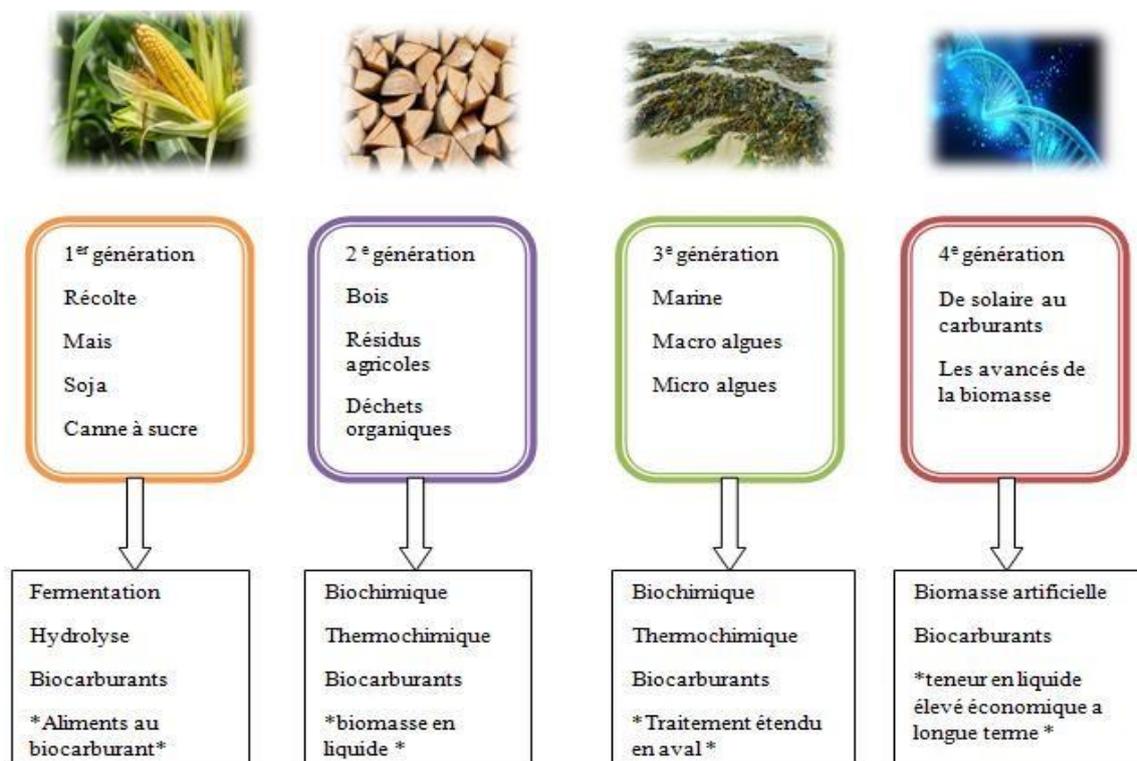
- Biomasse homogène comme les copeaux de bois blanc.
- Substances quasi homogènes comme les déchets agricoles et forestiers.
- Substances hétérogènes, y compris les matières premières de faible valeur, déchets solides municipaux et autres matériaux.

### III.4.3. Troisième génération de bioéthanol

Les algues sont un choix populaire pour la production de bioéthanol de troisième génération car leur biomasse peut être convertie directement en énergie, elles absorbent rapidement le dioxyde de carbone, accumulent de fortes concentrations de graisses et de glucides, sont faciles à cultiver et nécessitent moins de terrain que les plantes terrestres (Jambo et al., 2016).

### III.4.4. Quatrième génération de bioéthanol

Il est le fruit de la recherche et du développement dans les domaines de la biotechnologie, de la biochimie, de la biologie végétale, de la géosynthèse et des applications du génie métabolique et génétique. Actuellement, le développement de méthodes de production de bioéthanol de quatrième génération est toujours en cours, utilisant différentes matières premières de biomasse biologique ou génétiquement modifiée, telles que les algues, les arbres et les plantes, et étant capable de stocker et de gérer les émissions de carbone (Vasić et al., 2021). Le bioéthanol de quatrième génération peut également être produit par électrofermentation car il utilise l'énergie électrique pour aider à réguler la respiration des algues génétiquement modifiées en transportant des électrons (TSE et al., 2021). La figure III.2 ci-dessous présente les générations de bioéthanol.



**Figure III.2 :** Les quatre générations de bioéthanol (Vasić et al., 2021).

### III.5. Propriétés physico-chimiques de bioéthanol

Les propriétés physiques et chimiques du bioéthanol proviennent principalement de l'existence de groupements hydroxyles et de chaînes carbonées courtes. Les groupes hydroxyle peuvent former des liaisons hydrogène, rendant l'éthanol plus visqueux et moins volatil que les solvants organiques de même poids moléculaire (Brienzo, 2015). Il possède les propriétés générales des alcools primaires (réactions d'oxydation, de déshydrogénation, de déshydratation et d'estérification). Il réagit violemment avec les oxydants forts (acide nitrique, acide perchlorique...) et en général avec tous les composés ou minéraux riches en oxygène est instables. Une oxydation soudaine (comme la combustion) le convertit en dioxyde de carbone et en eau. C'est un excellent dégraissant et peut dissoudre de nombreux plastiques (Hardy, 2015). Les principales caractéristiques physicochimiques de bioéthanol sont représentées dans le tableau III.1 suivante :

**Tableau III.1** : Propriétés physico-chimiques de l'éthanol (Barisano et al., 2001 ; Bušić et al., 2018).

Propriétés	Ethanol
Formule	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH
Poids moléculaire	78,11
Densité d'énergie (MJ/ Kg)	26,6
Densité d'énergie (MJ/L)	21
Température d'ébullition <sup>0</sup> C	80,1
Température fusion <sup>0</sup> C	-114
Température d'auto-inflammation <sup>0</sup> C	423 à 425
Température de flamme <sup>0</sup> C	1930
Gravité spécifique	0,88
Pression de vapeur à 25 <sup>0</sup> C (mm Hg)	95,19
Indice d'octane	96-113
Energie spécifique	3,00

### III.6. Utilisation de bioéthanol

Aujourd'hui, le bioéthanol est utilisé dans nombreuses applications industrielles (Xiang, 2022) :

- Peut être utilisé dans les moteurs à essence comme additif à l'essence.
- Utilisé comme combustible pour la production d'électricité par combustion thermique et les piles à combustible à réaction thermo-chimique.
- Utilisé comme matière première dans l'industrie chimique : les peintures, les encres, les adhésifs et les cosmétiques.
- Il est l'ingrédient actif fondamental des boissons alcoolisées.
- L'éthanol est utilisé comme matière première dans la synthèse des solutions de pesticides.
- Il est utilisé en pharmacologie pour ses propriétés antiseptiques et anti infectieuses.
- L'éthanol est utilisé pour le chauffage et l'éclairage.

### III.7. Technologie de la production de bioéthanol

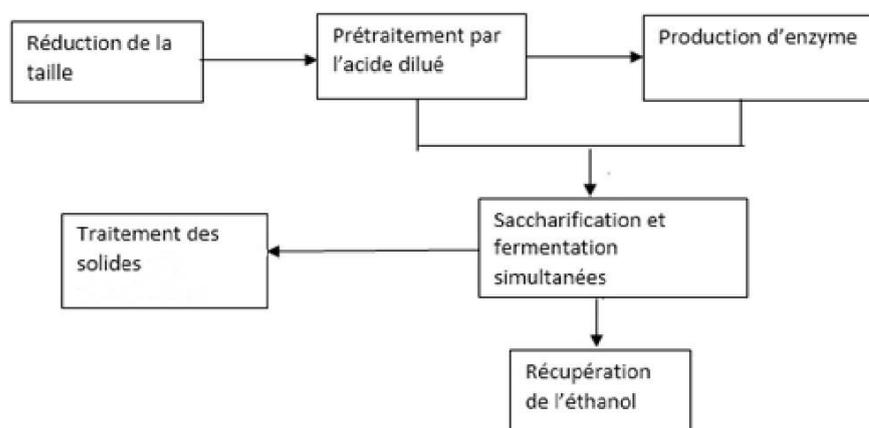
#### III.7.1. Processus global de production de bioéthanol

Le processus de production d'éthanol dépend des matières premières utilisées. La production d'éthanol s'effectue généralement en trois étapes (Vohra et al., 2014) :

- Obtenir la solution contenant des sucres fermentescibles.
- Convertir les sucres en éthanol par la fermentation.
- La séparation et la purification de l'éthanol, habituellement par distillation, rectification et déshydratation.

Certaines matières premières nécessitent des conditions de prétraitement (c'est-à-dire, la matière première lignocellulosique et la biomasse algale) pour libérer les sucres fermentescibles dans le milieu. Sans prétraitement, la progression de la fermentation peut être ralentie en raison de la disponibilité limitée de sucres fermentescibles pour le métabolisme. (Balat et Balat, 2009).

Actuellement, des méthodes de production de bioéthanol de quatrième type sont à l'étude, qui utilise des organismes génétiquement modifiés pour améliorer l'efficacité de la fermentation. Cependant, ces approches ne sont pas encore mises en œuvre à l'échelle industrielle (TSE et al., 2021). La figure III.3 suivante représente un diagramme de conversion de biomasse en bioéthanol.



**Figure III.3 :** Diagramme de conversion de biomasse en bioéthanol (Lin et Tanaka, 2006).

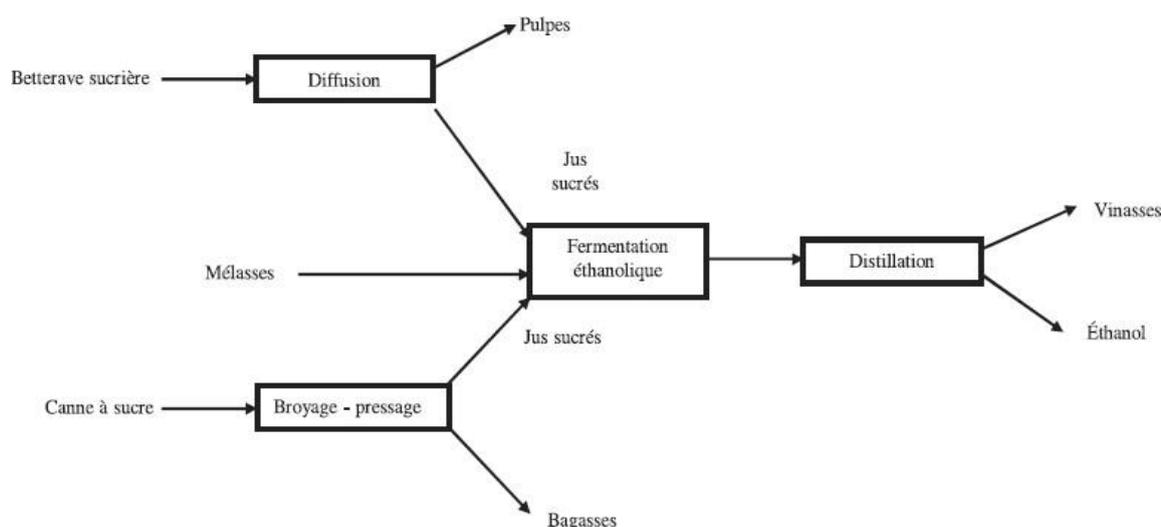
### III.7.2. Technologie de la production du bioéthanol à partir de biomasse sucrée

La canne à sucre, la betterave sucrière et le sorgho sont des cultures sucrières utilisées comme matières premières pour la production d'éthanol (Elbey et al., 2022).

Les fibres des tiges et des feuilles (bagasse) sont utilisées pour produire de la vapeur et de l'électricité pour la bioraffinerie, La canne à sucre doit être transformée entre 24 et 72 heures après la récolte. Le sucre est d'abord extrait en écrasant les tiges avec des rouleaux spécialisés pour libérer le jus. La chaux (hydroxyde de calcium) est ensuite ajoutée pour précipiter la fibre et les boues, et le mélange est ensuite filtré. La solution filtrante est évaporée pour concentrer et cristalliser le sucre, avant son élimination par centrifugation. Le sucre non cristallisé et les sels qui l'accompagnent sont concentrés pour former un sirop appelé « mélasse noire » qui est utilisé comme matière première, qui est ensuite convertie en éthanol. Après extraction, qui est différent selon le type de distillerie (production d'éthanol seulement, ou d'éthanol et sucre) (Belboom, 2013).

#### III.7.2.1. Fermentation

La fermentation est un processus multidisciplinaire basé sur la chimie, la biochimie et la microbiologie des matières premières. Le jus ou le sirop est transformé en éthanol, la teneur en sucre doit être ajustée dans la gamme de 14-18% pour obtenir une efficacité de fermentation optimale. Le processus se fait par la levure de *S. cerevisiae*, à une température autour de 33-35 C°. Le sucre est converti en éthanol, en dioxyde de carbone et en biomasse de levure, ainsi qu'en quantités beaucoup plus faibles de produits finaux mineurs tels que glycérol, huiles de fusel, aldéhydes et cétones (Almodares et al., 2009). La figure III.4 suivante désigne les étapes de la fermentation des substrats sucriers.



**Figure III.4 :** Fermentation des substrats sucriers (Ballerini, 2002).

### III.7.2.2. Distillation et déshydratation

Dans la section de distillation, l'alcool provenant du moût fermenté est concentré jusqu'à 95 %. Il est ensuite concentré pour produire de l'éthanol à une concentration minimale de 99,6 %. Le traitement de la vinasse produite dans la section de distillation peut être effectué en utilisant l'option suivante :

Concentration d'une partie de la vinasse à 20 à 25 % de solides, suivie du compostage à l'aide de boue de presse disponible et concentration du reste de la vinasse à 55 % de solides et utilisation comme engrais liquide (Almodares et al., 2009).

### III.7.3. Technologie de la production du bioéthanol à partir de biomasse amylacée

Les céréales (maïs, blé ou orge) fournissent principalement de l'amidon. Pour produire de l'éthanol à partir de l'amidon, il est nécessaire de décomposer les chaînes de ce glucide pour obtenir le sirop de glucose, qui peut être converti en éthanol par les levures. Pour l'amidon, les polymères de glucose sont transformés en glucose par une réaction hydrolytique catalysée par l'enzyme glucoamylase. Le sucre résultant est connu sous le nom de dextrose ou D-glucose. L'hydrolyse enzymatique est alors suivie par fermentation, distillation et déshydratation pour produire de l'éthanol anhydre (Khawla et al., 2014).

Il existe deux méthodes distinctes pour la transformation du maïs en éthanol, la mouture humide et la mouture sèche, et chaque méthode génère des coproduits uniques (Bndes et Cgee, 2008).

### III.7.3.1. Broyage à sec du maïs

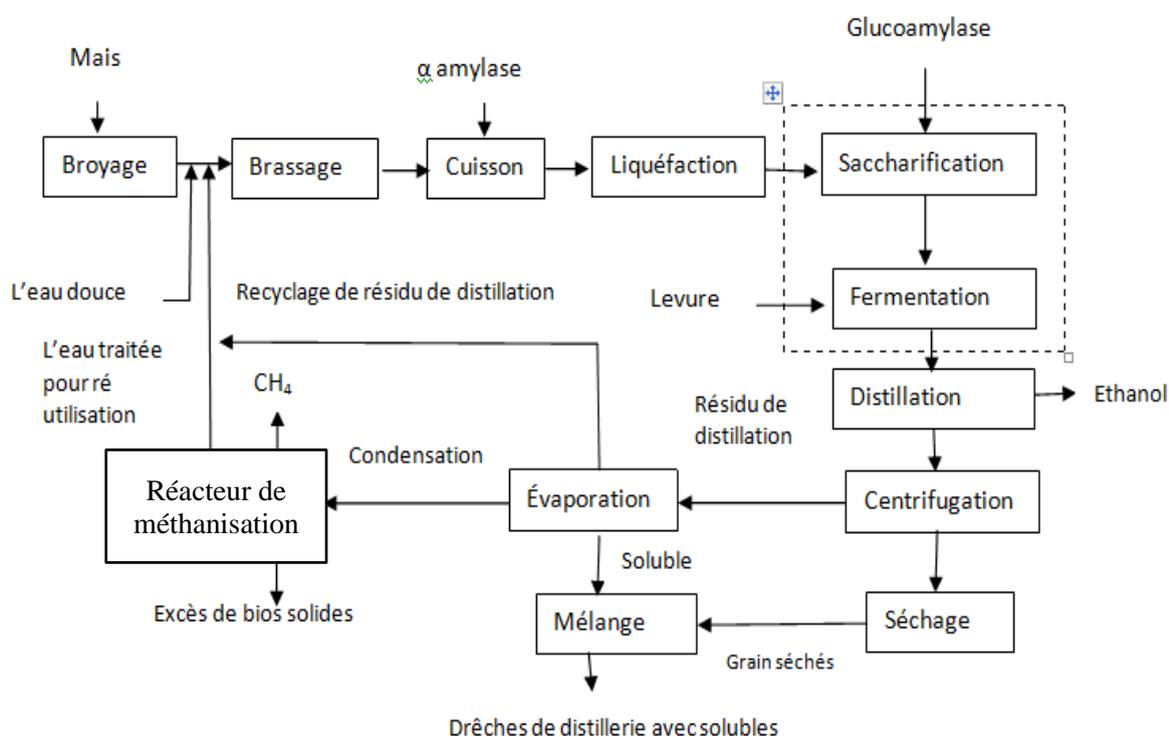
Le processus de broyage à sec du maïs se déroule en cinq étapes : broyage de la biomasse, liquéfaction, hydrolyse (saccharification), fermentation, distillation et récupération (Muktham et al., 2016).

Dans le processus de broyage à sec, les grains passent à travers les broyeurs à marteaux qui les transforment en particules fines. Ce processus facilite l'entrée de l'eau et des enzymes dans les prochaines étapes. Dans un procédé typique de broyage à sec, les grains sont moulus en poudre et chauffés avec de l'eau à 85°C. Pendant qu'il fait encore chaud, on ajoute de la poudre d'enzymes alpha-amylases et on chauffe le mélange à 110–150°C pendant une heure. Cela provoque la liquéfaction de l'amidon et réduit le niveau de bactéries. Il est de nouveau frais à 85°C, et maintenu à cette température pendant 1 h après ajout de plus de quantité d'enzymes alpha-amylase. Il est refroidi à température ambiante et des enzymes glucoamylase sont ajoutées pour assurer la conversion de l'amidon de maïs en dextrose. Ainsi, le processus global est catalysé par l'hydrolyse enzymatique. Dans la plupart des usines de broyage à sec, les enzymes glucoamylase sont directement ajoutées au fermenteur utilisant le procédé appelé « Saccharification et Fermentation Simultanées » (SFS). Ce processus réduit le coût des récipients de saccharification et minimise le risque de contamination (Vohra et al., 2014).

Dans le processus de fermentation, les levures convertissent le glucose en éthanol et en dioxyde de carbone, ce processus peut être opéré en lot jusqu'à ce qu'il soit terminé dans les 48 heures ou peut être actionné en continu avec l'ajout de sucre et le retrait du bouillon fermenté connu sous le nom de bière (Devarapalli et Atiyeh, 2015).

Habituellement, pour l'achèvement du processus de fermentation, il faut environ 40-50 h. Pendant la fermentation, le mout est agité en continu pour distribuer de la levure uniformément et gardé au frais et très actif. Après fermentation, la bière résultante est transférée dans des colonnes de distillation où l'éthanol est séparé de l'alambic restant.

L'alambic contenant les protéines, l'huile et les fibres restantes sont séchées dans un produit protéique à 27 % connu sous le nom de Drêches de Distillerie Séchées avec Solubles (DDSS) ou de Drêches de Distillerie (DD), selon que le sirop de transformation est combiné avec les solides ou non et utilisé dans les aliments pour animale (Aditiya et al., 2016). Le processus de broyage à sec du maïs est résumé dans la figure III.5 :



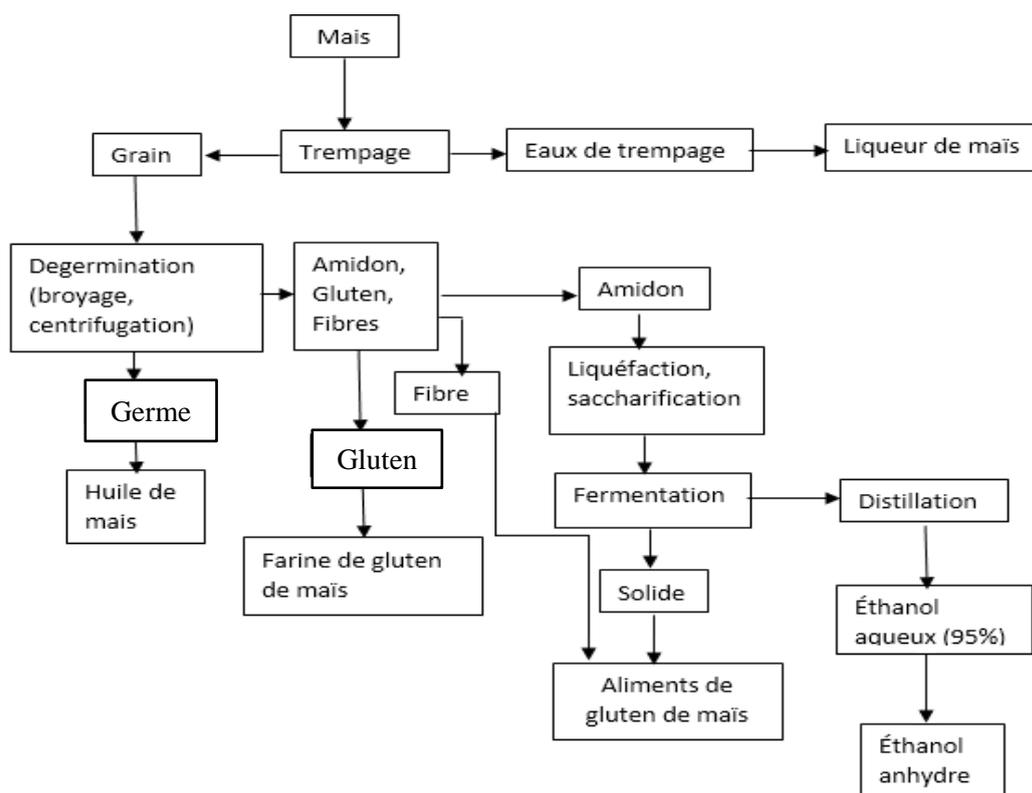
**Figure III.5 :** Processus de Broyage à sec du maïs (Vohra et al., 2014).

### III.7.3.2. Broyage humide du maïs

Dans le processus de mouture humide, le grain de maïs est séparé en trois parties dans un milieu aqueux avant la fermentation : la coque, le germe et l'endosperme. Les principaux produits de la mouture humide comprennent l'amidon et les produits dérivés de l'amidon (p. ex., sirop de maïs à haute teneur en fructose et éthanol), l'huile de maïs et le gluten de maïs. Le processus consiste en plusieurs marches. Un moulin humide reçoit généralement des cors décortiqués, qui passent par des nettoyeurs mécaniques conçus pour enlever les matériaux indésirables. Les grains nettoyés sont ensuite introduits dans des réservoirs « à forte pente », où ils sont trempés dans de l'acide sulfurique dilué de 24 à 48 heures à une température de 8 C°. Le trempage adoucit le grain, aide à décomposer la protéine qui contient les particules d'amidon et élimine divers constituants solubles (Bndes et Cgee, 2008).

Le germe est retiré du maïs trempé dans les moulins dégénéralant, Le germe est séparé dans les cyclones liquides du mélange de fibres, d'amidon et de gluten. Il est ensuite lavé, asséché, séché et traité pour extraire l'huile de maïs. L'amidon et le gluten du produit sont retirés du reste du matériau fibreux par lavage, broyage et opérations de criblage. Les coques jetées sont séchées pour utilisation dans l'alimentation animale. L'amidon est séparé du gluten par centrifugation (Andrianaivo et al., 2021).

Lorsque le lisier d'amidon purifié est obtenu, le broyeur humide Le procédé est très semblable à celui du broyage à sec. En ajoute de l'alphaamylase pour convertir le polymère d'amidon en dextrine de la courte chaîne soluble (liquéfaction). Le calcium est souvent ajouté (20 à 100 ppm) pour améliorer la stabilité enzymatique. Comme le flux d'amidon est relativement exempt de fibres ou d'autres composants, il est bien adapté à la température élevée et le temps court de la cuisson au jet et la liquéfaction enzymatique subséquente. Par conséquent, le lisier provenant de la phase de liquéfaction est mélangé à de l'eau à forte pente stérilisée et envoyé pour la saccharification. L'eau forte fournit à la fois les nutriments de fermentation et l'ajustement du pH pour la saccharification, dans laquelle la glucoamylase ajoutée convertit les dextrines en glucose. Après la saccharification, *S. cerevisiae* est ajouté pour fermenter les sucres en éthanol et CO<sub>2</sub>. Le temps total de fermentation varie de 20 à 60 heures, en fonction principalement du degré de saccharification avant la fermentation. La plupart des usines humides pratiquent la fermentation en cascade continue (Sarkar et al., 2012). La figure III.6 montre les processus de Broyage à humide du maïs.



**Figure III.6 :** Processus de Broyage à humide du maïs (Vohra et al., 2014).

De nouvelles tendances dans l'industrie du maïs-éthanol visent les procédés de séchage. Les efforts de recherche sont orientés vers le développement d'hybrides de maïs ayant une teneur plus élevée en amidon extractible ou en amidon fermentable (Vohra et al., 2014).

#### III.7.4. Technologie de production du bioéthanol à partir de biomasse lignocellulosique

La matière lignocellulosique est le composant majeur des parois cellulaires végétales. C'est la source de carbone renouvelable la plus abondante sur terre. Il se compose de trois composants principaux : la cellulose, l'hémicellulose et la lignine (Ballerini, 2002).

Les lignocellulosiques sont transformés pour la production de bioéthanol à travers quatre étapes : prétraitement, hydrolyse, fermentation et distillation. Au cours des dernières décennies, des progrès substantiels ont été réalisés dans les technologies génétiques et enzymatiques qui ont contribué à améliorer ces étapes de production d'éthanol et à étendre la capacité de *S. cerevisiae* pour la fermentation simultanée de différents sucres (Sarkar et al., 2012).

De plus, les processus de prétraitement peuvent entraîner la formation de composants toxiques, notamment de l'acide acétique ainsi que du furfural, de l'hydroxyméthyl furfural et des composants phénoliques. Cependant, en plus de la formation d'inhibiteurs de fermentation lors de la production de biocarburants, il existe des effets secondaires de la lignine sur l'hydrolyse enzymatique et les inhibiteurs de la cellulase, y compris principalement la lignine d'origine phénolique (Limayem et al., 2012).

#### III.7.4.1 Prétraitement

Les méthodes de prétraitement désignent la solubilisation et la séparation d'un ou de plusieurs de ces composants de la biomasse. Il rend la biomasse solide restante plus accessible à d'autres traitements chimiques ou biologiques. Le complexe lignocellulosique est constitué d'une matrice de cellulose et de lignine liée par des chaînes d'hémicellulose. Le prétraitement est effectué pour casser la matrice afin de réduire le degré de cellulose et d'augmenter la fraction de cellulose amorphe, la forme la plus appropriée pour l'attaque enzymatique. Elle rend la biomasse lignocellulosique sensible à une hydrolyse rapide avec des rendements accrus de sucres monomérique (Aditiya et al., 2016).

Les traitements physiques, chimiques, physicochimiques et biologiques sont les quatre types fondamentaux de prétraitement utilisés. En général, une combinaison de ces processus est utilisée à l'étape du prétraitement (Sarkar et al., 2012).

##### ➤ Prétraitement biologique

La dégradation du complexe lignocellulosique pour libérer la cellulose peut être provoquée à l'aide de microorganismes comme la pourriture brune, la pourriture blanche et les champignons de pourriture molle (Alfenore et al., 2016).

Les champignons de la pourriture blanche semblent être le micro-organisme le plus efficace. La pourriture brune attaque la cellulose, tandis que la pourriture blanche et molle attaque la cellulose et la lignine. Dans la plupart des cas de prétraitement biologique le taux d'hydrolyse est très faible. Cette méthode est sûre et économise de l'énergie grâce à un support mécanique moindre (Sindhu, 2016).

### ➤ **Prétraitement chimique**

Des ajouts chimiques précis sont prévus pendant les prétraitements chimiques. L'objectif est le même : orienter la matière lignocellulosique ou amylacée vers la formule optimale pour le procédé d'hydrolyse comme phase suivante de la chaîne de fabrication (Hasan et al., 2018).

Le prétraitement chimique (acide dilué) est considéré comme le plus approprié pour l'application à l'échelle commerciale. Il existe plusieurs acides communs utilisés dans le prétraitement de l'acide, par exemple, l'acide chlorhydrique, l'acide phosphorique, l'acide nitrique et l'acide sulfurique, également plusieurs acides organiques tels que l'acide peracétique, acide maléique, acide lactique et acide acétique. En général, le prétraitement acide peut être effectué par deux méthodes (Didderen et al., 2010) :

- 1) Prétraitement à l'acide concentré, seul un temps plus court et une température douce sont nécessaires pour produire les monomères de sucre. Cette méthode est également capable de produire des monosaccharides en dégradant les liaisons glycosuriques du polysaccharide.
- 2) Prétraitement à l'acide dilué est utilisé pour la meilleure conduite. Le prétraitement à l'acide dilué aboutit au même résultat que le prétraitement à l'acide concentré qui donne les monomères de sucre, bien qu'il se comporte différemment du prétraitement à l'acide concentré (Norrrahim et al., 2021).

### ➤ **Prétraitement mécanique**

Un moyen de prétraiter la biomasse, où la taille de la biomasse est physiquement réduite par le découpage, la découpe ou la rupture des matériaux. Il est destiné à dégrader la cristallinité de la biomasse, améliorant ainsi le reste des processus de production de bioéthanol (Che et al., 2014).

### ➤ **Prétraitement physicochimique**

Cette méthode est catégorisée sous prétraitement physicochimique pour ses caractéristiques mécaniques et chimiques fusionnées. Sur le plan mécanique, la vapeur frappe la biomasse provoquant la séparation des fibres. Alors que sur le plan chimique, l'auto-hydrolyse des groupes acétyliques présents dans l'hémicellulose a lieu à haute température, formant de l'acide

acétique ; et l'environnement acide peut être amorcé lorsque l'eau est traitée à haute température (Brodeur et al., 2011).

#### III.7.4.2. Hydrolyse

Le processus d'hydrolyse sépare une longue chaîne de glucides (de la cellulose ou de l'amidon) avec l'ajout d'une molécule d'eau et est habituellement catalysé par une enzyme ou un acide. Cette étape est cruciale dans la production de bioéthanol puisque la qualité de l'hydrolysats influera sur le processus de fermentation séquentielle, qui est lié à la qualité de l'éthanol comme produit final. Le processus d'hydrolyse est nécessaire puisque les micro-organismes (qui sont employés dans le processus ultérieur de fermentation) ne sont capables de digérer que les sucres simples dérivés du complexe glucidique de la biomasse (Verardi et al., 2012).

- **Hydrolyse enzymatique**

L'hydrolyse enzymatique est avantageuse en raison de sa faible toxicité, son faible cout d'utiliser et de sa faible corrosion par rapport à l'hydrolyse acide ou alcaline (Sarkar et al., 2012).

- **Hydrolyse enzymatique de la biomasse lignocellulosique**

Le lignocellulosique, composé principalement de cellulose, d'hémicellulose et de lignine, est dégradé enzymatiquement par rapport aux principaux constituants. La cellulose est définie par des chaînes de glucose qui sont reliées par des liaisons  $\beta$ -1. La cellulase est l'enzyme spécifique pour dégrader le composé cellulosique. Selon l'activité enzymatique des cellulases, la classification est ramifiée selon la tâche spécifique : endoglucanase (CE3.2.1.4), exoglucanase (CE3.2.1.91) et  $\beta$ -glucosidase (CE3.2.1.21) (Binod et al., 2011).

- **Hydrolyse enzymatique de la biomasse amidonnée**

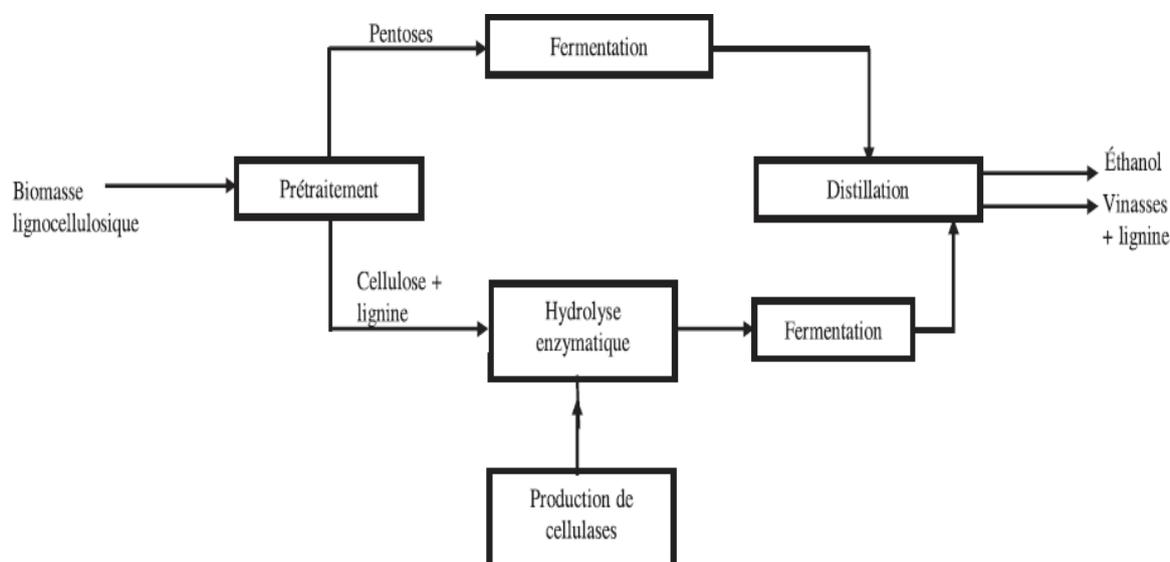
De même lignocellulosique, l'amidon est également une source de glucides, seulement avec des structures chimiques et des caractères différents. La structure moléculaire du glucose dans l'amidon est liée aux liaisons  $\alpha$ -glucosidiques, contrairement à la structure du glucose dans la cellulose qui est liée par des liaisons  $\beta$ -glucosidiques. Les enzymes amylolytiques, ou

amylases, sont les groupes d'enzymes spécifiquement pour dégrader les liaisons de glucose dans l'amidon. Les groupes sont divisés en quatre selon la fonctionnalité : endoamylases, exoamylases, enzymes débranchâtes et transférases lignocellulosique (Aditiya et al, 2016).

### III.7.4.3 Fermentation

La fermentation est un processus critique dans la production de bioéthanol, où l'éthanol est directement produit à partir de l'introduction de l'agent de fermentation (levure ou bactéries) pour convertir l'hydrolysate (Ballerini, 2002).

Il est plutôt difficile de s'attendre à ce que l'hydrolysate soit entièrement uniforme en termes de monomère de sucre, ce serait des fractions de différents monomères et plusieurs autres oligosaccharides avec des inhibiteurs probables ou des substances indigestes (Sun et al., 2021). L'hydrolysate est introduit dans le premier réacteur pour faire fermenter le composant glucose. L'éthanol est ensuite distillé, puis le reste de l'hydrolysate est versé dans le deuxième réacteur pour faire fermenter les composants de la xylose. De même, l'éthanol est extrait par distillation (kim, 2010). La figure III.7 suivante représente la fermentation de biomasse lignocellulosique.



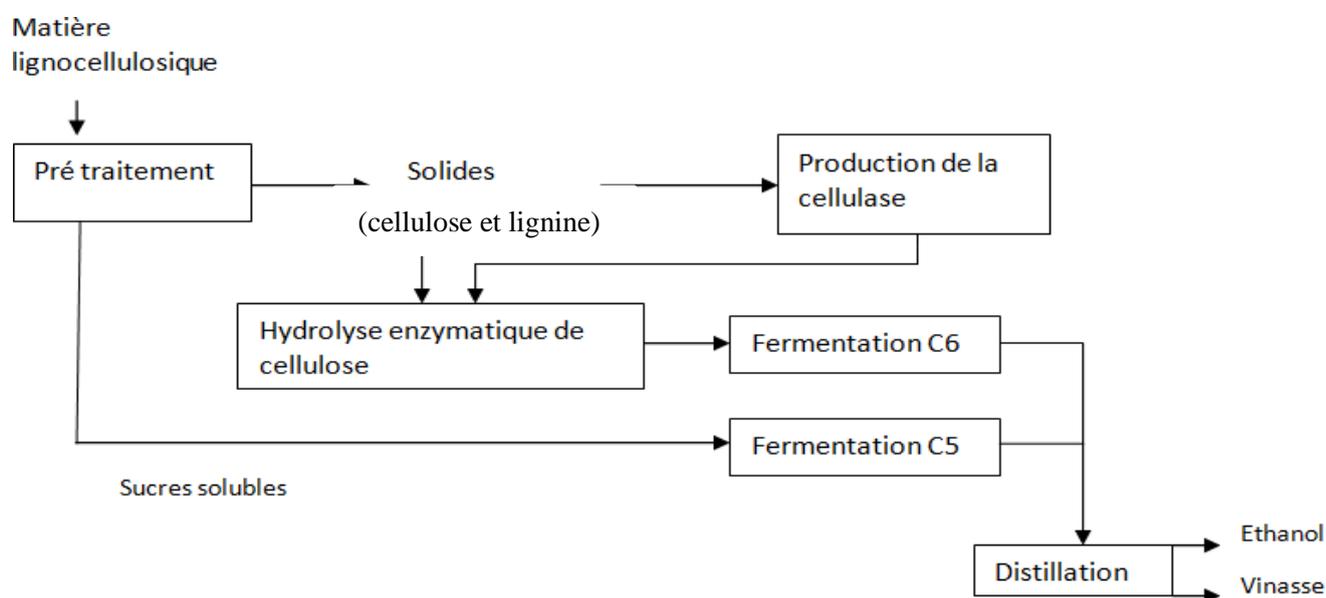
**Figure III.7 :** Fermentation de biomasse lignocellulosique (Ballerini, 2002).

Le principal inconvénient de ce processus est la formation d'inhibition après hydrolyse, qui réduit le taux d'hydrolyse et donne donc une production d'éthanol plus lente (Aditiya et al., 2016). De la conduite fondamentale de la production, il existe des solutions de rechange dans

la production d'éthanol, y compris l'Hydrolyse et Fermentation Séparées (HFS), la Saccharification et Fermentation Simultanées (SFS) et la Saccharification et Co-Fermentation Simultanées (SCFS) (Azhar et al., 2017).

#### III.7.4.3.1. Hydrolyse et fermentation séparées (HFS)

La HFS séparées est un processus de fermentation qui peut se dérouler dans différents récipients, où chacun porte une tâche spécifique. HFS permet également la fermentation du sucre en fonction de son type. L'hydrolysate est d'abord versé dans le premier récipient pour fermenter la teneur en glucose de l'hydrolysate par des microbes fermenteurs. Le processus est ensuite poursuivi par distillation de la solution et son écoulement à la deuxième cuve de fermentation pour fermenter le type de sucre suivant par le microbe de fermentation. La technique du HFS réduit également la production d'inhibition puisque l'enlèvement est pratiquement permis elle est considérablement rentable lorsqu'elle se concentre sur les substrats, les substances utilisées et le rendement en éthanol de haute qualité, même si elle n'est pas rentable dans l'installation de l'équipement (Cantarella et al., 2004). La figure III.8 montre l'organigramme de HFS.

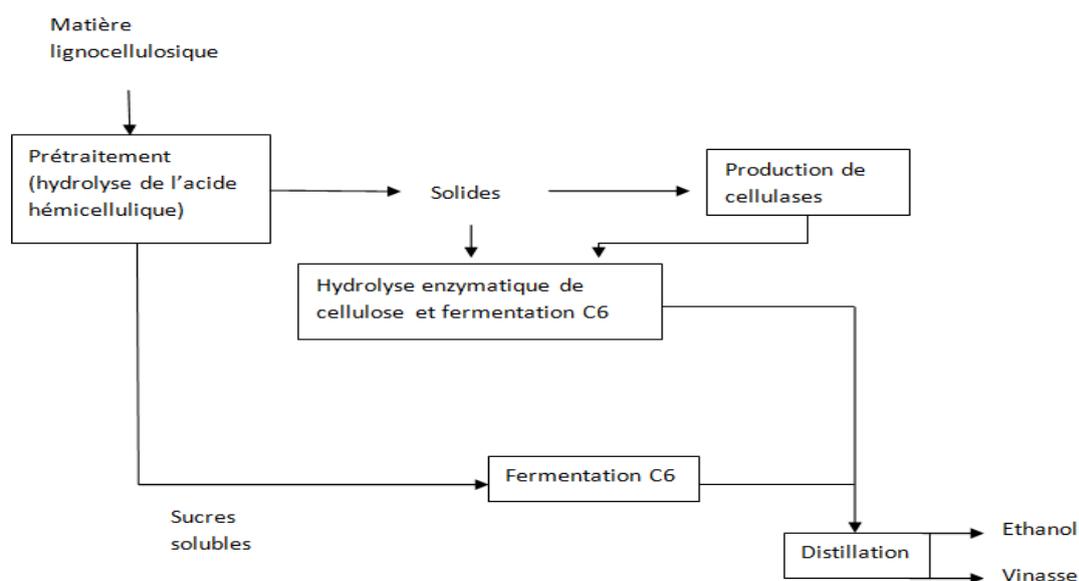


**Figure III.8 :** Organigramme de processus HFS (Dahnum et al., 2015).

#### III.7.4.3.2. Saccharification et fermentation simultanées (SFS)

La technique de la SFS est un réacteur de fermentation unique afin de minimiser la production des inhibiteurs, en combinant les deux processus (saccharification et fermentation)

en même temps, et de réduire le coût supplémentaire de l'équipement. Dans un seul réacteur, on procède à l'hydrolyse enzymatique de la biomasse et l'agent de fermentation présenté convertit immédiatement les monomères de sucre libérés en éthanol. En outre, la technique SFS peut réduire la période de production et améliorer l'efficacité de la production. En outre, l'accumulation d'éthanol dans le réacteur n'inhibe pas l'activité d'hydrolyse, ce qui fait de la SSF une méthode favorable pour la production de bioéthanol (Alfani et al., 2000). La figure III.9 représente l'organigramme du processus SFS.

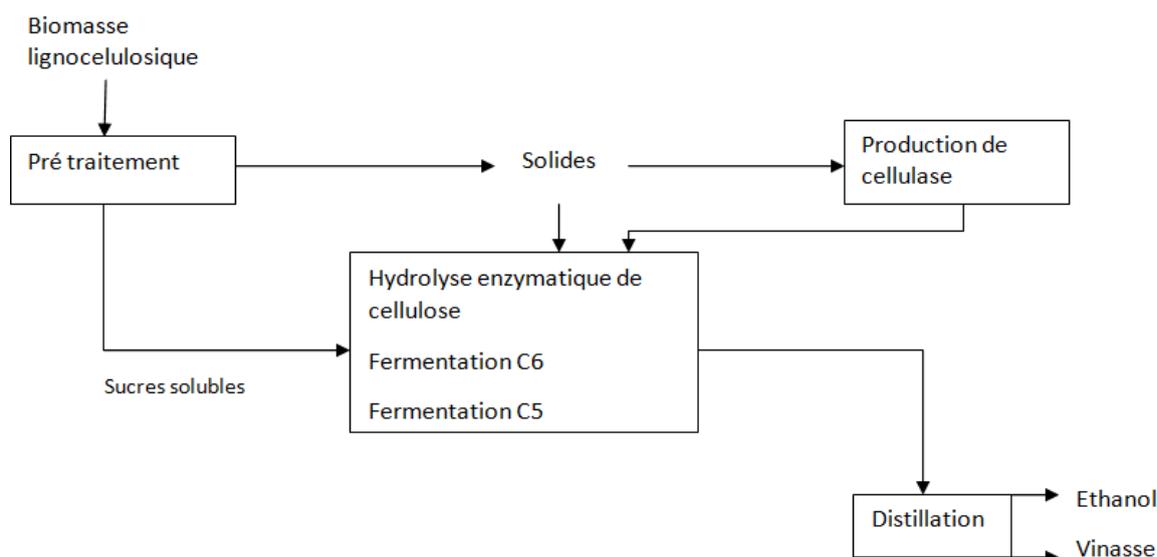


**Figure III.9 :** Organigramme du processus SFS (Mielenz, 2001).

### III.7.4.3.3. Saccharification et Co-Fermentation Simultanées (SCFS)

Avec la SCFS, les enzymes cellulolytiques sont ajoutées à la biomasse lignocellulosique pour décomposer la cellulose et l'hémicellulose en sucre fermentescible (glucose, xylose, etc), Ensuite les microorganismes tels que des levures ou des bactéries sont introduits pour fermenter ces sucres en éthanol.

La SCFS présente des défis techniques, tels que la tolérance de microorganisme aux inhibiteurs de la biomasse et l'optimisation des conditions de fermentation pour maximiser la production de produit cible (Xiang, 2022). La figure III.10 décrit l'organigramme du processus SCFS.



**Figure III.10 :** Organigramme du processus SSCF (Abdu Yusuf et Inambao, 2019).

#### III.7.4.4. Distillation

La solution d'éthanol résultant du processus de fermentation doit être traitée pour éliminer la teneur en eau, donnant sec avec un produit d'éthanol de haute qualité, ou aussi appelé éthanol anhydre (Errico et al., 2020).

En général, l'élimination de la teneur en eau peut se faire par le principe de distillation, qui se fait en utilisant la différence de points d'ébullition des mélanges dans une solution. Lorsque le mélange est chauffé au point d'ébullition de l'éthanol (78,2 C°), l'éthanol contenu dans le mélange sera vaporisé et séparé de l'autre composant. L'éthanol anhydre contient au moins 99,5 % d'éthanol en volume, et sa teneur en eau ne peut pas dépasser 0,5 % en volume (Hossain et al., 2019).

#### III.7.5. Production du bioéthanol à partir de biomasse algal

La facilité de culture et l'abondance ont conduit à l'utilisation mondiale des algues pour la production de bioéthanol. Les matières premières algales peuvent être converties en bioéthanol en utilisant la méthode d'extraction thermochimique ou biologique (Nguyen et al., 2012). En général, le séchage est la première étape de la manipulation des algues fraîches recueillies dans la mer, ce qui est important pour préserver l'extrait brut et empêcher les algues de geler. La réduction de la taille de la charge d'alimentation est importante pour augmenter la surface pour l'analyse séquentielle. La forme en poudre et le lisier d'algues sont généralement

utilisés pour la prochaine étape du processus qui implique l'hydrolyse suivie de la fermentation (Jambo et al., 2016).

### III.7.5.1. Hydrolyse

L'exposition des composants intracellulaires des algues par hydrolyse est cruciale pour la production de bioéthanol. Les parois cellulaires sont les principales structures des algues qui doivent être dépolymérisées pour extraire les polysaccharides tels que les alginates, les fucans, les laminaires, les agarans, les carraghénanes et les ulvanes, molécules qui peuvent être facilement fermentées en bioéthanol. Pendant la conversion, le polysaccharide sera hydrolysé en monomère libre (Harun et al., 2014).

#### ➤ Hydrolyse acide

Généralement, l'approche chimique de l'hydrolyse est la méthode la plus couramment utilisée pour hydrolyser le polysaccharide. Dans ce type, on a utilisé un large éventail d'acides dans lesquels l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) dilué à haute température est le plus préféré. Le rôle d'acide dans l'hydrolyse peut se briser les liaisons qui relient les longues chaînes de polysaccharides. À la fin du processus, toute addition ou dilution avec de l'eau à température modérée permettra une hydrolyse complète et rapide de l'hydrolysate en monosaccharide (Tan et al., 2020).

#### ➤ Hydrolyse enzymatique

Dans le cas d'hydrolyse enzymatique, les cellulases sont les enzymes qui sont principalement utilisés pour dégrader les polysaccharides et ils peuvent être classés en trois types principaux, à savoir les endoglucanases, les exoglucanases et la  $\beta$ -glucosidase (Jambo et al., 2016).

### III.7.5.2. Fermentation

Les sucres simples libérés dans l'étape d'hydrolyse peuvent être facilement converti en bioéthanol qui est le principal produit de la fermentation avec des produits faibles comme le  $CO_2$  et l'eau. La conversion de ce produit se fait à l'aide de quelques micro-organismes, l'expression de ces derniers est l'un des principaux facteurs qui influent sur les résultats d'autres étapes métaboliques. *S. cerevisiae* (levure) est la souche la plus couramment utilisée pour convertir le bioéthanol en raison de ses caractéristiques comme une sélectivité élevée, une faible accumulation de sous-produits, un rendement élevé en éthanol et un taux de fermentation élevé (El-Mekkawi et al., 2019).

Dans la production avancée de bioéthanol, l'assimilation des nouvelles technologies de fermentation progresse chaque année. Au lieu d'un simple processus de fermentation, des étapes plus viables sont inventées afin d'augmenter le taux de production d'une manière économiquement réalisable. SHF et SSF sont très bien connues dans l'industrie de la production de bioéthanol, les deux réacteurs peuvent limiter l'inhibition du produit final pour obtenir un rendement plus élevé d'éthanol (Tan et al., 2020).

### **III.8. Séparation et purification de bioéthanol**

Deux étapes de séparation exigeantes en énergie sont nécessaires pour obtenir de l'éthanol purifié à partir d'éthanol-eau binaire azéotrope (Aparicio et al., 2021).

#### **➤ La première étape**

Est une distillation standard qui concentre l'éthanol, La distillation cyclique pour la purification de l'éthanol est une alternative écoénergétique caractérisée par des investissements relativement faibles (Khalid et al., 2019).

#### **➤ La deuxième étape**

Consiste à déshydrater l'éthanol pour obtenir un éthanol anhydre (concentrations d'éthanol supérieures à la composition azéotrope). Plusieurs méthodes bien connues servent à cette fin, telles que la distillation sous pression, la distillation extractive (avec solvant liquide, sel dissous, leur mélange, liquides ioniques, polymères hyper ramifiés), la distillation azéotrope et la combinaison de ces méthodes. Le résidu de distillation est appelé vinasse et il pourrait être un problème environnemental parce 1 L d'éthanol génère autour 15 L de vinasse (Bušić et al., 2018).

### **III.9. Microorganismes producteurs de bioéthanol**

La fermentation de l'éthanol se base principalement sur deux types des micro-organismes : Les micro-organismes responsables de la production d'enzyme pour catalyser les

réactions chimiques qui hydrolysent les matières organiques en composés plus simples, comme les sucres et les micro-organismes qui convertissent les substrats fermentescibles en éthanol et CO<sub>2</sub> (Kechkar et al., 2012). Le microbe le plus couramment utilisé est la levure *S. cerevisiae* mais aussi la bactérie *Escherichia coli* (Lin et Tanaka., 2006). Le tableau III.2 représente des souches de bactéries et de levures productrices d'éthanol comme produit majeur de fermentation.

**Tableau III.2 :** Souches de bactéries et de levures productrices d'éthanol comme produit majeur de fermentation (Lin et Tanaka., 2006).

Bactéries	Concentration de l'éthanol	Levures	Concentration d'éthanol (g/L)
<i>Clostridium sphenoides</i>	1,8	<i>S. cerevisiae</i> 27817	(5,1-91,8)
<i>Clostridium indoli</i>	1,96	<i>Candida shehatae</i>	48,96 (max)
<i>Clostridium sordelli</i> (Pathogène)	1,7	<i>Candida utilis</i> 30091	44,4 (max)
<i>Zymomonas mobilis</i>	1,9	<i>Pichia stipitis</i>	44,4 (max)
<i>Spirochae tastenostrepta</i>	0,84	<i>Pachysolen tannophilus</i>	48,96(max)
<i>Spirochae talitoralis</i>	1,1	<i>S. cerevisiae</i>	53 (max)
<i>Erwinia amylovora</i>	1,2	<i>Pachysolen tannophilus</i> ATCC-32691	96,71
<i>Leuconostoc mesenteroides</i>	1,1	<i>S.cerevisiae</i> ATCC 24860 (aérobic)	50 (max)
<i>Klebsiella aerogenes</i>	24 g /L	<i>S.cerevisiae</i> CMI237	7,8 (max)
<i>Escherichia coli</i> LY01	40-50 g /L	<i>S.cerevisiae</i> V5	(5-18,4)
<i>Escherichia coli</i> KO11	0,7-0,1	<i>S.cerevisiae</i> 181 (aérobie)	70 (max)
<i>Klebsiella oxytoca</i>	0,94-0,98	<i>Candida shehatae</i>	(4,8- 36,8)

### III.10. Marché mondial de bioéthanol

Les deux principaux producteurs resteront sans doute les États-Unis et le Brésil. Le tableau III.3 représente les principaux producteurs de bioéthanol.

**Tableau III.3 :** Principaux producteurs de bioéthanol (OCDE- FAO, 2016).

Pays/région	Production en 2019 (million de litres)	
États-Unis	59809	<p>Le 1<sup>er</sup> producteur mondial d'éthanol en 2019.</p> <p>L'éthanol représentait environ 87 % de la production états-unienne de biocarburant et cette production reposait à 98 % sur le maïs.</p> <p>le principal exportateur mondial d'éthanol (environ 10 % de la production nationale).</p>
Brésil	36238	<p>Le 2<sup>ème</sup> producteur mondial d'éthanol en 2019.</p> <p>La production d'éthanol en 2019 était de 34 % supérieure au niveau de 2010.</p> <p>La canne à sucre constitue la principale matière première utilisée pour produire le bioéthanol.</p>
Chine	10500	<p>La Chine était le 3<sup>e</sup> producteur mondial d'éthanol en 2019. Sa production était principalement basée sur le maïs, le manioc et, dans une moindre mesure, le blé. Le niveau d'activité du secteur s'est maintenu en 2020 malgré la contraction de la demande d'essence (-7%), en raison de l'extension à de nouvelles provinces des obligations d'incorporation d'éthanol à 10 % (alors que le niveau moyen est actuellement d'à peine 2 %).</p>

		La croissance de la production d'éthanol en Chine devrait ralentir à l'horizon 2029.
Union européenne	6370	4 <sup>e</sup> producteur mondial.  L'UE est un modeste producteur d'éthanol et pesait moins de 5 % de la production mondiale , la matière essentielle pour la production c'est bien le maïs.
Afrique	_____	5 <sup>e</sup> producteur mondial.  La production de biocarburants en Afrique (Afrique du Sud 31 %, Éthiopie 11 %, Nigéria 5 %, autres pays 53 %) est composée quasiment à 100 % d'éthanol, Elle représentait moins de 1 % de la production mondiale en 2019.  Les matières premières utilisées sont principalement le canne à sucre (2 %) et le maïs (1 %).

**Conclusion**

## Conclusion

---

Les biocarburants peuvent être un alternatif aux combustibles fossiles en raison de leurs multiples avantages, tels qu'être une énergie durable et renouvelable, une source de développement économique sûre et respectueuse de l'environnement.

Malgré la maîtrise des technologies et leur coût de production des biocarburants de première génération relativement bas, ils présentent l'inconvénient de la concurrence avec l'alimentation de l'homme ce qui les rendent moins intéressants. Par contre, les biocarburants de deuxième génération présentent une source prometteuse, mais ils restent à relever les défis technologiques et développer des processus de production moins onéreux. Enfin, les biocarburants de troisième génération sont une piste à ne pas négliger à condition que la technologie soit encore plus mature et applicable à l'échelle industrielle.

Le biodiesel est l'un des biocarburants, qui diffèrent en termes de méthodes de production, de propriétés, d'avantages et d'inconvénient. Plusieurs méthodologies ont été développées pour la production de biodiesel. La Trans-estérification est bien adaptée et elle est la méthode principale de production de biodiesel vu sa simplicité par rapport aux autres méthodes de production telles que la microémulsion d'huile, la pyrolyse ou le craquage catalytique.

Le bioéthanol joue un rôle majeur dans le chemin énergétique de demain, il a de multiples avantages et aussi des inconvénients. Ce carburant, produit principalement à partir de canne à sucre et de maïs, tandis que de nombreuses autres matières premières agricoles riches en hydrates de carbone fermentescibles, selon ces matières premiers le bioéthanol est divisé en quatre types. Sa production se fait par fermentation, en utilisant des levures principalement *S. cerevisiae*.

Le marché mondial des biocarburants est en pleine expansion. On distingue trois pôles de production de biocarburants : le Brésil et les Etats-Unis pour la production d'éthanol, et l'Union européenne pour le biodiesel. La rentrée en jeu des nouvelles générations, telle que la quatrième, va certainement permettre l'augmentation d'utilisation des biocarburants et de nouveaux acteurs vont rentrer sur marché.

## **Bibliographie**

- Abdu Yusuf, A et Inambao, F.L.** 2019. Bioethanol production techniques from lignocellulosic biomass as alternative fuel: a review. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 10(6), 34-71.
- Aditiya, H. B., Mahlia, T. M. I., Chong, W. T., Nur, H et Sebayang, A. H.** 2016. Second generation bioethanol production: A critical review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 66, 631-653.
- Aissaoui, N.** 2017. Economic, social and environmental constraints in the event of expansion in alternative energy production; the case of Brazilian bioethanol. *Journal of Water Science and Environment Technologies*, 2(1), 117-124.
- Akbi, A.** 2014. Les implications agricoles du developpement des biocarburants. *Revue d'Economie et de Statistique Appliquée*, 11(1), 277-290.
- Akubude, V. C., Nwaigwe, K. N et Dintwa, E.** 2019. Production of biodiesel from microalgae via nanocatalyzed transesterification process: A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(2), 216-225.
- Alalwan, H. A., Alminshid, A. H et Aljaafari, H. A.** 2019. Promising evolution of biofuel generations. Subject review. *Renewable Energy Focus. Research Review*, 28, 127-139.
- Alfani, F., Gallifuoco, A., Saporosi, A., Spera, A et Cantarella, M.** 2000. Comparison of SHF and SSF processes for the bioconversion of steam-exploded wheat straw. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 25(4), 184-192.
- Alfenore, S et Molina-Jouve, C.** 2016. De la conversion microbienne des ressources lignocellulosiques pour la production de molécules énergétiques: verrous et perspectives. Article dans une revue *Innovations Agronomiques*, 54, 89-104.
- Al-Haj L- A.** 2014. Development of genetic engineering tools for the cyanobacterium *Synechocystis* PCC 6803 pour la production avancée de biocarburants. Thèse de doctorat. : Département de biologie structurale et moléculaire .University College London, 333.
- Ali, M. H., Mashud, M., Rubel, M. R et Ahmad, R. H.** 2013. Biodiesel from Neem oil as an alternative fuel for Diesel engine. *Article of Procedia Engineering*, 56, 625-630.
- Allouache, A.** 2012. Etude de matière premières locales non alimentaires pour la production de biocarburants (Doctoral dissertation, Alger, Ecole Nationale Polytechnique), 132 - 138.

- Alloune, R., Liazid, A et Tazerout, M.** 2012. Etudes comparatives de deux plantes oléagineuses locales pour la production du biodiesel en Algérie. *Revue des Energies Renouvelables Siemr'12 Ghardaïa*, 12, 19 –22.
- Almodares, A et Hadi, M. R .** 2009. Production of bioethanol from sweet sorghum: A review. *African journal of agricultural research*, 4(9), 772-780.
- Al-Zuhair, S.** 2007. Production of biodiesel: possibilities and challenges. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining: Innovation for a sustainable economy*, 1(1), 57-66.
- Amini, Z., Ilham, Z., Ong, H. C., Mazaheri, H et Chen, W. H.** 2017. State of the art and prospective of lipase-catalyzed transesterification reaction for biodiesel production. *Energy Conversion and Management*, 141, 339-353.
- Andrianaivo, L., Rasoanaivo, J et Ravoninjatovo, A.** 2021. Optimisation de fabrication d'éthanol à partir de racines de plantes à tubercule : cas du manioc, 10.
- Antoine, O., Copinschi, P., Hafner, M et Laboué, P.** 2021. Perspectives d'évolution des biocarburants jeux des acteurs et enjeux fonciers. *Rapport*, 96.
- Aparicio, E., Rodríguez-Jasso, R. M., Pinales-Márquez, C. D., Loredó-Treviño, A., Robledo-Olivo, A., Aguilar, C. N., ... et Ruiz, H. A.** 2021. High-pressure technology for *Sargassum* spp biomass pretreatment and fractionation in the third generation of bioethanol production. *Bioresource Technology*, 329, 124-935.
- Arshad, M., Bano, I., Younus, M., Khan, A et Rahman, A.** 2018. Health concerns associated with biofuel production. *Perspectives on Water Usage for Biofuels Production: Aquatic Contamination and Climate Change*, 97-105.
- Atabani, A. E., Silitonga, A. S., Ong, H. C., Mahlia, T. M. I., Masjuki, H. H., Badruddin, I. A et Fayaz, H.** 2013. Non-edible vegetable oils: a critical evaluation of oil extraction, fatty acid compositions, biodiesel production, characteristics, engine performance and emissions production. *Renewable and sustainable energy reviews*, 18, 211-245.
- Atadashi, I. M., Aroua, M.K., Aziz, A.A et Sulaiman, N. M. N.** 2011. Refining technologies for the purification of crude biodiesel. *Applied energy*, 88(12), 4239-4251.
- Atadashi, I. M.** 2015. Purification of crude biodiesel using dry washing and membrane technologies. *Alexandria Engineering Journal*, 54(4), 1265-1272.

**Atadashi, I. M., Aroua, M. K et Aziz, A. A.** 2011. Biodiesel separation and purification: a review. *Renewable Energy*, 36(2), 437-443.

**Azhar, S. H. M., Abdulla, R., Jambo, S. A., Marbawi, H., Gansau, J. A., Faik, A. A. M et Rodrigues, K. F.** 2017. Yeasts in sustainable bioethanol production: A review. *Biochemistry and biophysics reports*, 10, 52-61.

**Balat, M et Balat, H.** 2009. Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel. *Applied energy*, 86(11), 2273-2282.

**Ballerini D.** 2002. Production d'éthanol à partir de biomasse. *Actualité chimique*, 11(12), 83-87.

**Ballerini, D et Alazard-Toux, N.** 2006. Les biocarburants. Etats de lieux. Perspectives et enjeux du développement. Institut Français du Pétrole (IFP). France. Technip, 348.

**Barisano, D., De Bari, I., Viola, E., Zimbardi, F., Braccio, G., Cantarella, M et Gallifuoco, A.** 2001. State of the art on bioethanol production. Université de L'Aquila. Département de génie chimique et des matériaux, 100.

**Barnard, D., Casanueva, A., Tuffin, M. et Cowan, D.** 2010. Extremophiles in biofuel synthesis. *Environmental technology*, 31(8-9), 871-888.

**Batani, H., Saraeian, A et Able, C.** 2017. A comprehensive review on biodiesel purification and upgrading. *Biofuel Research Journal*, 4(3), 668-690.

**Belboom, S.** 2013. Evaluation de l'impact environnemental de la production de bioéthanol à partir de canne à sucre, betterave ou froment par analyse du cycle de vie. Comparaison des utilisations biocarburant et bioplastique, 107, 144-313.

**Benti, N. E., Aneseyee, A. B., Geffe, C. A., Woldegiyorgis, T. A., Gurmesa, G. S., Bibiso, M., ... et Mekonnen, Y. S.** 2022. Biodiesel Production in Ethiopia: Current Status and Future Prospects. *Scientific African*, 19, 15-31.

**Berrios, M et Skelton, R. L.** 2008. Comparison of purification methods for biodiesel. *Chemical Engineering Journal*, 144(3), 459-465.

**Binod, P., Janu, K. U., Sindhu, R et Pandey, A.** 2011. Hydrolysis of lignocellulosic biomass for bioethanol production in Biofuels. Academic Press, 229-250.

**Bobin, J. L., Huffer, E et Nifenecker, H.** 2021. 11-Les effets sanitaires des combustibles fossiles. Du livre : L'énergie de demain, 253-276.

- Boulal, A., Khelafi, M., Gaffour, H et Bakache, Y.** 2016. Synthèse de biodiesel en utilisant des huiles végétales usagées. *Revue des énergies renouvelables*, 19(3), 409-413.
- Brienzo, M., Tyhoda, L., Benjamin, Y et Görgens, J.** 2015. Relationship between physicochemical properties and enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse varieties for bioethanol production. *New biotechnology. Research Paper*, 32(2), 253-262.
- Brodeur, G., Yau, E., Badal, K., Collier, J., Ramachandran, K. B et Ramakrishnan, S.** 2011. Chemical and physicochemical pretreatment of lignocellulosic biomass: a review. *Enzyme research*, 17, 787-532.
- Bušić, A., Mardetko, N., Kundas, S., Morzak, G., Belskaya, H., Ivančić Šantek, M., ... et Šantek, B.** 2018. Bioethanol production from renewable raw materials and its separation and purification: a review. *Food technology and biotechnology*, 56(3), 289-311.
- Cantarella, M., Cantarella, L., Gallifuoco, A., Spera, A et Alfani, F.** 2004. Comparison of different detoxification methods for steam-exploded poplar wood as a substrate for the bioproduction of ethanol in SHF and SSF. *Process Biochemistry*, 39(11), 1533-1542.
- Carriquiry, M. A., Du, X et Timilsina, G. R.** 2011. Second generation biofuels: Economics and policies. *Energy policy*, 39(7), 4222-4234.
- Cellier, P., et Genermont, S.** 2016. L'agriculture entre pollution atmosphérique et changement climatique. *Agriculture in the scope of both air pollution and climate. Pollution atmosphérique*, 64,12.
- Chakraborty, R., Bepari, S et Banerjee, A.** 2011. Application of calcined waste fish (*Labeo rohita*) scale as low-cost heterogeneous catalyst for biodiesel synthesis. *Bioresource technology*, 102(3), 3610-3618.
- Che Kamarludin, S. N., Jainal, M. S., Azizan, A., Safaai, N. S. M et Mohamad Daud, A. R.** 2014. Mechanical pretreatment of lignocellulosic biomass for biofuel production. In *Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publications Ltd , 625, 838-841.
- Cheng, J. J et Timilsina, G. R.** 2011. Status and barriers of advanced biofuel technologies: a review. *Renewable Energy*, 36(12), 3541-3549.
- Chibi ,S et El Hadi ,D.** 2018. La Bioproduction de l'éthanol à partir de déchets de dattes : effet de l'incorporation des cendres du noyau de Deglet-Nour sur le rendement. *Revue agrobiologie* ,8(1) , 685-694.

- Cortez L et Leite R-D C.** 2012. Relation Between Biofuels versus Fossil Fuels. Petroleum Engineering Downstream. Encyclopedia of Life Support Systems.in Petroleum engineering downstream,10.
- Dahnum, D., Tasum, S. O., Triwahyuni, E., Nurdin, M et Abimanyu, H.** 2015. Comparison of SHF and SSF processes using enzyme and dry yeast for optimization of bioethanol production from empty fruit bunch. Energy Procedia, 68, 107-116.
- Daud, N. M., Abdullah, S. R. S., Hasan, H. A et Yaakob, Z.** 2015. Production of biodiesel and its wastewater treatment technologies: a review. Process Safety and Environmental Protection, 94, 487-508.
- Demirbaş, A.** 2002. Biodiesel from vegetable oils via transesterification in supercritical methanol. Energy conversion and management, 43(17), 2349-2356.
- Devarapalli, M et Atiyeh, H. K.** 2015. A review of conversion processes for bioethanol production with a focus on syngas fermentation. Biofuel Research Journal, 2(3), 268-280.
- Didderen, I., Destain, J et Thonart, P.** 2010. La production de bioéthanol à partir de biomasse lignocellulosique. Forêt. Nature, 104,7.
- Dorin ,B et Gitz,V.** 2008. Écobilans de biocarburants: une revue des controverses. Natures Sciences Sociétés,16(4), 337-347.
- Dragone, G., Fernandes, B. D., Vicente, A. A et Teixeira, J. A.** 2010. Third generation biofuels from microalgae. Chapitre d'ouvrage, 1355-1362.
- Égalité, L. F.** 2008. L'industrie pétrolière en 2007. Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières - Direction des Ressources Énergétiques et Minérales.
- Elbey, S., Ouakil, A., Zoubiri, F. Z., Rihani, R et Bentahar, F.** 2022. Production de bioéthanol à partir de jus d'orange de Rouïba. Nature and Technology, (27), 1-7.
- El-Mekkawi, S. A., Abdo, S. M., Samhan, F. A et Ali, G. H.** 2019. Optimization of some fermentation conditions for bioethanol production from microalgae using response surface method. Bulletin of the National Research Centre, 43, 1-8.
- Errico, M., Madeddu, C., Bindseil, M. F., Madsen, S. D., Braekevelt, S et Camilleri-Rumbau,M.S.** 2020. Membrane assisted reactive distillation for bioethanol purification. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification. University of Southern Denmark, 157, 108-110.

**Feng, W.** 2009. Biofuels in China: Opportunities and Challenges. *In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant*, 45(3), 342-349.

**Firoz, S.** 2017. A review: advantages and disadvantages of biodiesel. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(11), 530-533.

**Galafassi, S., Cucchetti, D., Pizza, F., Franzosi, G., Bianchi, D et Compagno, C.** 2012. Lipid production for second generation biodiesel by the oleaginous yeast *Rhodotorula graminis*. *Bioresource Technology*, 111, 398-403.

**Gebremariam, S. N et Marchetti, J. M.** 2017. Biodiesel production technologies: review. *Aims Energy*, 5(3), 425-457.

**Ghosh, B. B et Nag, A.** 2008. Ethanol and methanol as fuels in internal combustion engines. *Biofuels Refining and Performance*. Chapter 7, 191.

**Guo, M., Song, W et Buhain, J.** 2015. Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. *Renewable and sustainable energy reviews*, 42, 712-725.

**Gurram, R., Al-Shannag, M., Knapp, S., Das, T., Singasaas, E et Alkasrawi, M.** 2016. Technical possibilities of bioethanol production from coffee pulp: a renewable feedstock. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18, 269-278.

**Hadj Ali, H., Khechekhouche, A et Abouseoud, M.** 2021. Synthèse de Biodiesel à partir d'une huile végétale. Mémoire de fin d'études de Master. Université Yahia Fares De Medea, 105.

**Hamlaoui, K.** 2021. Revue bibliographique sur les biocarburants microbiens. 2021. Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master. Université des Frères Mentouri Constantine, 75.

**Hardy, N., Henaut, I., Augier, F., Béal, C., and Chaabane, F. B.** 2015. Rhéologie des champignons filamenteux: un outil pour la compréhension d'un procédé de production de biocatalyseurs utilisés pour la production de bioéthanol. *Rhéologie*, 27, 43-48.

**Harun, R., Yip, J. W., Thiruvankadam, S., Ghani, W. A., Cherrington, T et Danquah, M. K.** 2014. Algal biomass conversion to bioethanol—a step-by-step assessment. *Biotechnology journal*, 9(1), 73-86.

**Hassan, S. S., Williams, G. A et Jaiswal, A. K.** 2018. Emerging technologies for the pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource technology*, 262, 310-318.

**Hossain, M. M., Rawal, A et Aldous, L.** 2019. Aprotic vs protic ionic liquids for lignocellulosic biomass pretreatment: anion effects, enzymatic hydrolysis, solid-state NMR,

- distillation, and recycle. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 7(14), 11928-11936.
- Hussain, M., et Mahmud, I.** 2019. PyMannKendall: a python package for non parametric Mann Kendall family of trend tests. *Journal of Open Source Software*, 4(39), 1556.
- IŞIK, M. Z.** 2021. Comparative experimental investigation on the effects of heavy alcohols-safflower biodiesel blends on combustion, performance and emissions in a power generator diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 184, 116142.
- Jambo, S. A., Abdulla, R., Azhar, S. H. M., Marbawi, H., Gansau, J. A et Ravindra, P.** 2016. A review on third generation bioethanol feedstock. *Renewable and sustainable energy reviews*, 65, 756-769.
- John, M., Abdullah, M. O., Hua, T. Y et Nolasco-Hipólito, C.** 2021. Techno-economical and energy analysis of sunflower oil biodiesel synthesis assisted with waste ginger leaves derived catalysts. *Renewable Energy*, 168, 815-828.
- Junker, C et Liousse, C.** 2008 . A global emission inventory of carbonaceous aerosol from historic records of fossil fuel and biofuel consumption for the period 1860–1997. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(5), 1195-1207.
- Kabar, S et Kadja, M.** 2017. Etude numérique de l'effet du type de carburant sur les émissions polluantes dans un moteur.
- Karvonen, M et Klemola, K.** 2019. Identifying bioethanol technology generations from the patent data. *World Patent Information*, 57, 25-34.
- Kechkar, M et Aziza, M.** 2012. Le bioéthanol. *Revue des energies renouvelables sienr'12 Ghardaïa 2012*, 276-279.
- Khalid, A., Aslam, M., Qyyum, M. A., Faisal, A., Khan, A. L., Ahmed, F., ... et Yasin, M.** 2019. Membrane separation processes for dehydration of bioethanol from fermentation broths: Recent developments, challenges, and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 427-443.
- Khawla, B. J., Sameh, M., Imen, G., Donyes, F., Dhouha, G., Raoudha, E. G et Oumèma, N. E.** 2014. Potato peel as feedstock for bioethanol production: A comparison of acidic and enzymatic hydrolysis. *Industrial Crops and Products*, 52, 144-149.
- Khiari, K et al.** 2016. Experimental investigation of pistacia lentiscus biodiesel as a fuel for direct injection diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 108, 392-399.
- Kim, J. H., Block, D. E et Mills, D. A.** 2010. Simultaneous consumption of pentose and hexose

sugars: an optimal microbial phenotype for efficient fermentation of lignocellulosic biomass. *Applied microbiology and biotechnology*, 88, 1077-1085.

**Knothe, G.** 2010. Biodiesel and renewable diesel: a comparison. *Progress in energy and combustion science*,36(3),364-373.

**Kolhe, N. S., Gupta, A. R et Rathod, V. K.** 2017. Production and purification of biodiesel produced from used frying oil using hydrodynamic cavitation. *Resource-Efficient Technologies*, 3(2), 198-203.

**Laurent, P., Roiz, J., Wertz, J. L., Richel, A et Paquot, M.** 2011. Le bioraffinage, une alternative prometteuse à la pétrochimie. *BASE*. 15 (4).ISSN :1370-6233

**Le Gleuher, M et Farhi, R.** 2005. The new energy technologies in Australia; Les nouvelles technologies de l'énergie en Australie.

**Lédé, J.** 2010. Biomass pyrolysis: comments on some sources of confusions in the definitions of temperatures and heating rates. *Energies*, 3(4), 886-898.

**Lee, R.A et Lavoie, J. M.** 2013.From first-to third-generation biofuels: challenges of producing a commodity from a biomass of increasing complexity. *Anim Front* 3 (2),6–11.

**Liew, F. M., Köpke, M et Simpson, S. D.** 2013. Gas fermentation for commercial biofuels production. *Liquid, gaseous and solid biofuels Conversion techniques*, 125-173.

**Liew, W. H., Hassim, M. H et Ng, D. K.** 2014. Review of evolution, technology and sustainability assessments of biofuel production. *Journal of Cleaner Production*, 71, 11-29.

**Limayem, A et Ricke, S. C.** 2012. Lignocellulosic biomass for bioethanol production: current perspectives, potential issues and future prospects. *Progress in energy and combustion science*, 38(4), 449-467.

**Lin, Y et Tanaka, S.** 2006. Ethanol fermentation from biomass resources: current state and prospects. *Applied microbiology and biotechnology*, 69, 627-642.

**Luque, R., Herrero-Davila, L., Campelo, J. M., Clark, J. H., Hidalgo, J. M., Luna, D., ... et Romero, A. A.** 2008. Biofuels: a technological perspective. *Energy and Environmental Science*. RSC publishing ,1(5), 542-564.

**Maheswari, P., Haider, M. B., Yusuf, M., Klemeš, J. J., Bokhari, A., Beg, M., ... et Jaiswal, A. K.** 2022. A review on latest trends in cleaner biodiesel production: Role of feedstock, production methods, and catalysts. *Journal of Cleaner Production*, 355, 131-588.

- Mat Aron, N. S., Khoo, K. S., Chew, K. W., Show, P. L., Chen, W. H et Nguyen, T. H. P.** 2020. Sustainability of the four generations of biofuels—a review. *International Journal of Energy Research*, 44(12), 9266-9282.
- MbuyiKatshiatshia,H.,Tumuinimo,Ch.,Mbanza,H.,Sumuna,VetTuakashikila,Y.** 2018.Physicochemical characterization of a biodiesel produced from oil extrat from the pulp of raffia sese de wild collected in democratic republic of congo.*Journal américain de recherche scientifique pour l'ingénierie,la technologie et les sciences*,44(1),89-102.
- Miao, X et WU, Q.** 2006. Biodieselproduction from heterotrophicmicroalgaloil.*Bioresource technology*, 97 (6), 841-846.
- Mielenz, J. R.** 2001. Ethanol production from biomass: technology and commercialization status. *Current opinion in microbiology*, 4(3), 324-329.
- Molino, A., Larocca, V., Chianese, S et Musmarra, D.** 2018. Biofuels production by biomass gasification: A review. *Energies*, 11(4), 811.
- Moser, B. R.** 2009. Biodiesel production, properties, and feedstocks. *In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant*, 45, 229-266.
- Muktham, R., Bhargava, S., Bankupalli, S et Ball, A.** 2016. A review on 1st and 2nd generation bioethanol production-recent progress. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 2016(6),72-92.
- Murray, R., King, G et Wyse-Mason, R.** 2019. Micro-emulsification vs.Transesterification: an investigation of the efficacy of methanol use in improving vegetable oil engine performance. *Biofuels*,9(12), 1165-1174.
- Nabgan, W., Jalil, A. A., Nabgan, B., Jadhav, A. H., Ikram, M., Ul-Hamid, A., ... et Hassan, N. S.** 2022. Sustainable biodiesel generation through catalytic transesterification of waste sources : a literature review and bibliometric survey. *RSC advances*, 12(3), 1604-1627.
- Nagarajan, S., Skillen, N. C., Irvine, J. T., Lawton, L. A et Robertson, P. K.** 2017. Cellulose II as bioethanol feedstock and its advantages over native cellulose. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 182-192.
- Naik, S. N., Goud, V. V., Rout, P. K. et Dalai, A. K.** 2010. Production of first and second generation biofuels: a comprehensive review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(2), 578-597.
- Nema, S. K et Ganeshprasad, K. S.** 2002. Plasma pyrolysis of medical waste. *Current science*, 271-278.

- Nigam, P. S et Singh, A.** 2011. Production of liquid biofuels from renewable resources. *Progress in energy and combustion science*, 37(1), 52-68.
- Norrrahim, M. N. F., Ilyas, R. A., Nurazzi, N. M., Rani, M. S. A., Atikah, M. S. N et Shazleen, S. S.**2021. Chemical pretreatment of lignocellulosic biomass for the production of bioproducts: an overview. *Applied Science and Engineering Progress*, 14(4), 588-605.
- Nuhu, A.A.** 2013. Bio-catalytic desulfurization of fossil fuels: a mini review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 12, 9-23.
- Obernberger, I., Brunner, T et Bärnthaler, G.** 2006. Chemical properties of solid biofuels significance and impact. *Biomass and bioenergy*, 30(11), 973-982.
- Palz, W.** 2005. The development of the biofuels in the german farms,5.
- Pandit, C., Banerjee, S., Pandit, S., Lahiri, D., Kumar, V., Chaubey, K. K., ... et Joshi, S. J.** 2023. Recent advances and challenges in the utilization of nanomaterials in transesterification for biodiesel production. *Heliyon*, 9, e15475.
- Payer Muñoz, A. J.** 2023. Le Secteur des énergies renouvelables en Espagne.
- Poitrat, E.** 2009. Biofuels. *Techniques de l'Ingenieur. Genie Energetique*, 209, 8550(21) 8550(219).
- Puspawati, S., Ainuri, M et Nugraha, D. A.** 2015. The production of bioethanol fermentation substrate from *Eucheuma cottonii* seaweed through hydrolysis by cellulose enzyme. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 3, 200-205.
- Riyadi, T. W., Hernandez, M. S., Herawan, S. G., Idris, M., Paristiawan, P. A., Putra, N. R., ... et Veza, I.** 2023. Biodiesel for HCCI engine: prospects and challenges of sustainability biodiesel for energy transition. *Results in Engineering*, 100-916.
- Rodionova, M. V., Poudyal, R. S., Tiwari, I., Voloshin, R. A., Zharmukhamedov, S. K., Nam, H. G., ... et Allakhverdiev, S. I.** 2017. Biofuel production: challenges and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(12), 8450-8461.
- Saleh, J.** 2011. A membrane separation process for biodiesel purification. *University of Ottawa Canada*, 242.
- Saravanan, A., Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S., Vickram, A. S., Karishma, S., Kamalesh, R et Rangasamy, G.** 2023. Techno-economic and environmental sustainability prospects on biochemical conversion of agricultural and algal biomass to biofuels. *Journal of Cleaner*

Production,414, 137-749.

**Sarkar, N., Ghosh, S. K., Bannerjee, S et Aikat, K.** 2012. Bioethanol production from agricultural wastes: an overview. *Renewable energy*, 37(1), 19-27.

**Silitonga, A. S., Mahlia, T. M. I., Ong, H. C., Riayatsyah, T. M. I., Kusumo, F., Ibrahim, H., ... et Gumilang, D.** 2017. A comparative study of biodiesel production methods for *Reutealis trisperma* biodiesel. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 39(20), 2006-2014.

**Sindhu, R., Binod, P et Pandey, A.** 2016. Biological pretreatment of lignocellulosic biomass—An overview. *Bioresource technology*, 199, 76-82.

**Singh, D., Sharma, D., Soni, S. L., Sharma, S., Sharma, P. K et Jhalani, A.** 2020. A review on feedstocks, production processes, and yield for different generations of biodiesel. *Fuel*, 262, 116-553.

**Stančin, H., Mikulčić, H., Wang, X et Duić, N.** 2020. Un examen des carburants alternatifs dans le futur système énergétique. *Revue des énergies renouvelables et durables*, 128, 109927.

**Starck, L., Pidol, L., Jeuland, N., Chapus, T., Bogers, P et Bauldreay, J.** 2016. Production of hydroprocessed esters and fatty acids (HEFA) optimisation of process yield. *Oil and Gas Science and Technology Revue d'IFP Energies nouvelles*, 71(1), 10.

**Stolarski, M., Rybczynska, B., Krzyzaniak, M., Lajszner, W., Graban, L., Peni, D et Bordiean, A.** 2019. Thermophysical properties and elemental composition of agricultural and forest solid biofuels versus fossil fuels. *Journal of Elementology*, 24(4), 1215-1228.

**Sun, J., Zhang, L et Loh, K. C.** 2021. Review and perspectives of enhanced volatile fatty acids production from acidogenic fermentation of lignocellulosic biomass wastes. *Bioresources and Bioprocessing*, 8(1), 68.

**Tan, I. S., Lam, M. K., Foo, H. C. Y., Lim, S et Lee, K. T.** 2020. Advances of macroalgae biomass for the third generation of bioethanol production. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 28(2), 502-517.

**Tang, S., Wang, L., Zhang, Y., Li, S., Tian, S et Wang, B.** 2012. Study on preparation of Ca/Al/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic composite solid catalyst and its application in biodiesel transesterification. *Fuel Processing Technology*, 95, 84-89.

**Taylor, M. P., Eley, K. L., Martin, S., Tuffin, M. I., Burton, S. G et Cowan, D. A.** 2009. Thermophilic ethanologensis: future prospects for second-generation bioethanol production.

Trends in biotechnology, 27(7), 398-405.

**Trépanier, M. P et Coelho, L. C.** 2017. Facteurs et méthodes de calcul d'émissions de gaz à effet de serre. CIRRELT, Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport= Interuniversity Research Centre on Enterprise Networks, Logistics and Transportation, 32.

**TSE, T. J., Wiens, D. J et Reaney, M. J.** 2021. Production of bioethanol—A review of factors affecting ethanol yield. *Fermentation*,7(4), 268.

**Tyson, K. S et McCormick, R. L.** 2006. Biodiesel handling and use guide. National Renewable Energy Laboratory (NREL): Golden, CO, USA, 72.

**Vasić, K., Knez, Ž et Leitgeb, M.** 2021. Bioethanol production by enzymatic hydrolysis from different lignocellulosic sources. *Molecules*, 26(3), 753.

**Verardi, A., De Bari, I., Ricca, E et Calabrò, V.** 2012. Hydrolysis of lignocellulosic biomass: current status of processes and technologies and future perspectives. In *Bioethanol* ,2012,95-122. Rijeka: InTech.

**Vermeersch, G.** 2002. Biocarburants: la Commission propose d'encourager leur utilisation. *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, 9(1), 14-15.

**Vincent, G.** 2006. Les biocarburants à partir de ressources lignocellulosiques : Présentation des filières et identification des risques, 30.

**Vohra, M., Manwar, J., Manmode, R., Padgilwar, S et Patil, S.** 2014. Bioethanol production: Feedstock and current technologies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(1), 573-584.

**Walker, G. M.** 2010. Bioethanol: Science and technology of fuel alcohol. Bookboon, 116.

**Wang, F., Xing, X. R et Liu, C. Z .** 2009. Biofuels in China: Opportunities and Challenges. In *In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant*. Invited review,45, 342-349.

**Williams, P. J. L. B et Laurens, L. M.** 2010. Microalgae as biodiesel and biomass feedstocks: Review and analysis of the biochemistry, energetics & economics. *Energy and environmental science*, 3(5), 554-590.

**Wiloso, E. I., Heijungs, R et De Snoo, G. R.** 2012. LCA of second generation bioethanol: a review and some issues to be resolved for good LCA practice. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5295-5308.

**Xiang, H., Xin, R., Prasongthum, N., Natewong, P., Sooknoi, T., Wang, J., ... et Fan, X.**

2022. Catalytic conversion of bioethanol to value-added chemicals and fuels: A review. *Resources Chemicals and Materials*, 1(1), 47-68.

**Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S et Karishma, S.** 2022. Bio-derived catalysts for production of biodiesel: A review on feedstock, oil extraction methodologies, reactors and lifecycle assessment of biodiesel. *Fuel*, 316, 123379.

**Zulqarnain, Ayoub, M., Yusoff, M. H. M., Nazir, M. H., Zahid, I., Ameen, M...et Budi Nursanto, E.** 2021. A comprehensive review on oil extraction and biodiesel production technologies. *Sustainability*, 13(2), 788.

## Technologie de production de biodiesel et bioéthanol

**Présenté par :**

DOUKHANE Amal

DJINI Ines

HARROUCHE Khedidja

**Membres de jury :**

**Encadrant :** Dr. AMIRA Samiya

**Presidente :** Dr. BEKKA Fahima

**Examinatrice :** Dr. LEHAÇANI Sarra

### Résumé

Les biocarburants sont considérés comme une énergie renouvelable produite en transformant la biomasse. Le bioéthanol et le biodiesel sont les produits majoritaires obtenus par des méthodes physicochimiques ou biochimiques impliquant les levures et les bactéries (la principale méthode est la fermentation pour l'éthanol la Trans-estérification pour le biodiesel). Quatre générations de biocarburants peuvent être distinguées selon l'origine de la biomasse utilisée, première génération si la biomasse est comestible, deuxième génération si elle est non comestible, troisième génération si la matière algale est utilisée et quatrième si microorganisme génétiquement modifiée. Le bioéthanol et le biodiesel ont été introduits dans divers secteurs comme le transport et la production d'énergie électrique et thermique. L'objectif de cette recherche est de jeter la lumière sur le sujet des biocarburants plus précisément le biodiesel et le bioéthanol et leurs technologies de production.

**Mots clés :** biocarburant, énergie, biomasse, bioéthanol et biodiesel.

### Abstract

Biofuels are considered as renewable energy produced by transforming biomass. Bioethanol and biodiesel are the principal products obtained by physicochemical or biochemical methods involving several microbial types, including yeasts and bacteria (the principal method of bioethanol production is fermentation while it is transesterification for bioethanol). According the type of biomass used, four generations can be observed, the first generation when using edible biomass, the second one when using non-edible, the third generation when algae are used and the fourth one when genetically modified microorganism. Bioethanol and biodiesel have been used in various sectors such as transport and the production of electrical and thermal energy. The aim of this research is to shed light on biofuels, specifically biodiesel and bioethanol and their production technologies.

**Keywords:** biofuel, energy, biomass, bioethanol and biodiesel.

### ملخص:

يعتبر الوقود الحيوي طاقة متجددة تنتج عن طريق تحويل الكتلة الحيوية، سواء في شكل حيوب ومحاصيل زراعية، أو في شكل زيوت. الإيثانول البيولوجية الكيميائية التي تشمل العديد من الحيوي والديزل الحيوي هي أغلبية المنتجات التي يتم الحصول عليها بالطرق الفيزيائية الكيميائية أو الأنواع الميكروبية، بما في ذلك الخمائر والبكتيريا. تطور نوع الكتلة الحيوية المستخدمة بمرور الوقت خلق أجيالاً مختلفة من الوقود الحيوي. من المؤكد أن استخدام الوقود كمصدر للطاقة له تأثير إيجابي على البيئة لأنه يقلل من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، التي جعلت من الاهتمام والدعم للعديد من البلدان حلاً لمشكلة إمدادات الطاقة، في مختلف القطاعات مثل النقل وإنتاج الطاقة الكهربائية والحرارية. الهدف من هذا البحث هو تسليط الضوء على الوقود الحيوي، وخاصة الديزل الحيوي والإيثانول الحيوي وتقنيات الإنتاج الخاصة بهما.

**الكلمات الرئيسية:** الوقود الحيوي، الطاقة، الكتلة الحيوية، الإيثانول الحيوي والديزل الحيوي.