



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريديج
Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi B.B.A.
كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الارض والكون
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers
قسم العلوم البيولوجية
Département des Sciences biologique.



Mémoire

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la vie

Filière : sciences biologique

Spécialité : Microbiologie Appliquée

Thème :

**Etude bibliographique sur la production de
bioéthanol à partir de la biomasse
lignocellulosique**

**Présenté par : Benmessahel Manal
Nabti Fatima**

Soutenu le : 26-06-2022 Devant le jury :

	Nom, Prénom	Grade	Affiliation
Président :	M ^{me} SOUAGUI Yasmina	MCB	Faculté SNV-STU, Bordj Bou Arreridj
Encadrant :	M ^{me} TAMINE Milouda	MAB	Faculté SNV-STU, Bordj Bou Arreridj
Examineur :	M ^r SADRATI Nouari	MCB	Faculté SNV-STU, Bordj Bou Arreridj

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

On remercie avant tous, ALLAH le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant toutes les longues années d'études afin qu'on puisse aboutir à ce là.

Nous tenons à témoigner toute notre reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire :

Tout d'abord, ce travail n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Dr.TAMINE .M, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils. On ne vous remercie jamais assez.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions durant nos années d'étude.

Aux membres du jury Dr. SOUAGUI.Y et Dr. SADRATIN, pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en

acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous tenons à exprimer notre gratitude à nos parents et à notre peuple et nos frères pour leur soutien et leur encouragements.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

*A ma chère grand-mère **Aicha Benaris** et à mes très chers parents et mes tantes et oncles, en guise de gratitude pour tous leurs sacrifices, soutien, confiance, compréhension et amour. Vous êtes les êtres les plus chers à mon cœur, aucun mot ne pourra exprimer ma gratitude et mon estime pour vous.*

*A mes très chers frères : **Youcef, Houcine, Bilal***

*A toute la famille **NABTI, ZEGADI***

*A tous mes amis et en particulier ma chère amie **Soumia** et à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.*

Fatima

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents,

en guise de gratitude pour tous leurs sacrifices, soutien, confiance, compréhension et amour. Vous êtes les êtres les plus chers à mon cœur, aucun mot ne pourra exprimer ma gratitude et mon estime pour vous.

*A ma chère sœur et cher frère : **SALSABIL et MOHAMED***

*A mon mari **MARWAN**, qui m'a toujours encouragé et qui a été compréhensif et patient.*

*A toute la famille **BENMESSAHEL, BELHADAD et LOUASSA.***

*A tous mes amis et en particulier ma chère amie **Soumia** et A toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.*

Manal

Sommaire

Liste des tableaux	
Listes des figures	
Liste des Abréviations	
Résumé	
Abstract	
المخلص	
Introduction	1
	2
I. La matière lignocellulosique	
I.1. Structure de la biomasse lignocellulosique.....	3
I.2. Sources de la matière lignocellulosique	4
I.2.1. Les algues marines.....	4
I.2.2. Résidus agricole et déchets municipaux.....	5
I.2.3. Matières premières forestières.....	5
I.3. Les compositions	5
I.3.1. La cellulose.....	5
I.3.2. L'hémicellulose.....	6
I.3.3. La lignine.....	7
I.4. Valorisation de la matière lignocellulosique	7
I.5. Prétraitement de la matière lignocellulosique	8
I.5.1. Prétraitement physique.....	9
I.5.2. Prétraitement chimique.....	10
I.5.3. Prétraitement physico-chimique.....	11
I.5.4. Prétraitement biologique.....	12
I.6. Hydrolyse de la matière lignocellulosique	13
I.6.1. Hydrolyse acide.....	13
I.6.2. Hydrolyse enzymatique.....	13
II. Le bioéthanol	
II.1. Généralité.....	15
II.2. Propriété physico-chimique de bioéthanol.....	4
II.3. Les voies de production de bioéthanol	16
II.3.1. La voie thermochimique.....	16

II.3.1.1. La pyrolyse.....	16
II.3.1.2. La gazéification.....	17
II.3.2. La voie biochimique.....	17
II.4. Les microorganismes producteurs de bioéthanol.....	17
II.4.1. Les levures.....	17
II.4.2. Les bactéries.....	19
II.5. Les matières premières utilisées pour la production de bioéthanol.....	20
II.5.1. Les plantes amylacées.....	20
II.5.2. Les plantes sucrières.....	21
II.5.3. La biomasse lignocellulosique.....	21
II.6. Génération de bioéthanol.....	22
II.6.1. Bioéthanol de première génération.....	22
II.6.2. Bioéthanol de deuxième génération.....	23
II.6.3. Bioéthanol de troisième génération.....	24
II.6.4. Bioéthanol de quatrième génération.....	24
II.7. Utilisation de bioéthanol.....	25
II.8. Récupération de bioéthanol.....	26
II.9. Les avantages et les inconvénients de bioéthanol.....	27
II.9.1. Les avantages.....	27
II.9.2. Les inconvénients.....	27
III. Procédés de production de bioéthanol	
III.1. Généralités.....	28
III.2. Préparation de préculture.....	29
III.3. Préparation de la matière lignocellulosique.....	29
III.4. Préparation de milieu de production.....	30
III.5. Fermentation.....	30
III.6. L'analyse de bioéthanol.....	30
III.7. Résultats et discussion	30
Conclusion	32
Références bibliographiques	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I	Teneurs en cellulose, hémicelluloses et lignine de diverses biomasses lignocellulosiques	3
Tableau II	Propriété physico-chimiques de l'éthanol	16
Tableau III	Souche de levures produisant l'éthanol comme produit majeur de fermentation	18
Tableau IV	Souche de bactéries produisant l'éthanol comme produit majeur de fermentation	20

LISTE DES FIGURES

Figure 1	La structure de la paroi cellulaire de la biomasse lignocellulosique	4
Figure 2	Structure chimique de cellulose	6
Figure 3	Structure chimique de l'hémicellulose	6
Figure 4	Structure de la lignine	7
Figure 5	Valorisation de la biomasse lignocellulosique	8
Figure 6	L'effet de prétraitement sur la biomasse lignocellulosique	9
Figure 7	La structure d'éthanol	15
Figure 8	Utilisation du glucose par <i>Saccharomyces</i> sous conditions anaérobies	19
Figure 9	Schéma explicatif de production du bioéthanol à partir de plusieurs sucres	22
Figure 10	Illustration de processus de production de bioéthanol de deuxième génération	23
Figure 11	Génération de bioéthanol	25
Figure 12	Utilisation potentielle du bioéthanol	26
Figure 13	Schéma simplifié de la production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique	29

Liste des abréviations :

AFEX : l'explosion de fibres d'ammoniac

BLC : biomasse lignocellulosique

ETBE : éthyl tertiobutyle éther

HMF : Hydroxy méthyl furfural

T⁰ : température

LI : liquide ionique

ملخص

بشكل عام ، توفر صناعة الأغذية الزراعية ومعالجة النباتات كميات كبيرة من البقايا العضوية الليجنوسيليلوزية التي يتم استغلالها بشكل سيئ. الغرض من هذا العمل هو إجراء دراسة نظرية ول تثمين هذه الكتلة الحيوية لإنتاج الإيثانول الحيوي من الجيل الثاني. الكتلة الحيوية الليجنوسيليلوزية عبارة عن مادة معقدة تتكون من السليلوز، الهيميسليلوز واللجنين. تحويل الكتلة الحيوية ليجنو سيليلوز إلى إيثانول يتم عن طريق التحويل البيولوجي وعادة ما تكون هناك حاجة إلى عملية نموذجية لتحويل السكريات الهيكلية لجدار الخلية النباتية بشكل كافٍ إلى الإيثانول الحيوي. تتمثل مراحل هذه العملية في المعالجة المسبقة ، التحلل المائي الحمضي و / أو الأنزيمي ، التخمر والتقطير.

يتم تخمير ناتج التحلل المائي للكتلة الحيوية الليجنوسيليلوزية بواسطة كائنات دقيقة مختلفة ، من بينها *Saccharomyces cerevisiae* و *Zymomonas mobilis* و *Escherichia coli*. تعتبر *Saccharomyces cerevisiae* الكائن الدقيق الأنسب لإنتاج الإيثانول، و من أجل تحسين إنتاج الإيثانول يجب دراسة العوامل المختلفة المؤثرة على عملية التخمر الكحولي والتحكم فيها.

تم إجراء العديد من الدراسات حول إنتاج الإيثانول الحيوي بواسطة *Saccharomyces cerevisiae* من كتل حيوية ليجنوسيليلوزية مختلفة مثل النفايات الورقية. أظهرت نتائج هذه الدراسات أن ناتج التحلل المائي للمواد الليجنوسيليلوزية ملائمة للنمو وإنتاج الإيثانول الحيوي.

الكلمات المفتاحية: الإيثانول الحيوي ، التخمر ، مادة الليجنوسيليلوز ، المعالجة المسبقة ، خميرة الخبز

Résumé

L'industrie agroalimentaire et de transformation des plantes fournissent des quantités importantes de déchets lignocellulosiques qui sont mal exploitées. Le but de ce travail est de faire une étude bibliographique sur la valorisation de cette biomasse pour la production de bioéthanol de deuxième génération. La biomasse lignocellulosique est un substrat complexe et composée de structures polymériques de la cellulose, l'hémicellulose et de la lignine. La conversion de la biomasse lignocellulosique en éthanol se fait par la voie de conversion biologique. Un processus typique est habituellement nécessaire pour convertir suffisamment les sucres structuraux de la paroi cellulaire végétale en bioéthanol: prétraitement, hydrolyse acide et/ou enzymatique, fermentation et distillation.

L'hydrolysat de la biomasse lignocellulosique est fermenté par différents microorganismes, parmi lesquelles on peut citer: *Saccharomyces cerevisiae*, *Escherichia coli* et *Zymomonas mobilis*. *Saccharomyces cerevisiae* est le microorganisme le mieux adapté à la production d'éthanol. Différents paramètres influent la fermentation de bioéthanol doit être étudié et contrôlé afin d'améliorer la production.

Plusieurs études ont été réalisées sur la production de bioéthanol par *Saccharomyces cerevisiae* à partir de différentes biomasses lignocellulosiques tel que les déchets de papier. Les résultats de ces études ont montré que l'hydrolysat de la matière lignocellulosique est favorable à la croissance et à la production de bioéthanol.

Mots clés: Bioéthanol, fermentation, matière lignocellulosique, prétraitement, *Saccharomyces cerevisiae*

Abstract

The agri-food and plant processing industry provides large quantities of lignocellulosic waste which is poorly exploited. The purpose of this work is to make a bibliographic study on the valorization of this biomass for the production of second-generation bioethanol. Lignocellulosic biomass is a complex substrate and composed of polymeric structures of cellulose, hemicellulose and lignin. The conversion of lignocellulosic biomass into ethanol occurs through the biological conversion pathway. A typical process is usually required to sufficiently convert the structural sugars of the plant cell wall in bioethanol pretreatment, acid and/or enzymatic hydrolysis, fermentation and distillation.

The hydrolyzate of the lignocellulosic biomass is fermented by different microorganisms, among which we can mention: *Saccharomyces cerevisiae*, *Escherichia coli italique* and *Zymomonas mobilis*. *Saccharomyces cerevisiae* is the microorganism best suited to the production of ethanol. Different parameters influencing the fermentation of bioethanol must be studied and controlled in order to improve production.

Several studies have been carried out on the production of bioethanol by *Saccharomyces cerevisiae* from different lignocellulosic biomass such as waste paper. The results of these studies have shown that the hydrolyzate of lignocellulosic material is favorable to growth and to the production of bioethanol.

Keywords: Bioethanol, fermentation, lignocellulosic material, pretreatment, *Saccharomyces cerevisiae*

INTRODUCTION

INTRODUCTION

L'augmentation du développement industriel, du transport et de la demande d'énergie a provoqué un intérêt accru pour les carburants renouvelable. Notamment, une augmentation croissante du nombre de voitures dans le mode induit une augmentation des émissions de carbone. Les véhicules à moteur contribuaient à plus de 70% des émissions mondiales de monoxyde de carbone et à 19% des émissions mondiales de dioxyde de carbone (**Edeh, 2020**). Le changement climatique est l'un des plus grands défis de notre temps. Il est toutefois important d'assurer l'accès à l'énergie pour promouvoir la qualité de vie et le développement économique. Actuellement, La production d'énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole) représente encore aujourd'hui plus de 80% de la production totale d'énergie primaire dans le monde. Or, les réserves énergétiques de la planète ne sont pas inépuisables. Il est donc essentiel de faire substituer ses ressources par d'autres renouvelables inoffensifs. Les progrès actuels dans le développement de nouvelles technologies ont donné l'assurance et l'espoir que les objectifs seront atteints dans le domaine de l'énergie.

Le bioéthanol est un biocarburant renouvelable dérivé de matières premières biologiques. Il est considéré comme une ressource énergétique qui peuvent souvent remplacer les combustibles fossiles (**Devi et al., 2022**). La production mondiale de bioéthanol atteint 110 milliards de litres en 2018 et elle devrait passer le 140 milliards de litre en 2022 (**Edeh, 2020**).

La biomasse lignocellulosique est une des principales ressources renouvelables présentes sur terre. Elle est composée essentiellement de trois polymères (la cellulose, l'hémicellulose et la lignine). En effet, cette biomasse peut fournir du bioéthanol après plusieurs étapes de prétraitement et d'hydrolyse physique, chimique et biologique (**Ogier, 1999**).

Ces prétraitements permettent une hydrolyse complète ou presque complète des hémicelluloses en plus d'une déstructuration de la biomasse, mais ils ne permettent qu'une hydrolyse partielle de la cellulose. Le jus ainsi hydrolysé est ensuite fermenté en conditions anaérobiques.

Plus que jamais, la recherche visant à développer de nouvelles technologies de production d'éthanol carburant à partir de matières premières non alimentaires (biomasse lignocellulosique) est un enjeu majeur pour la société comme pour la communauté scientifique.

INTRODUCTION

L'objectif principal de cette étude bibliographique s'insère sur la valorisation de la matière lignocellulosique en tant que matière première bon marché pour la production de bioéthanol.

CHAPITRE I :
LA MATIERE
LIGNOCELLULOSIQUE

I.1. Structure de la biomasse lignocellulosique

La matière lignocellulosique est un constituant principal de la paroi cellulaire des plantes. Elle est la source renouvelable la plus abondante de la planète (**O'donohue et Debeire, 2006**). C'est une matière complexe se compose de trois composants de base (**figure 1**): la cellulose, l'hémicellulose et la lignine et d'autres composants comme la pectine, les protéines, les extractives et des composés minéraux qui sont également présentent avec des quantités faible. La cellulose et l'hémicellulose représentent 70 à 80 % du poids sec, alors que la lignine représente environ 10 à 25 % (**Devi et al., 2022**).

La proportion et la nature de chacune de ces macromolécules en fonction de l'origine botanique de cette matières ont représentées dans le **tableau I** (**O'donohue et Debeire, 2006**).

Tableau I: Teneurs en cellulose, hémicelluloses et lignine de diverses biomasses lignocellulosiques (**Godin et al., 2010**)

BLC	Cellulose (kg.100 kg ⁻¹ MS)	Hemicellulose (kg.100 kg ⁻¹ MS)	Lignine (kg.100 kg ⁻¹ MS)
Bagasse de canne à sucre	40,1 ± 6,7	26,3 ± 6,3	17,9 ± 6,8
Fétuque	33,3 ± 2,7	30,4 ± 1,8	6,5 ± 2,2
Miscanthus	44,0 ± 4,8	25,4 ± 2,2	20,4 ± 4,8
Paille d'avoine	35,5 ± 4,6	24,3 ± 6,5	13,7 ± 4,0
Paille de blé	36,6 ± 5,7	29,8 ± 7,7	16,9 ± 4,7
Paille de maïs grain	37,3 ± 5,1	25,4 ± 4,3	15,8 ± 3,6
Paille d'orge	40,4 ± 7,8	25,6 ± 5,1	12,7 ± 3,6
Maïs fibre	38,3 ± 3,8	27,4 ± 1,2	7,3 ± 1,6
Peuplier	42,0 ± 2,9	22,0 ± 6,2	24,8 ± 3,8
Saule	46,5 ± 13,5	18,5 ± 6,4	20,0 ± 1,4

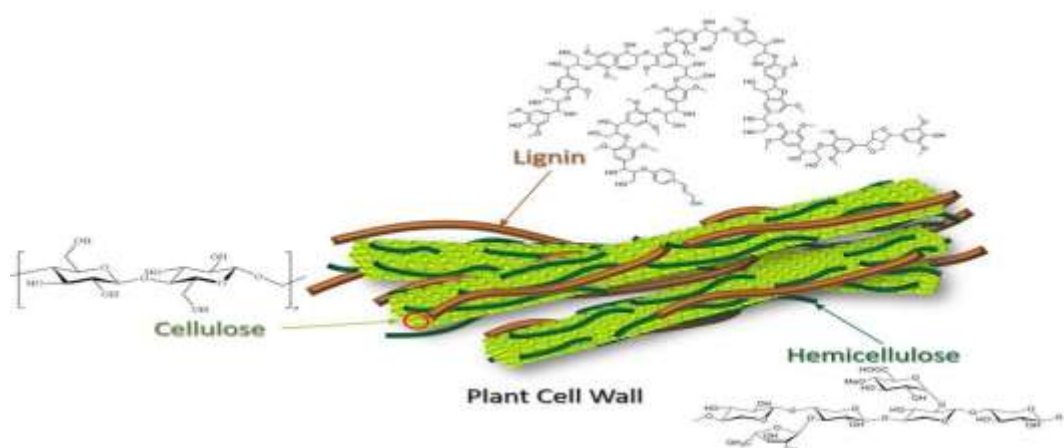


Figure 1: Structure de la paroi cellulaire de la biomasse lignocellulosique (**Jensen *et al.*, 2017**)

I.2. Sources de la matière lignocellulosique

Les sources lignocellulosiques sont les plus importantes sources renouvelable au monde pour la production de bioéthanol et peuvent être divisées en trois principaux types : (1) algues marines, (2) résidus agricoles et déchets solides municipaux (3) et matière première forestière.

I.2.1. Les algues marines

Les algues marines sont considérées comme une nouvelle alternative prometteuse pour la production de bioéthanol. Elles constituent une source de biomasse renouvelable, dont le principal avantage est sa croissance durable. Elles contiennent également une teneur élevée en glucides de sorte qu'il est en mesure de produire environ 60 fois plus d'alcool que d'autres produits agricoles (**Phwan *et al.*, 2018**). Malgré ça, elles font encore face à des défis tels que leur coût élevé de prétraitement. Cela est due aux polymères d'eau présentes dans la cellule qui rendent les parois d'algues plus solides pour les décomposer au cours de traitement.

Généralement les macro-algues se composent de 25 à 60% des sucres, de 5 à 20% des protéines et de 0,5 à 5% des lipides et d'environ 15 à 40% des cendres.

Plusieurs souches de micro algues peuvent accumuler 30% de leur biomasse sèche sous forme de lipides, par contre d'autres souches peuvent accumuler 70% sous forme des sucres. Cela rend les micro algues une matière première attractive pour différents processus de fermentation pour la production des biocarburants (**Smachetti *et al.*, 2018**).

Elles ont aussi la capacité de croître rapidement et de convertir efficacement la lumière solaire et le CO₂ en biomasse algale. Certaines espèces comme : *Synechococcus*, ont une teneur élevée en gras donc il s'avère que la paroi cellulaire se décompose rapidement par rapport aux grandes algues (Vasić *et al.*, 2021).

I.2.2. Résidus agricoles et déchets municipaux

La paille de blé, le riz et les tiges de maïs sont des matières premières approuvées pour la production de bioéthanol, car ils contiennent 35% de la matière cellulaire sous forme de résidus agricoles. Elles sont bénéfiques pour l'environnement parce qu'elles aident à prévenir la déforestation. Plus de 200 milliards de litres de biocarburants peuvent être produits chaque année à partir de paille de riz. Les déchets solides municipaux réduisent les problèmes environnementaux en éliminant les déchets ménagers (Nikku *et al.*, 2019).

I.2.3. Matières premières forestières

Pour produire du bioéthanol, il existe deux types de matières premières forestières : (1) le bois dur comme le chêne et le saule, (2) les résineux comme le pin, l'épinette et le peuplier. Le bois de coton est une matière première plus appropriée pour la production de bioéthanol parce que c'est un arbre plus productif (Carević *et al.*, 2020).

I.3. la composition de la matière lignocellulosique

I.3.1. La Cellulose

La cellulose est la composante importante de la biomasse lignocellulosique. Elle représente d'environ 30 à 50 % de la matière sèche totale de lignocellulose. C'est une composante linéaire composée de monomères β -D glucopyranose de glucose à longue chaîne liés par des liaisons β -(1,4)-glycosidiques, l'unité répétitive dans la cellulose est la cellobiose, un disaccharide se compose de deux molécules de glucose (Devi *et al.*, 2022). Les chaînes celluloses sont composées d'environ 1000 unités de D-glucose, qui sont disposées en microfibrilles. Ces fibrilles forment une matrice lignocellulosique avec des liaisons hydrogène, ce qui rend sa structure très résistante, solide et compacte. La cellulose est organisée par des liaisons d'hydrogène intramoléculaires, ainsi que des forces van der Waals, ce qui la rend cristalline. Lorsque des liaisons plus faibles se produisent dans la structure, la structure de la cellulose est amorphe (**figure 2**). La cellulose a un degré élevé de polymérisation, en raison de

laquelle elle a une faible fébrilité et donc insoluble dans l'eau et la plupart des solvants (Vasić *et al.*, 2021).

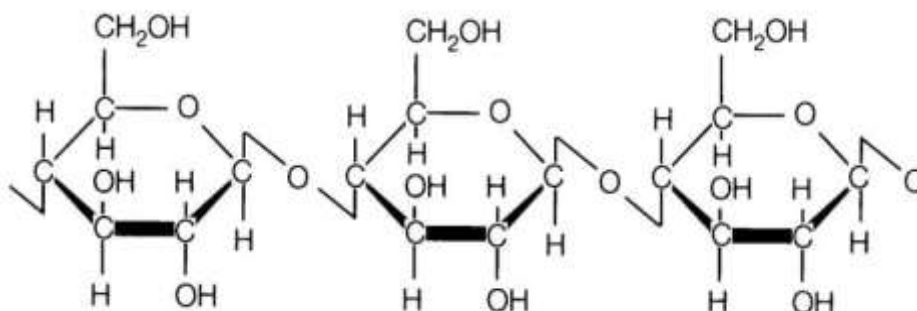


Figure 2: Structure chimique de la cellulose (Kulkarni *et al.*, 2012)

I.3.2. L'hémicelluloses

L'hémicellulose est une structure hétérogène de polymères qui contient différentes sous-unités monosaccharidiques, dont le D-glucose, le D-mannose, le D-galactose, D-xylose et l'arabinose, ainsi que d'autres acides sucriers tels que les acides D-galacturoniques et glucuronique (figure 3). La structure de l'hémicellulose est amorphe et n'est pas physiquement forte, facilement hydrolysée par les enzymes. Grâce aux esters aromatiques, les hémicellulose peuvent également liés à la lignine, ainsi qu'aux celluloses avec des liaisons hydrogène, fournissant ainsi une liaison entre la cellulose et la lignine (Vasić *et al.*, 2021).

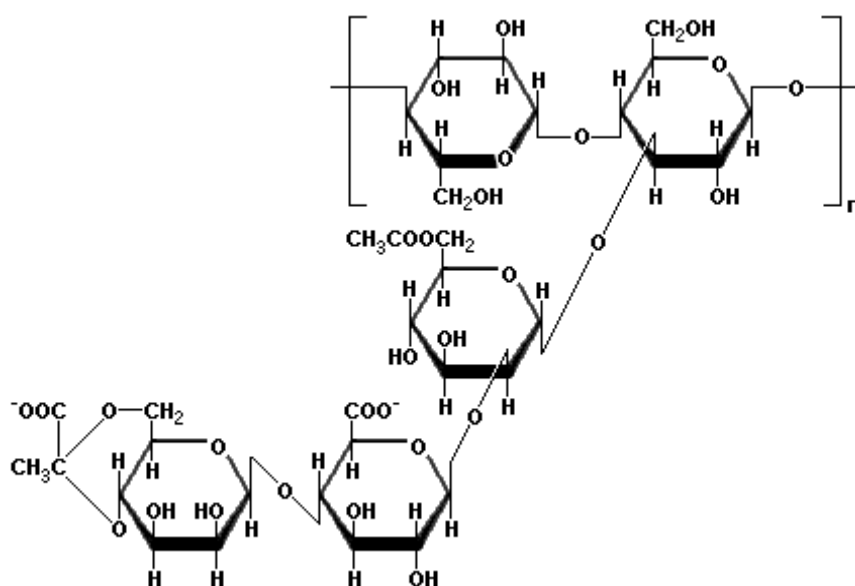


Figure 3: Structure chimique de l'hémicellulose (Kulkarni *et al.*, 2012).

I.3.3. La lignine

Elle s'agit d'un polymère phénolique tridimensionnel d'unités phénylpropanoïdes. Elle représente d'environ 15 à 20 % des matières premières. On la trouve dans la paroi cellulaire secondaire et elle agit comme un adhésif cellulaire. Le polymère de lignine se compose de trois sous-unités monomériques de phénylpropanoïdes: guaiacyle (G), syringyle (S) et p-hydroxyphényl (H) (figure 4) (Devi *et al.*, 2021).

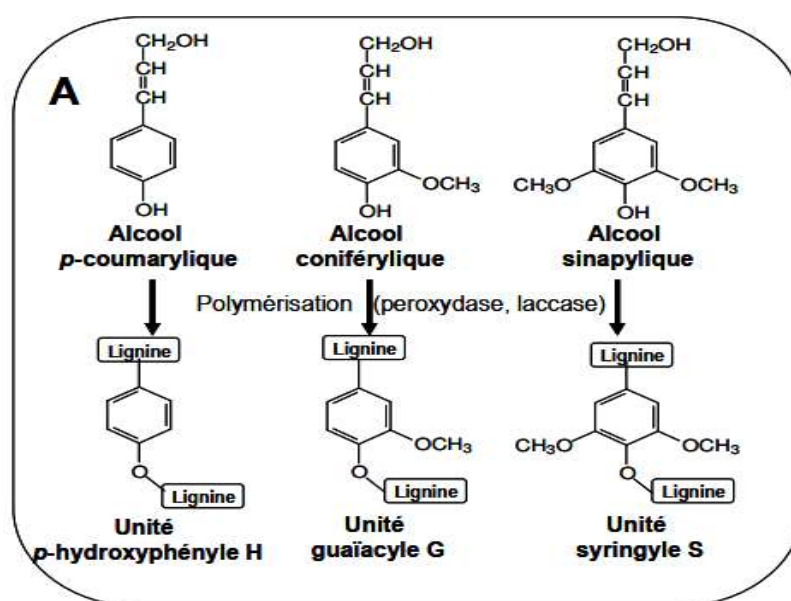


Figure 4: Structure chimique de la lignine (Lapierre, 2010).

I.4. Valorisation de la matière lignocellulosique

Les matières premières lignocellulosiques gagnent en popularité pour de nouvelles applications industrielles en raison de leur disponibilité et de leur biorenouvelabilité. L'utilisation de matériaux lignocellulosiques, en particulier issus des secteurs agricole et forestier, pourrait contribuer à réduire la dépendance excessive aux ressources pétrochimiques tout en offrant une alternative durable de gestion des déchets. De nombreuses nouvelles applications industrielles de la biomasse lignocellulosique sont illustrés dans (la figure 5), notamment le bioraffinage pour la production de biocarburants et biochimiques, les produits biomédicaux, cosmétiques, pharmaceutiques, les bioplastiques, les matériaux carbonés

multifonctionnels et d'autres produits spécialisés respectueux de l'environnement (Okolie *et al.*, 2021).

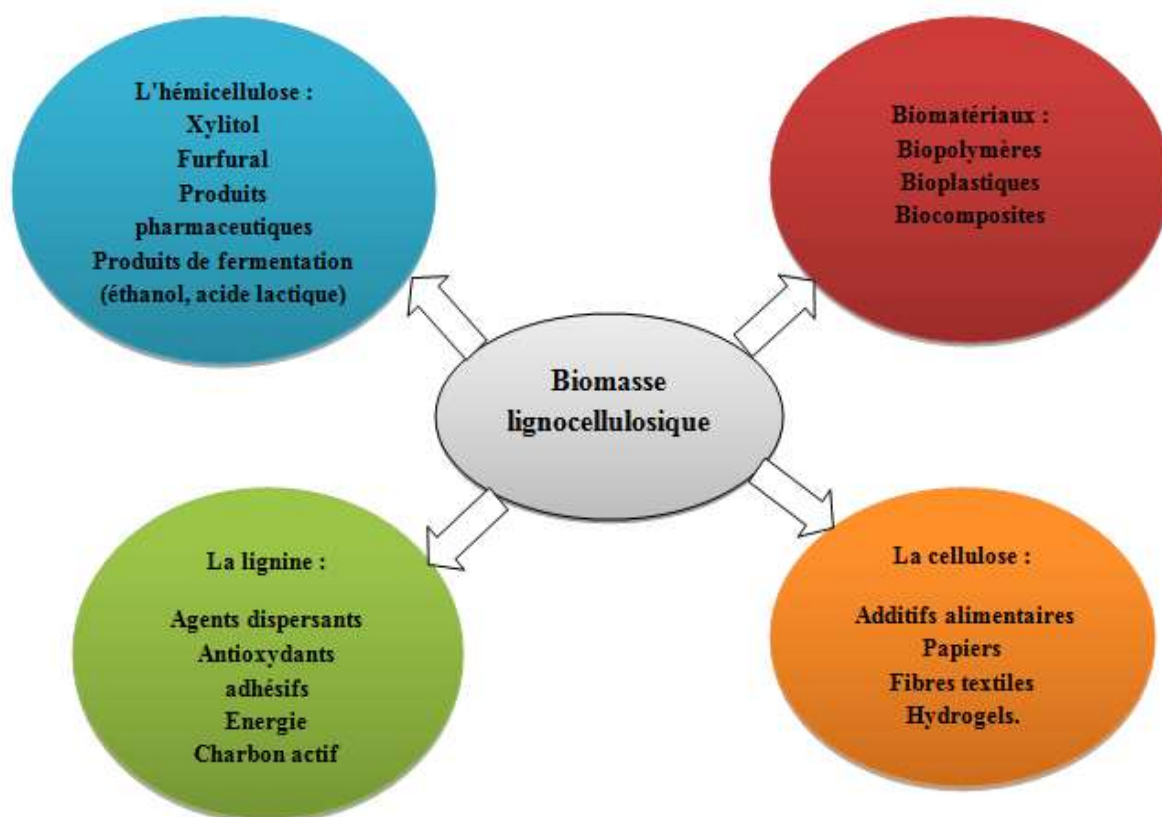


Figure 5 : Valorisation de la biomasse lignocellulosique.

I.5. Prétraitement de la matière lignocellulosique

Comme la structure de la biomasse lignocellulosique est complexe, elle a besoin des prétraitements spécifiques pour l'ouvrir afin de récupérer des sucres simples fermentescibles (figure 6). Il existe quatre types de prétraitement: les méthodes physiques, chimiques, physicochimiques et biologiques.

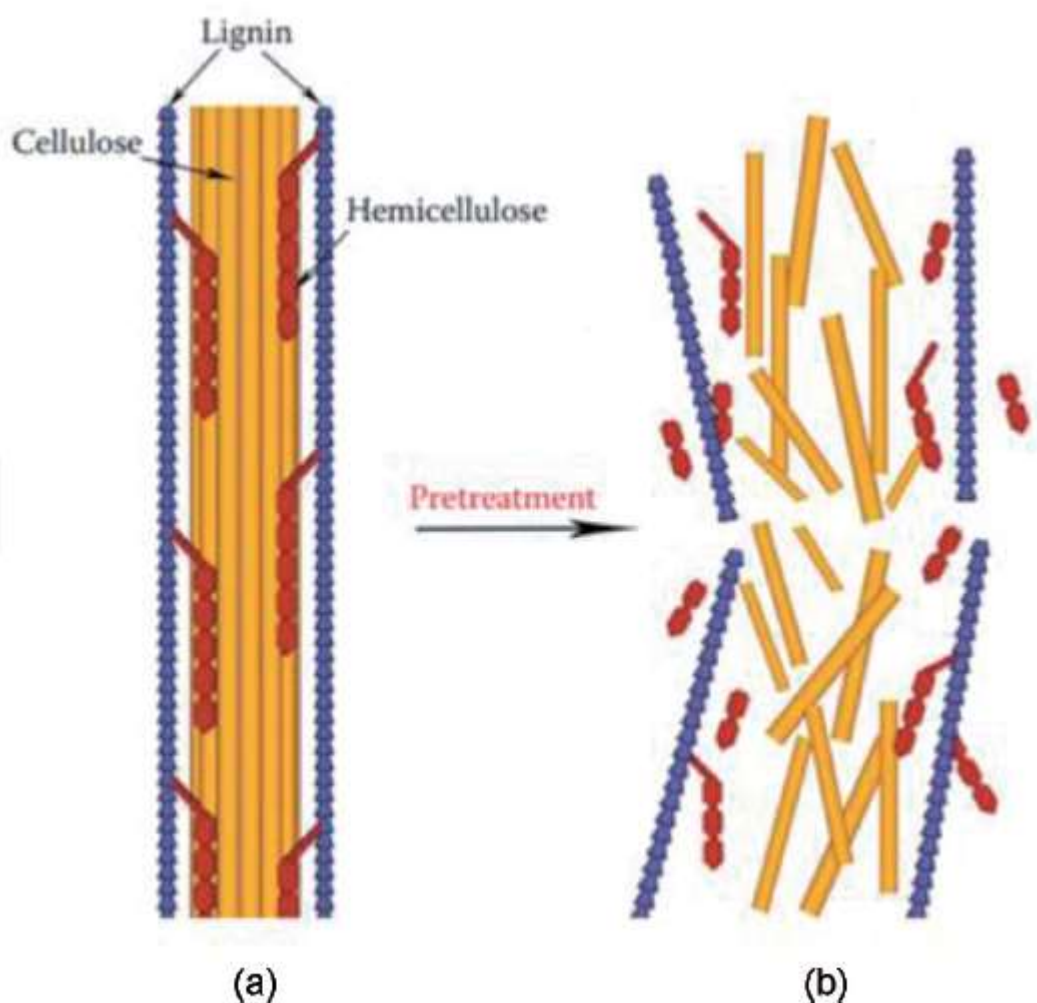


Figure 6 : L'effet de prétraitement sur la biomasse lignocellulosique (a) la biomasse lignocellulosique avant le prétraitement (b) la biomasse lignocellulosique après le prétraitement (Edeh, 2020)

I.5.1. Prétraitement physique

Le prétraitement physique (mécanique) comprend le broyage (par ex. broyage à deux cylindres, broyage à billes ou à marteaux et broyage colloïdale ou vibroénergétique), l'irradiation (rayons gamma, faisceau d'électrons, micro-ondes) et d'autre méthode (par ex. Hydrothermique, expansion, extrusion ou pyrolyse). Après prétraitement physique, la réduction de la taille des particules et de la cristallinité de la biomasse lignocellulosique a un impact sur l'augmentation de la surface spécifique et la réduction du degré de polymérisation. Cependant, la taille des particules doit être optimisée (les très petites particules ne sont pas souhaitables) en raison de la forte consommation d'énergie lors du broyage et de l'impact

négatif sur le prétraitement. Bon nombre méthodes physiques de réduction de taille mentionnées ne sont pas économiquement réalisables en raison des demandes énergétiques très élevées (Bušić *et al.*, 2018 ; Huang *et al.*, 2019 ; Meng et Wang., 2020; Devi *et al.*, 2022).

I.5.2. Prétraitement chimique

Prétraitement chimique comprenant un traitement acide (acide sulfurique, chlorhydrique, phosphorique ou nitrique), alcalin (hydroxyde de sodium ou de potassium, ammoniac ou sulfite d'ammonium) ou gazeux (dioxyde de chlore, dioxyde d'azote ou dioxyde de soufre) ainsi que l'ajout d'agent oxydants (oxygène, ozone, peroxyde d'hydrogène), liquide ioniques (liquide ionique à base d'imidazolium) et Organosolv (méthanol, éthanol, acétone, glycérol, éthylène glycol, etc.).

L'objectif principal de l'utilisation d'un prétraitement acide est de solubiliser l'hémicellulose, rendant la cellulose plus accessible aux enzymes. Les prétraitements acides utilisent des acides concentrés ou dilués (Tomas-Pejo *et al.*, 2011). Cependant, les acides concentrés (H_2SO_4 ou HCl) sont de bons agents d'hydrolyse avec des caractéristiques corrosives et dangereuses (Sun et Cheng, 2002). Le principal inconvénient de l'hydrolyse acide est la formation d'inhibiteurs, car les sucres fermentescibles libérés peuvent être décomposés en furfural (à partir des pentoses) et en HMF (à partir des hexoses). Ces composés sont des inhibiteurs de la croissance de cellules de levure qui ont un impact négatif sur l'efficacité de la production de bioéthanol (par ex. réduction de la croissance des levures, du rendement en éthanol et de la productivité) (Bušić *et al.*, 2018).

Pour le prétraitement alcalin des matières premières lignocellulosiques, on utilise le plus souvent $NaOH$, KOH , $Ca(OH)_2$ et NH_4OH . Dans ce prétraitement une température et une pression plus basses que dans les autres méthodes de prétraitement sont appliquées (Mosier *et al.*, 2005). Le prétraitement alcalin augmente la digestibilité de la cellulose et est plus efficace pour la solubilisation de la lignine (Carvalho *et al.*, 2008). Cependant, le coût élevé des alcalis est l'un des principaux inconvénients. L'ozonolyse réduit la teneur en lignine (l'hémicellulose est légèrement affectée, tandis que la cellulose ne l'est pas) et ne produit pas de résidus toxiques, mais des demandes plus importantes en ozone rendent cette méthode très coûteuse (Devi *et al.*, 2022). L'utilisation de liquides ioniques (LI), des sels généralement composés de gros cations organiques et de petits anions inorganiques, comme solvants pour le

prétraitement des matières premières lignocellulosiques a également été étudié de manière intensive (Tsegaye *et al.*,2020).

L'Organosolv est basé sur l'utilisation de solvants organiques ou aqueux (ex. éthanol, méthanol, acétone et éthylène glycol) pour extraire la lignine et assurer une cellulose plus accessible (Bušić *et al.*, 2018).

I.5.3. Prétraitement physicochimique

Les prétraitements physicochimiques comprennent l'oxydation par voie humide, l'explosion (explosion à la vapeur, explosion de fibre d'ammoniac, explosion de CO₂, explosion de SO₂), les micro-ondes, les ultrasons et le prétraitement à l'eau chaude liquide. L'explosion à la vapeur consiste à traiter la biomasse du sol avec de la vapeur saturée à haute pression, puis la pression est rapidement relâchée, ce qui provoque une décompression explosive de la biomasse. Au cours de ce prétraitement, l'hémicellulose et la lignine sont dégradées. Ce prétraitement est rentable, mais il détruit également une partie de la fraction xylane. Au cours de l'explosion à la vapeur, une perturbation incomplète de la matrice lignine-glucide et la génération d'inhibiteurs microbiens se sont également produites. L'explosion de fibres d'ammoniac (AFEX) est un prétraitement important qui utilise des processus physique (haute température et pression) et chimiques (ammoniac) pour obtenir une hydrolyse efficace des matières premières. AFEX augmente l'accessibilité de la surface pour l'hydrolyse, favorise la décristallisation de la cellulose et la dépolymérisation partielle de l'hémicellulose et réduit la récalcitrance de la lignine dans les matières premières traitée. Cependant, ce procédé n'est pas efficace pour la biomasse à forte teneur en lignine (Bušić *et al.*, 2018 ; Semwal *et al.*, 2019)

Les fluides supercritiques sont des substances gazeuses comprimées à des températures supérieures à leur point critique à une densité de type liquide. L'eau, le dioxyde de carbone et l'ammoniac sont les substances les plus utilisées sous formes supercritique. Le CO₂ supercritique sert principalement comme solvant d'extraction car il est non toxique, ininflammable, peu couteux et facilement disponible, et il ne provoque pas la formation de composées inhibiteurs. Dans l'explosion au CO₂ supercritique, la libération explosive de la pression de CO₂ perturbe les fractions de cellulose et d'hémicellulose et augmente par conséquent la surface accessible du substrat pour les enzymes (Bušić *et al.*, 2018 ;Devi *et al.*,2022).

Les micro-ondes ont également une application dans le prétraitement des matières premières contenant de la lignocellulose. De nombreuses recherches ont souligné que les micro-ondes provoquent un échauffement localisé de la matière première, entraînant une perturbation de la structure de la lignocellulose, rendant la cellulose et l'hémicellulose plus accessibles pour l'hydrolyse enzymatique (**Sarkar *et al.*, 2012 ; Bušić *et al.*, 2018**).

Le traitement par ultrasons des solutions a une utilisation potentielle en tant que technologie alternative, et il a été utilisé pour l'extraction de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine. Les ondes ultrasons créent des différences de pression (cavitation) dans une solution pour l'amélioration des processus physique et chimiques (**Bussemaker et Zhang., 2020 ; Bušić *et al.*, 2018**).

I.5.4. Prétraitement biologique

Par rapport à la plupart des autres prétraitements utilisés, les prétraitements biologiques sont considérés comme des processus respectueux de l'environnement, car ils n'utilisent pas de produits chimiques, l'apport d'énergie est relativement faible, il n'y a pas de problèmes liés à la corrosion, pas de flux de déchets et de production d'inhibiteurs. Dans ces prétraitements, des microorganismes tels que les champignons de la pourriture brune, blanche et molle dégradent la lignine et l'hémicellulose, mais ils ne sont pas efficaces pour dégradé la cellulose. Cependant, le taux d'hydrolyse de la lignocellulose dans les processus est très faible (**Devi *et al.*, 2022**).

Le prétraitement biologique comprend également l'utilisation d'enzyme pour l'hydrolyse des matières lignocellulosique brutes. L'efficacité globale du bioprocédé dépend du taux d'hydrolyse de la matière première lignocellulosique en sucres fermentescibles (**Binod *et al.*, 2010**). Les cellulases effectuent une hydrolyse enzymatique de la cellulose, de sorte que des levures ou des bactéries peuvent ensuite fermenter les sucres réducteurs obtenus en éthanol. Dans l'hydrolyse de la cellulose, au moins trois grands groupes de cellulases participent : les endoglucanases (régions d'attaque de faible cristallinité dans la fibre de cellulose créant des extrémités de chaîne libres), les exoglucanases (cellobiohydrolases ; dégradent davantage la molécule en éliminant les unités de cellobiose des extrémités de chaîne libres) et les β -glucosidases (hydrolysent le cellobiose pour produire du glucose (**Prasad *et al.*, 2007**).

Le prétraitement biologique a des avantages par rapport à d'autres méthodes qui comprennent moins d'intrants énergétiques et de produits chimiques agressifs inutiles. Le temps reste le principal inconvénient dans ce processus. Il agit comme une barrière à son utilisation à l'échelle commerciale (**Devi et al.,2022**).

I.6.Hydrolyse de la matière lignocellulosique

Au cours de cette étape, les polysaccharides présents dans les matières premières sont hydrolysés en sucres monosaccharides à l'aide des acides, des bases et des enzymes.

I.6.1.Hydrolyse acide

L'avantage de l'hydrolyse acide est qu'il peut percer la lignine dans LCB sans prétraitement. Le procédé se dissocie de la cellulose et des hémicelluloses en molécules de sucre individuels. Les acides couramment utilisés pour l'hydrolyse est l'acide chlorhydrique et l'acide sulfurique. Cette méthode est réalisée par l'hydrolyse avec de l'acide qui a une concentration plus élevée à température modérée ou un acide dilué à une température élevée. L'hydrolyse acide concentrée a un rendement élevé d'hydrolyse de la cellulose (**Devi et al., 2022**).

I.6.2.Hydrolyse enzymatique

Dans le cas de l'hydrolyse enzymatique, un mélange de différentes enzymes extraites de micro-organismes sont utilisés pour hydrolyser la cellulose et l'hémicellulose (**Busić et al.,2018**). L'hydrolyse enzymatique peut être en fait divisée en deux étapes : primaire et secondaire. L'étape d'hydrolyse primaire implique l'action des endoglucanases et des exoglucanases à la surface du substrat solide, entraînant la libération d'oligosaccharides (jusqu'à 6 unités de glucose en chaîne) en phase liquide. L'étape d'hydrolyse secondaire comprend une hydrolyse supplémentaire des oligosaccharides en cellobiose (par la cellobiohydrolases) et en glucose (par les β -glucosidases) (**Devi et al., 2022**).

L'accessibilité de la cellulose à l'hydrolyse enzymatique dépend de l'élimination du xylane de la lignocellulose en utilisant des xylanases. Le xylane n'a pas la structure cristalline serrée comme la cellulose et il est donc plus sensible à l'hydrolyse enzymatique. Plusieurs espèces de bactéries et de champignons sont capables de produire des cellulase et des hémicellulases. Parmi ces microorganismes, *Trichoderma reesei* a été mentionné comme l'organisme le plus efficace pour l'hydrolyse de la cellulose (**Singh et al., 2011**).

La lignine est étroitement liée à la cellulose et n'est donc pas accessible aux cellulases. La principale caractéristique de la dégradation de la lignine est l'action des peroxydases où la lignine peroxydase (également appelée ligninase) et le manganèse peroxydase (également appelée peroxydase Mn-dépendante) sont les deux enzymes majeurs (Bušić *et al.*, 2018). La conversion de la cellulose et de l'hémicellulose est fournie dans les réactions (i) et (ii) dans lequel le glucane (pour les hexoses) et le xylane (pour les pentoses) réagissent avec l'eau (Devi *et al.*, 2018) :



L'hydrolyse enzymatique est hautement spécifique et se produit dans des conditions de réaction plus douces (par ex. pH=5 et température inférieure à 50 °C) avec une consommation d'énergie et un impact environnemental inférieurs à ceux de l'hydrolyse acide de la lignocellulose. Il donne également un rendement élevé en glucose avec une faible formation de sous-produits, ce qui est favorable à une utilisation ultérieure de l'hydrolysats en fermentation. L'hydrolyse enzymatique ne cause pas de problème de corrosion (Bušić *et al.*, 2018).

CHAPITRE II :

LE BIOETHANOL

II.1. Généralités

L'éthanol, ou alcool éthylique, est un composant chimique formé de carbone, d'hydrogène et d'oxygène ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$) (**figure 7**). Le bioéthanol, une ressource renouvelable considérée comme une alternative aux combustibles fossiles qui s'épuisent. C'est un carburant de rechange pour l'essence. Le bioéthanol est de l'éthanol élaboré à partir de biomasse végétal. Il est obtenu par fermentation des sucres fermentescibles (hexoses – sucres à six carbones) contenus dans la biomasse. Il peut être élaboré à partir de biomasses riches en saccharose (canne à sucre, betterave sucrière, etc.), en amidon (maïs, orge, blé, pomme de terre, etc.) ou en cellulose (résidus agricoles tels que la paille ou les cannes de maïs, résidus forestiers, cultures énergétiques telles que le panic érigé ou des arbres à courte rotation). Le glucose contenu dans la biomasse riche en sucrose peut être directement fermenté par les microorganismes. Alors que, celui contenu dans l'amidon et la cellulose n'est pas directement disponible. Les chaînes de glucose contenues dans ces polysaccharides doivent être au préalable fragmentées par un procédé appelé hydrolyse (**Yukesh *et al.*, 2020**).

Le bioéthanol est utilisé principalement dans le secteur des transports comme constituant de mélange avec l'essence ou comme renchérisseur d'octane (éthyl tertio butyle éther (ETBE), qui est composé de 45 % en volume de bioéthanol et de 55% en volume d'isobutylène. Le bioéthanol est mélangé à l'essence aux fractions volumiques de 5, 10 et 85 % (**Bušić *et al.*, 2018**).

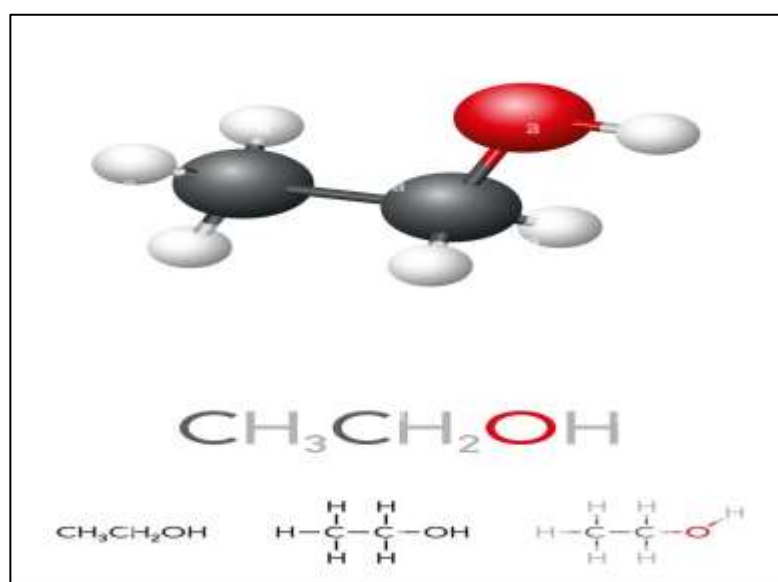


Figure 7 : La structure d'éthanol

II.2. Propriété physico- chimiques de bioéthanol

Le bioéthanol est un liquide incolore, volatil, inflammable et mixible dans l'eau en toutes proportions. Le **tableau II** présente quelques propriétés physico-chimiques de bioéthanol.

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

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

II.3. Les voies de production de bioéthanol à partir de la biomasse lignocellulosique

Le bioéthanol est produit à partir de matières premières lignocellulosiques à travers deux voies principales (**figure 8**):

II.3.1. La voie thermochimique

Les procédés thermochimiques permettent de transformer la biomasse solide et hétérogène en combustibles gazeux ou liquides plus faciles à transformer. Les produits obtenus sont les huiles de pyrolyse ou de liquéfaction et les gaz de synthèse, Le gaz produit est utilisé pour produire de l'éthanol et d'autres coproduits liquides (**Devi *et al.*, 2022**).

Cette voie comprend différents procédés tel que la pyrolyse et la gazéification.

II.3.1.1. La pyrolyse

La pyrolyse est la dégradation de la biomasse par chauffage à des températures de 500 à 600°C en absence d'oxygène. Elle produit des bio-huiles dont l'hydrotraitement les ont converties en précurseurs pour la production des biocarburants (**Kumar *et al.*, 2020**).

II.3.1.2. La gazéification

La gazéification est la transformation de la biomasse en présence d'oxygène, de vapeur d'eau et d'hydrogène à 700°C par un catalyseur métallique (aluminium, cobalt, etc.). Cette technique va produire un mélange de gaz appelé gaz de synthèse (CO, CO₂, H₂, CH₄, N₂). Le gaz de synthèse est converti par la suite en bioéthanol (**Devi *et al.*, 2022**).

II.3.2. La voie biochimique

Le principal produit de la transformation biochimique de la biomasse lignocellulosique (BLC) est l'éthanol obtenu par hydrolyse suivie d'une fermentation éthanolique. La production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique est le bioéthanol de deuxième génération. Les procédés de production d'éthanol à partir de cette biomasse intègrent plusieurs considérations de base à savoir que : La lignine ne peut être fermentée en éthanol. Les fractions cellulosiques et hémicellulosiques sont des sources potentielles de sucres fermentescibles.

Dans cette voie, les micro-organismes convertissent la matière lignocellulosique hydrolysée en bioéthanol de deuxième génération (**Devi *et al.*, 2022**).

Les principales étapes de la conversion de LCB en éthanol sont les suivantes :

- Un prétraitement de la biomasse pour la rendre appropriée pour l'hydrolyse.
- Une hydrolyse chimique et/ou enzymatique de LCB pour décomposer la cellulose et l'hémicellulose en sucres plus simples.
- La fermentation qui consiste à utiliser divers microbes pour fermenter les sucres afin de produire l'éthanol (**Devi *et al.*, 2022**).

II.4. Les microorganismes producteurs de bioéthanol

II.4.1. Les levures

Les microorganismes les mieux adaptés à la production d'éthanol à partir de sucres fermentescibles sont les levures du genre *Saccharomyces* et *Kluyveromyces* (**tableau III**).

Cependant, *Saccharomyces cerevisiae* se développe sur des milieux à base de sucres simples et/ou disaccharides. Elle est reconnue comme un agent qui ne représente aucun risque sur la santé humaine. En plus, cette espèce reste la première à être exploitée en industrie à travers le

monde, grâce à sa résistance aux conditions de production et aux conditionnements industriels. Cependant, *Saccharomyces cerevisiae* peut métaboliser les hexoses (glucose)(figure 8), les pentoses (xylose et arabinose principalement), les disaccharides (cellobiose) en éthanol dans des conditions anaérobique qu'aérobie et à température contrôlée.

Tableau III : Souches de levures produisant l'éthanol comme produit majeur de fermentation (Lin et Tanaka., 2006)

Levures	Sources de carbones (g/L)	Sources d'azote (g/L)	Concentration de l'éthanol (g/L)
<i>S. cerevisiae</i> 27817	Glucose (50- 200)	Peptone (2), sulfate d'ammonium (4)	(5,1-91,8)
<i>Candida shehatae</i> (ATCC22984)	Glucose (20- 120)	Peptone (2), sulfate d'ammonium (4)	48,96 (max)
<i>Candida utilis</i> 30091	Glucose (100)	Peptone (2), sulfate d'ammonium (4)	44,4 (max)
<i>Pichia stipitis</i>	Glucose(100)	Peptone (2), sulfate d'ammonium(4)	44,4 (max)
<i>Pachysolen tannophilus</i> (RL171)	Glucose (20- 120)	Peptone (2), sulfate d'ammonium (4)	48,96(max)
<i>S. cerevisiae</i>	Glucose (20- 120)	Peptone (2), sulfate d'ammonium (4)	48,96(max)
<i>S. cerevisiae</i>	Sucre (150-300)	--	53 (max)
<i>Pachysolen tannophilus</i> ATCC-32691	Saccharose (220)	Peptone(5), dihydrogène phosphate d'ammonium (1,5)	96,71
<i>S.cerevisiae</i> ATCC24860 (aérobie)	Saccharose (100)	Sulfate d'ammonium (24)	50 (max)
<i>S. cerevisiae</i> CMI237	Glucose(0-25), xylose (0-25)	Peptone(3,6), sulfate d'ammonium (3)	7,8 (max)
<i>S. cerevisiae</i> V5	Molasse (1,6- 5)	sulfate d'ammonium (0,72- 2)	(5-18,4)
<i>S.cerevisiae</i> 181 (aérobie)	Sucre (160)	sulfate d'ammonium (0,5)	70(max)
<i>S.cerevisiae</i> 2399	Glucose (250)	--	--
<i>S. cerevisiae</i> 27817	Glucose (10)	Peptone (5)	--
<i>Candida shehatae</i> (ATCC22984)	Galactose (20 50)	Peptone,Sulfate d'ammonium, casamino acide (10)	(4,8- 36,8)

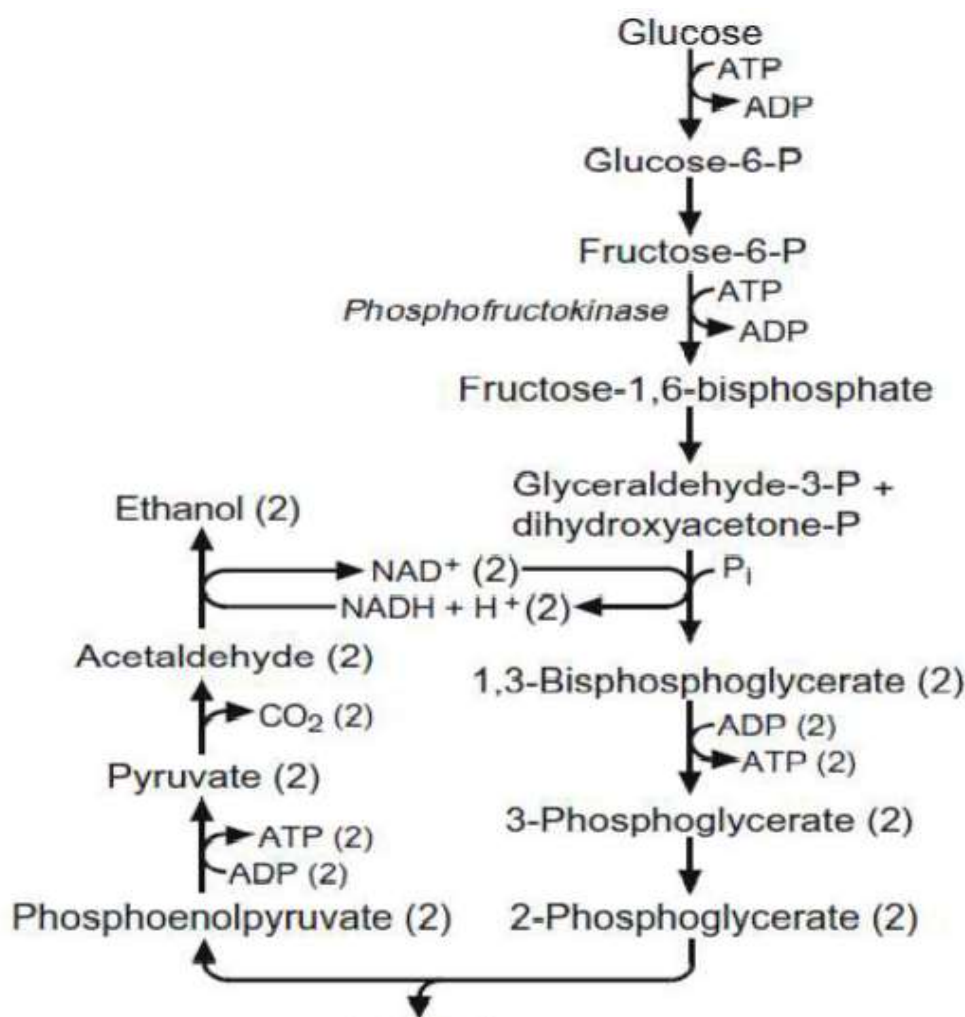


Figure 8 : Utilisation du glucose par *Saccharomyces* sous conditions anaérobies (fermentation) (Fritsche, 1972)

II.4.2. Les bactéries

La production de l'éthanol à partir du glucose peut être effectuée par diverses bactéries (tableau IV). En effet, la bactérie *Zymomonas mobilis*, vue sa sensibilité aux conditions de fermentation, est beaucoup moins exploitée. En plus, elle ne fermente que le glucose, le fructose et le saccharose. En revanche, *E. coli* est très exploitée car elle présente plusieurs avantages incluant la capacité de fermenter un large spectre de sucres, l'indépendance de point de vue de facteurs de croissance complexes et l'adaptation aux conditions industrielles (par exemple, son utilisation dans la production des protéines recombinantes). Cependant, certains inconvénients déclassent cette bactérie au profit des levures, dans le domaine de bioindustrie, en particulier, sa résistance insignifiante et la perception du public pour son danger imminent (Lin et Tannaka, 2006).

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

Bactéries	Concentration de l'éthanol (Mmol éthanol/Mmol glucose)
<i>Clostridium indoli</i> (pathogène)	1,96
<i>Clostridium sphenoides</i>	1,8
<i>Clostridium sordelli</i> (pathogène)	1,7
<i>Zymomonas mobilis</i>	1,9
<i>Spirochaeta stenostrepta</i>	0,84
<i>Spirochaeta alitoralis</i>	1,1
<i>Erwinia amylovora</i>	1,2
<i>Leuconostoc mesenteroides</i>	1,1
<i>Streptococcus lactis</i>	1,0
<i>Klebsiella aerogenes</i>	24 g /L
<i>Escherichia coli LY01</i>	40-50 g /L
<i>Escherichia coli KO11</i>	0,7-0,1
<i>Klebsiella oxytoca</i>	0,94-0,98

II.5. Les matières premières utilisées pour la production de bioéthanol

Les matières premières utilisées pour la production de bioéthanol peuvent être classés en trois grandes catégories (**Ballerini, 2002**):

- Les plantes amylicées : blé, maïs et des tubercules tels que le manioc, la pomme de terre ;
- Les plantes sucrières : betteraves sucrières et canne à sucre ;
- La biomasse lignocellulosique pour laquelle les essais ne sont encore qu'au stade pilote ou préindustriel. Ils font apparaître des différences significatives, avec les plus fortes valeurs obtenues avec la canne à sucre.

II.5.1. Les plantes amylacées

Les plantes amylacées peuvent être traitées selon deux procédures mettant en œuvre des moutures sèches ou humides. Dans le procédé à sec, le maïs par exemple, est broyé à une taille de particules inférieures au millimètre, avant de l'intégrer directement dans l'unité de fermentation. Ce type de procédé est généralement utilisé pour de petites unités. Les plus grosses unités emploient le procédé par voie humide dans lesquels différents composants tels que les huiles, fibres et protéines sont séparés et valorisés tandis que l'amidon est transféré vers l'unité de fermentation éthanolique. Pour ce qui concerne le blé, le germe et le son sont d'abord séparés par voie mécanique avant de les fractionner en milieu aqueux le glutène et l'amidon. L'amidon est ensuite hydrolysé par voie enzymatique en deux étapes successives : la liquéfaction à 100-105 °C avec des α -amylases, suivie de la saccharification à 50-55 °C avec l'amyloglucosidase libérant le glucose (**Ballerini, 2002**).

II.5.2. Les plantes sucrières

La canne et la betterave, sont des végétaux qui englobent énormément de sucre simples. Ils sont obtenus par un processus se base sur l'extraction au moyen de la mouture ou de la diffusion, et ils peuvent être soumis directement à une fermentation. Après la fermentation, le liquide est distillé (**figure 9**). Il est à noter que le bioéthanol dit « de première génération » est issu de la fermentation des matières premières contient des sucres simples qui peuvent être utilisées dans une chaîne alimentaire animale ou humaine. En revanche, l'éthanol issu de la fermentation des matières cellulosiques telles que le bois, les feuilles et les tiges des plantes ou celles issues de déchets est qualifié de la deuxième génération (**Fujita et al., 2003**).

II.5.3. La biomasse lignocellulosique

La biomasse lignocellulosique est un substrat complexe, constitué des trois principales fractions qui sont la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. Le procédé de production d'éthanol va consister à optimiser l'obtention de sucres monomères issus des fractions cellulosiques et hémicellulosiques, puis de les transformer en éthanol (**figure 9**). Une première étape de prétraitement de la biomasse doit être réalisée pour améliorer la susceptibilité à l'hydrolyse des fractions cellulosiques et hémicellulosiques. Les méthodes de prétraitement répondant le mieux à ces objectifs sont: le prétraitement à l'acide dilué, l'explosion à la vapeur et la thermohydrolyse puisqu'elles permettent de satisfaire aux objectifs fixés tout en minimisant la formation de composés de dégradation des sucres. Des actions de recherche doivent encore porter sur l'amélioration de l'activité des enzymes

cellulases afin de réduire le coût de l'hydrolyse enzymatique. Un autre verrou technologique du procédé concerne la fermentation alcoolique des pentoses qui n'est toujours pas vraiment applicable à l'échelle industrielle. Ce dernier point impose de développer de nouvelles souches capables de démontrer des performances voisines de celles démontrées sur glucose par *Saccharomyces cerevisiae* (Ballerini, 2002).

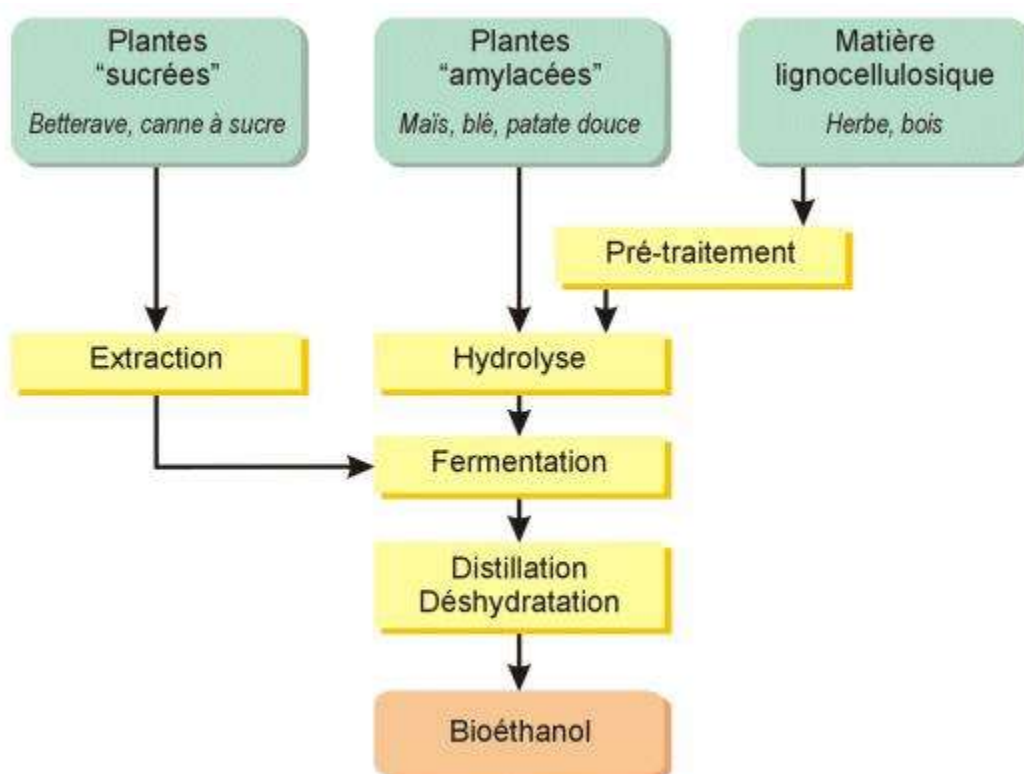


Figure 9 : Schéma explicatif de production du bioéthanol à partir de plusieurs sources des sucres (Claude, 2018).

II.6. Générations de bioéthanol

II.6.1. Bioéthanol de première génération

Le bioéthanol de première génération est directement lié à la biomasse souvent comestible. Il est généralement produit à partir de la fermentation des sucres à six carbones (principalement le glucose) par des microorganismes tels que *Saccharomyces cerevisiae*. Quelques matières premières principalement la canne à sucre et le maïs sont actuellement utilisées. D'autres matières premières plus marginales sont utilisées ou bien envisagées pour produire le bioéthanol de première génération comme le lactosérum, l'orge, les pommes de terre, le betterave à sucre (Lee et Lavoie, 2013).

II.6.2. Bioéthanol de deuxième génération

Les biocarburants de deuxième génération sont définis comme des carburants produits à partir d'une large gamme de différentes matières premières, mais elle n'est pas limitée par les biomasses lignocellulosiques non comestibles. La biomasse utilisée pour la production de bioéthanol de deuxième génération est séparée généralement en trois catégories: la biomasse homogène, tel que les copeaux de bois blanc, quasi-homogène, tel que les résidus agricoles et forestière et non-homogène, y compris les matières premières de faible valeur comme les déchets municipaux solides.

En revanche, une telle biomasse est généralement plus complexe à valoriser et sa production est dépendante de nouvelles technologies (**figure 10**). Par conséquent, le coût de conversion de la matière première en produit final doit être le plus faible possible pour maintenir la rentabilité (Lee et Lavoie, 2013).

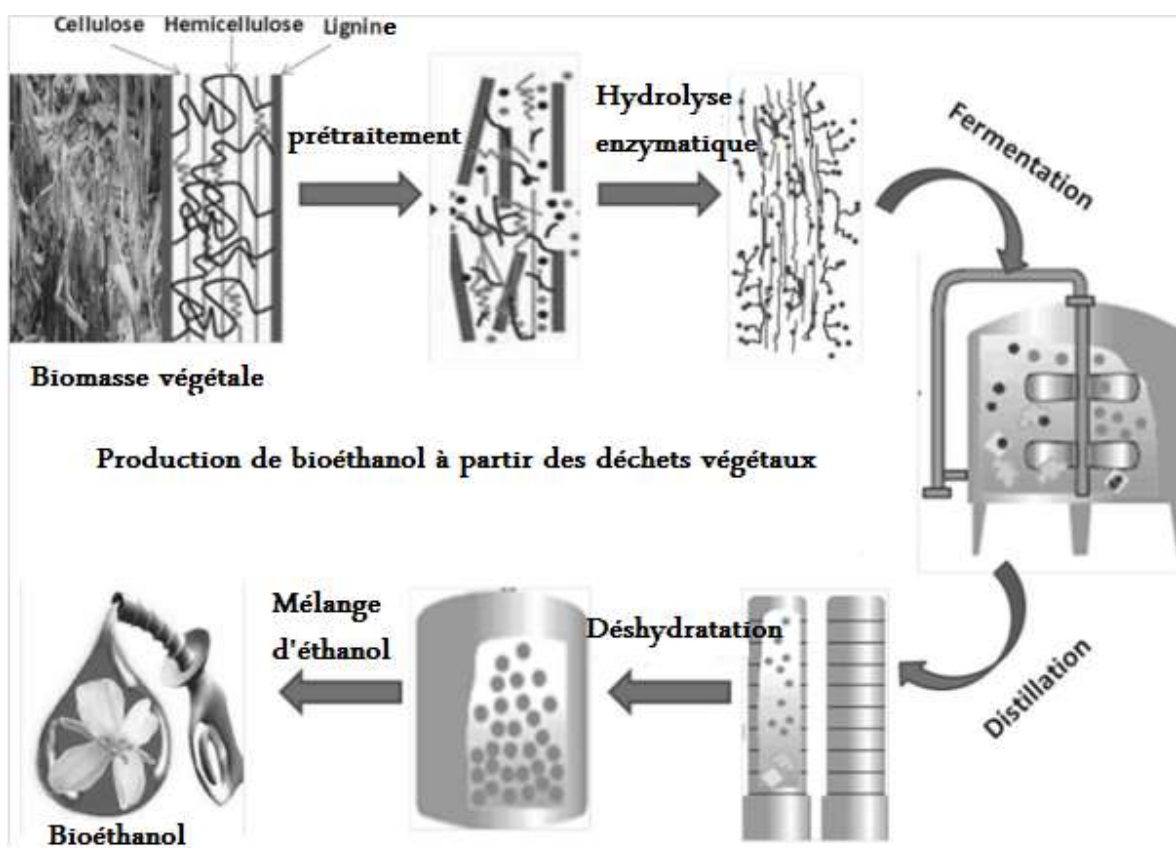


Figure 10: Illustration de processus de production de bioéthanol de deuxième génération (Hemansi *et al.*, 2019).

II.6.3. Bioéthanol de troisième génération

La production de bioéthanol de troisième génération dépend de la biomasse algale. L'utilisation des algues en tant que matière première du bioéthanol est utile car elle absorbe rapidement le dioxyde de carbone et accumule de fortes concentrations de graisses et de glucides. Leur culture est facile et nécessite moins de terres que les plantes terrestres.

Cette génération nécessite un prétraitement pour détruire les cellules d'algues. Ce prétraitement peut être physique (comme les forces mécaniques) ou chimique (traitement acide). Après le prétraitement, les glucides complexes sont convertis en sucres fermentescibles par une hydrolyse enzymatique. Un processus connu sous le nom de saccharification peut conduire à la création de produits secondaires (**Timothy *et al.*, 2021**).

L'exploitation de grandes algues qui poussent naturellement sur le fond marin est encore compliquée à cause de sa composition variable. La production d'éthanol par les algues sèches est variable et est inférieure à la production de bioéthanol de la première génération. Cependant la technologie utilisée est plus moderne. Sur le plan économique la première génération de biocarburants est actuellement l'option privilégiée pour la production de biocarburants. La fusion de la première et de la deuxième génération peut maximiser la productivité (**Timothy *et al.*, 2021**).

II.6.4. Bioéthanol de quatrième génération

A l'heure actuelle, le développement de méthodes de production de bioéthanol de quatrième génération est toujours en cours et utilise des microorganismes tels que les levures et les algues. Les méthodes de production de bioéthanol de quatrième génération sont variées utilisant certaines émissions de CO₂ et de H₂O. Ces derniers permettent de capter le dioxyde de carbone au moyen de la pression physique et du refroidissement. Cependant, les processus opérationnels actuels nécessitent des intrants énergétiques élevés et ne sont pas économiquement réalisables. La quatrième génération de bioéthanol peut également être produite par fermentation électrique car elle exploite l'énergie électrique pour aider à réguler la respiration d'algues génétiquement modifiées en transportant des électrons (**Timothy *et al.*, 2021**) (figure 11).

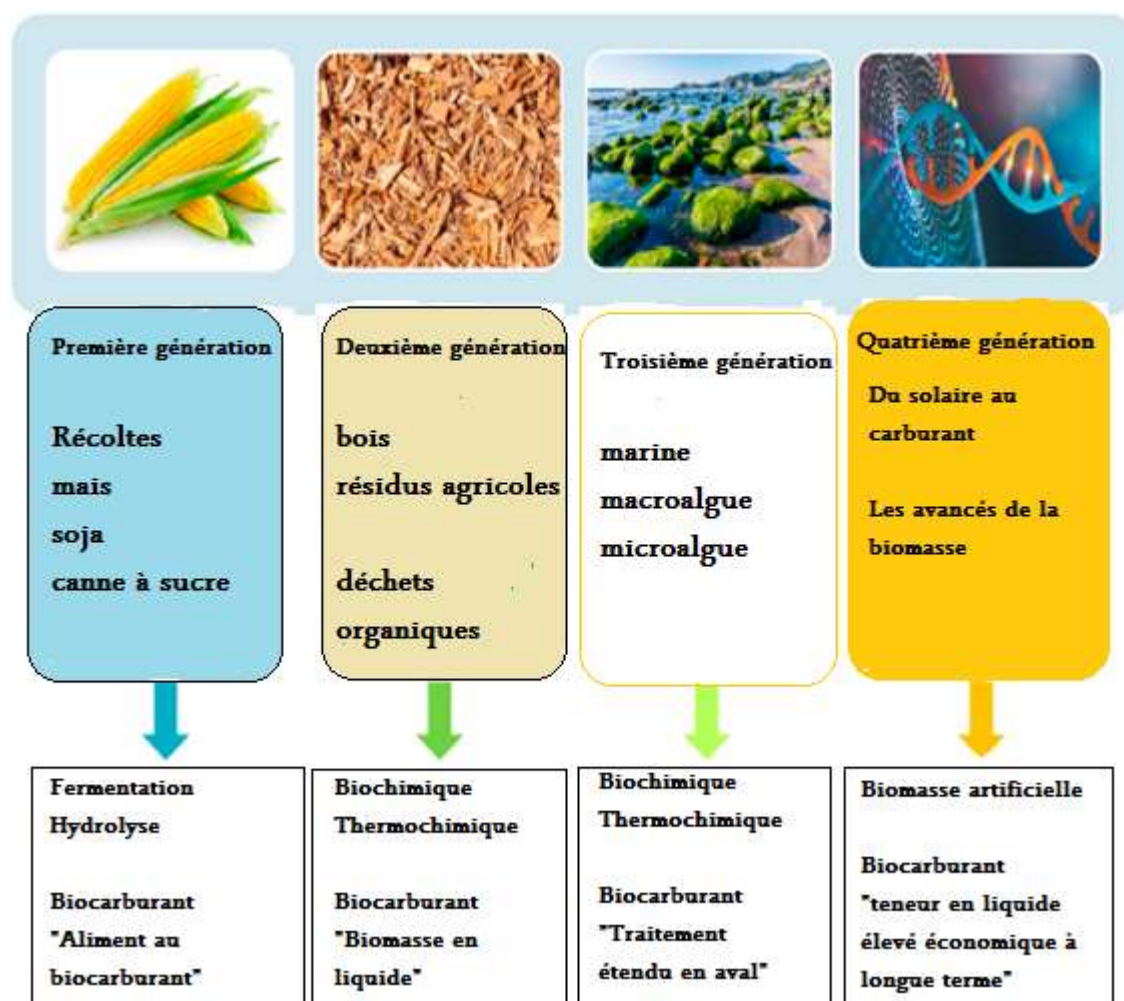


Figure 11: Génération de bioéthanol (Vasic *et al.*, 2021)

II.7. Utilisation de bioéthanol

Le bioéthanol est un biocarburant spécialisé pour les moteurs « essence ». Il peut être utilisé à l'état pur comme carburant substitut à l'essence dérivée du pétrole ou bien en mélange à des niveaux de concentration variables. Les mélanges d'éthanol et d'essence sont identifiés par l'abréviation « Exx », où « xx » indique le pourcentage d'éthanol inclus dans le mélange. Un carburant E20 contient donc 20 % d'éthanol et 80 % d'essence, alors qu'un carburant E100 correspond à de l'éthanol pur. Plusieurs types de mélange sont commercialisés dont les plus fréquents sont le E5, le E10, le E85 et le E100 (Sadi, 2012).

Le bioéthanol peut être aussi utilisé sous forme d'ETBE (Ethyl Tertio Butyl Ether), qui est formé par l'éthérification catalytique de l'isobutane avec de l'éthanol. Il contient 45% en masse d'éthanol combiné sous forme chimique. L'ETBE possède les mêmes avantages que l'éthanol en termes d'accroissement d'indice d'octane (Sadi, 2012) (figure 12).

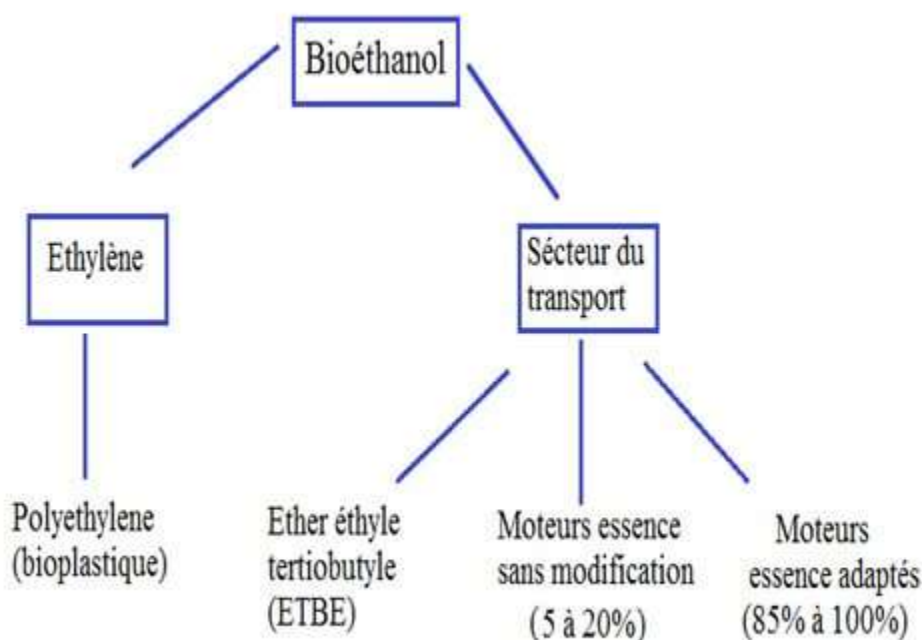


Figure 12 : Utilisation potentielle du bioéthanol (Demirbas, 2008).

On comparaison avec l'essence, l'éthanol contient près de 40 % moins d'énergie, mais affiche une masse volumique supérieure de 7 %. Il est utilisé dans un système d'injection volumétrique, l'éthanol générera donc moins de puissance qu'une essence, cette diminution étant proportionnelle au contenu en éthanol du carburant. Toutefois, l'incorporation de 10 % d'éthanol dans l'essence ne réduit que de 3 % la puissance du moteur et favorise une meilleure combustion d'un même ordre de grandeur (Sadi, 2012).

Le bioéthanol est également utilisé dans plusieurs industries: comme combustible pour la production d'électricité par combustion thermique, combustible pour piles par réaction thermochimique, combustible dans les systèmes de cogénération et comme matière première dans l'industrie chimique (Okolie *et al.*, 2021).

En effet, il est présent dans les liqueurs, les boissons anisées, mais aussi dans les cosmétiques ou encore les médicaments, les vernis, les colles et les peintures (Okolie *et al.*, 2021).

II.8. Récupération de l'éthanol

La fermentation des sucres monomère est généralement suivie par la récupération de l'éthanol à partir du bouillon de fermentation. Habituellement, la teneur en eau du bouillon est réduite à environ 0,5% en volume permettant la formation d'éthanol anhydre avec un minimum de 99,5% en volume. Cette opération est contrainte par caractère azéotropique de la solution

éthanol-eau et peut être effectuée sur la base du principe de la distillation (c'est-à-dire en tirant parti de la différence de point d'ébullition des composants de la solution). Le problème avec la solution azéotrope est surmonté en utilisant un agent de séparation qui modifie la volatilité relative de la composante clé (**Nitsche et Gbadamosi, 2017**). Les techniques utilisées pour la récupération de l'éthanol pur du bouillon de fermentation comprennent la distillation par adsorption, la distillation par azéotrope, la distillation par diffusion, la distillation extractive, la distillation sous vide, la distillation membranaire et la déshydratation chimique. La distillation extractive est la plus utilisée pour les opérations à grande échelle. Il existe d'autres techniques qui gagnent du terrain pour une utilisation future notamment en raison des besoins énergétiques moindres. Il s'agit de la pervaporation et de la distillation du sel (**Nagy et al., 2015**).

II.9. Les avantages et les inconvénients de bioéthanol

II.9.1. Les avantages

Le bioéthanol présente de nombreux avantages tels que la réduction des gaz à effet de serre grâce à l'utilisation de carburant mélangé au bioéthanol. Les déversements de carburant sont plus biodégradables ou dilués à des concentrations non toxiques. Le bioéthanol provient de sources renouvelables, c'est-à-dire de cultures et non de ressources finies.

Le mélange d'éthanol et d'essence contribuera à prolonger la durée de vie des approvisionnements pétroliers en baisse et à assurer une plus grande sécurité énergétique dans le monde. Ce biocarburant est également biodégradable et moins toxique que les combustibles fossiles (**Nichodemus, 2017**).

II.9.2. Les inconvénients

La fabrication de bioéthanol affecte la biodiversité du fait qu'une grande quantité de terres arables est nécessaire pour faire pousser ces cultures et pourrait voir certains habitats naturels détruits, y compris les forêts tropicales. L'utilisation de ce biocarburant peut entraîner une pénurie alimentaire en raison des prix lucratifs de bioéthanol, certaines agricultures peuvent sacrifier des cultures vivrières pour la production de biocarburants. Aussi, il est assez coûteux de mettre en place un laboratoire de biocarburants.

La production de bioéthanol exige de solides connaissances techniques pour une production efficace et aussi pour éviter les émissions excessives (**Nichodemus, 2017**).

CHAPITRE III :
PROCEDES DE
PRODUCTION DE
BIOETHAOL

III.1.Généralités

La production industriel de bioéthanol est également basée sur la voie naturelle fermentaire ou/et le procédé de fermentation alcoolique. La matière lignocellulosique hydrolysé a été généralement utilisée comme milieu de croissance des microorganismes tell que *Saccharomyce cerevisiae* pour convertir les sucres fermentescibles en alcool (ou en acide lactique ou en nombreux autres produits finaux différents). Les fermentations sont réalisées dans des fermenteurs de type continu, discontinu ou Fed-batch avec/sans agitation, à des paramètres physico-chimique régulés (température, pH, anaérobie, agitation). Ces paramètres devraient également être étudiés pour améliorer la production de bioéthanol (**Vasić *et al.*, 2021**).

La **figure 13** représente les principales étapes de la conversion des matériaux lignocellulosiques en éthanol.

On développe dans ce chapitre le procédé de production de bioéthanol par deux souches de *Saccharomyces cerevisiae* sur les déchets de papiers. Pour cela on va prendre comme exemples deux études qui ont été réalisées par **Wu *et al.*, (2014)** et **Thakare et Trivedi, (2021)**, dans ce contexte de recherche. Les résultats obtenus par ces chercheurs seront également représentés dans ce chapitre.

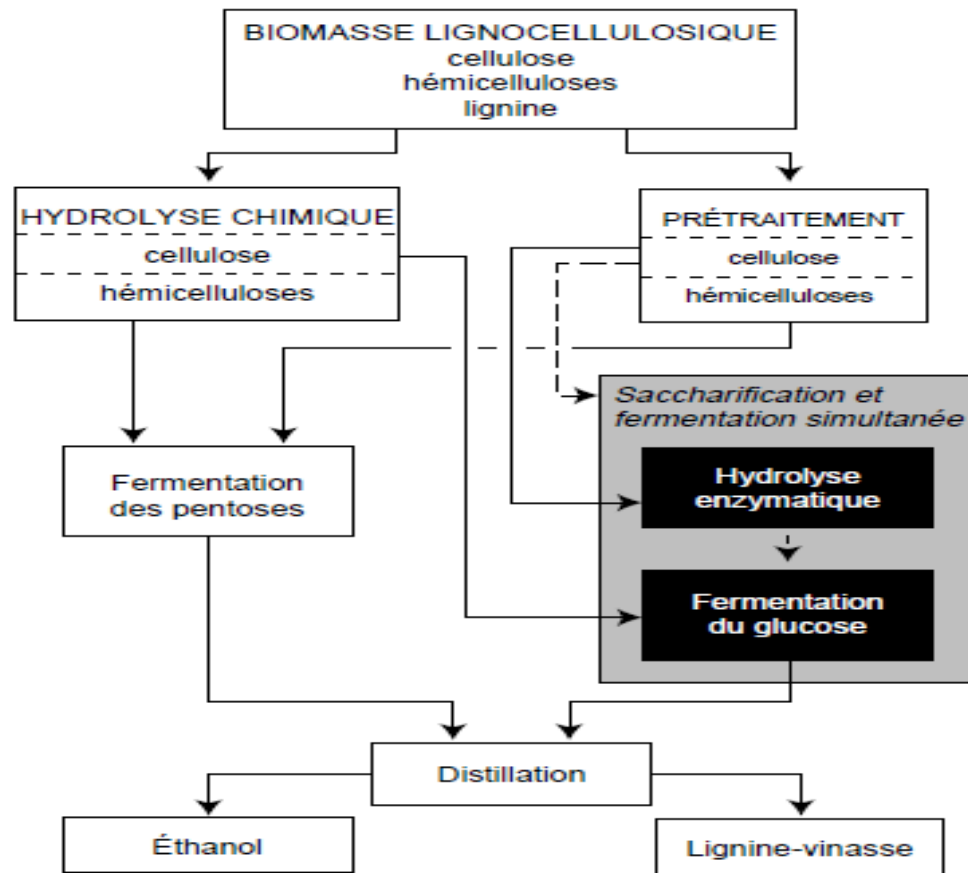


Figure 13: Schéma simplifié de la production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique (Ogier *et al.*, 1999).

III.2. Préparation de préculture

Le matériel biologique est la souche de levure sèche *Saccharomyces cerevisiae*, utilisée pour la fermentation alcoolique à partir d'hydrolysats des déchets de papiers.

Thakare et Trivedi, (2021) ont utilisé la souche *Saccharomyces cerevisiae* (MTCC 3095).

Wu *et al.*, (2014) ont préparé un inoculum de *Saccharomyces cerevisiae* BCRC 20271. Ces souches cultivées d'abord dans des boîtes d'agar contiennent 20 g/L d'agar, 5 g/L d'extrait de levure et 20 g/L de glucose à 30°C pendant 24h. Une boucle des cellules sert à inoculer un erlenmeyer de 250 ml contenant 100 ml de milieu de culture qui contient de 10 g/L d'extrait de levure et de 20 g/L de glucose. La culture cellulaire a été réalisée à 30°C pendant 24 h.

III.3. Préparation de la matière lignocellulosique

Les déchets de papier de bureau et de papier journal ont été séchés au soleil, puis coupés en petits morceaux de 0,5 x 0,5 cm de taille puis stockés dans un récipient hermétique. Les différentes propriétés telles que la teneur en cellulose, la teneur en cendres, la teneur en

humidité ont été évaluées à l'aide de protocoles standard (**Thakare et Trivedi; 2021**). En effet, **Wu et al., (2014)** ont broyé les déchets de journal à des particules semblables aux fibres du coton puis ont les ont séchés à température ambiante jusqu'à l'utilisation.

III.4. Préparation de milieu de production

Dans l'étude menée par **Thakare et Trivedi, (2021)** les déchets de bureau et de papier journal ont été trempés dans différentes concentrations de H_2SO_4 allant de 1 à 6% dans le but d'hydrolyser la cellulose en glucose. Le mélange a été autoclavé à 121 °C. L'influence du temps sur l'hydrolyse a été étudiée par variation du temps de 30 à 180 min. La cellulose libérée lors de chaque traitement a été évaluée par la méthode de l'anthrone. Après cette optimisation, les échantillons ont été filtrés et centrifugés à 5000 rpm pendant 10 min pour obtenir l'hydrolysate. Le pH a été maintenu à 4,5-4,9.

Dans l'étude de **Wu et al., (2014)**, l'hydrolyse est effectuée par l'utilisation de 2% (poids /volume) de déchets de journal qui ont été successivement hydrolysés par 0,1 N H_2SO_4 ou bien 0,1 N NaOH dans un autoclave à 131°C pendant 30 min, suivi d'un ajustement à divers pH (2, 4, 6, 8 et 10), un ajout in situ de différentes quantités de cellulase (0.01, 0.1, 0.5, 1.0 and 2.0%) et ensuite une hydrolyse pendant 12 h à 50°C et 100 rpm.

III.5. Fermentation

Thakare et Trivedi (2021) ont effectué des fermentations sur un milieu contenant 15% du substrat (l'hydrolysate) et de 10% de préculture de *Saccharomyce cerevisiae* (MTCC3095) sous une agitation continue de 150 tr/min pendant 72 h de fermentation. Le produit fermenté a été distillé deux fois pour obtenir le bioéthanol.

Les fermentations de **Wu et al., (2014)** ont été réalisées dans des erlenmeyers de 500 ml contenant 300 ml d'hydrolysate, le milieu a été inoculé par 10% de préculture de *Saccharomyces cerevisiae* BCRC 20271. Les cultures ont été maintenues à 24°C pendant 48h.

III.6. L'analyse de bioéthanol

Le bioéthanol a été mesuré par chromatographie en phase liquide (CLHP) à haute performance (HPLC) (**Wu et al., 2014; Thakare et Trivedi 2021**)

III.7. Résultats et discussion

L'étude de **Thakare et Trivedi (2021)** a montré que l'hydrolyse acide des journaux était efficace à 39%, ce qui a donné une concentration de 0,25 g/ml d'éthanol après 72h de fermentation avec une pureté de 9,52%, et pour les déchets de bureau l'hydrolyse acide était efficace à 5% ce qui a donné une concentration de 0,10 g/ml d'éthanol avec une pureté de 5 à

54%. L'hydrolyse biologique des substrats prétraités par diverses enzymes est largement étudiée. L'utilisation de *Saccharomyces cerevisiae* (levure de boulanger) est largement utilisée pour la production de bioéthanol à partir d'hydrolysat de déchets de papier.

Les résultats obtenus dans les études de **Wu et al., (2014)** ont montré que *Saccharomyces cerevisiae* BCRC 20271a de bonnes performances de production de bioéthanol sur l'hydrolysat acide ou enzymatique de déchets de journaux, c'est pourquoi il a été choisi. Ces chercheurs ont obtenu des concentrations finales de consommation du glucose de 6,26 g/L et 3,84 g/L, de galactose (0,28 g/L) et de mannose (1,38 g/L) après 24 heures et 32 heures de fermentation. Après une incubation de 48 heures, 11,76 g/L de sucres ont été consommés et une concentration finale d'éthanol de 5,72 g/L a été obtenue.

Wu et al., (2014) et **Wang et al., (2013)** ont précisé que l'utilisation de déchets de papier ou de journaux comme matière première pour la production d'éthanol est potentiellement très prometteuse que les autres matières premières contenant de la lignocellulose.

Plusieurs d'autres études ont été réalisées sur la production de bioéthanol à partir de la biomasse lignocellulosique en citant:

Maroufpour et al., (2019) ont utilisé les épluchures de pomme de terre comme source de carbone grâce à leur teneur élevée en sucres fermentescibles après l'hydrolyse. Deux types de microorganismes ont été utilisés y compris *Saccharomyces cerevisiae* et *Zymomonas mobilis* pour la synthèse de bioéthanol. L'effet de différentes conditions biochimiques (temps de fermentation, la concentration d'extrait de levure) sur le rendement en éthanol pour les deux souches a été évalué. Les résultats obtenus ont montré que le meilleur rendement en bioéthanol (0,521 %) a été obtenu après un temps de fermentation de 5 jours et une concentration d'extrait de levure de 3 g/L pour *Z. mobilis*. En effet, le meilleur rendement (0,180 %) en bioéthanol a été obtenu après un temps de fermentation de 7 jours sans ajout d'extrait de levure pour *S. cerevisiae*. Des études similaires sont réalisées par **Ojewumi et al., (2018)**. Ces auteurs ont montré que l'utilisation des épluchures de pomme de terre pour la production d'acide lactique donne des rendements élevés en bioéthanol lorsqu'une souche d'avantage a été choisie.

CONCLUSION

CONCLUSION

Conclusion

Les biocarburants à base de cellulose sont une solution de rechange possible au bioéthanol alimentaire à base principalement d'amidon de maïs et bioéthanol de canne à sucre. Donc, la valorisation de la matière lignocellulosique pour la production de bioéthanol par voie fermentaire s'avère très intéressante.

La matière lignocellulosique constitue un substrat complexe qui nécessite une hydrolyse afin de récupérer les sucres fermentescibles. Pour cela, la biomasse prétraitée peut subir une hydrolyse chimique et/ou enzymatique. En effet, plusieurs fermentations peuvent être réalisées par différents microorganismes principalement la levure *Saccharomyces* sur l'hydrolysate obtenue pour produire le bioéthanol. Pour un meilleur rendement en éthanol plusieurs paramètres influent les méthodes d'hydrolyse et la fermentation doivent être optimisées.

Malgré les progrès technologiques elle fait face à des obstacles tels que le coût de production, la toxicité et les craintes mondiales de changement climatique. Des travaux de recherche futurs doivent être consacrés à l'amélioration de diverses normes pour la production de biocarburants à partir de biomasse lignocellulosique à grande échelle.

**LES REFERENCERS
BIBLIOGRAPHIQUES**

B

Ballerini D. (2002). Production d'éthanol à partir de biomasse. L'actualité chimique. Pp : 83-87.

Barisano D., De Bari I., viola E., Zinkardin F., Braccio G., Gallifuoco M. (2001). State of the art on bioethanol production ENEA. Roma.Pp: 1-26.

Binod P., Sindhu R., Singhanian R.R., Vkrum S., Devi L., Nagalakshmi S.(2010). Bioethanol production from rice straw: An overview. Bioresour Technol. Pp: 74-4767.

Bušić A., Mardetko N., Kundas S., Morzak G., Belskaya H., Santk M.I., Komes D., Novac S., Santk B.(2018). Bioethanol production from renewable raw materials and its separation and purification: a review. Pp: 289-311. Doi: 10-17113/Ftb-56.03.18.5546.

C

Carevic I., Baricevic A., Stirmer N., Santek Bajto J. (2020).Correlation between physical and chemical properties of wood biomass ash and cement composites performances. Pp: 119-450.

Carvalho F., Duarte L.C., Girio F.M. (2008). Hemicellulose biorefineries: A review on biomass treatments. Pp: 64-849.

Claude S. (2018). Biomasse énergie : des ressources primaires aux produits énergétique finaux. Encyclopédie de l'énergie. Pp : 21-38.

D

Devi A., Bajar S., Kour H., Kothari R. Pant D., Singh A. (2022).Lignocellulosic Biomass Valorization for Bioethanol Production: a Circular Bioeconomy Approach. Pp: 1-22. <https://doi-org/10.1007/s12155-022-10401-9>.

E

Edeh I. (2020). Bioethanol production: An overview. DOI: <https://dx.doi.org/10.5772/intechopen.94895>.Pp: 1-22.

F

Fritsche W. (1972).The Yeasts, Physiology and Biochemistry of Yeasts. Für Allg. Vol. 2.

Fujita Y., Ito J., Ueda M., Fukuda H. (2003). Synergistic saccharification, and direct fermentation to ethanol, of amorphous cellulose by use of an engineered yeast strain codisplaying three types of cellulolytic enzyme. *Appl Environ Microbiol.* Pp: 1207–1212.

G

Godin B., François G., Agneessens R., Schmit T., Gofflot S., Lamaudière S., Sinnaeve G., Goffart J.P., Gerin P.A., Stilmant D., Delcarte J. (2010). Détermination de la cellulose, des hémicelluloses, de la lignine et des cendres dans diverses cultures lignocellulosiques dédiées à la production de bioéthanol de deuxième génération : in *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* Pp: 549-560.

H

Hemansi., Gupta R., Yadav G., Kumar G., Yadav A., Saini J.K., Kuhad R.H. (2019). Second generation Bioethanol Production: The State of Art: From Current Status to Practical Implementation Biofuel and Biorefinery Technologie, Pp: 121-146. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-94797-6-8>.

Huang J., Zhu Y., Liu T., Sun S., Ren J., Wu A., Li H. (2019). A novel wet-mechanochemical pretreatment for the efficient enzymatic saccharification of lignocelluloses: small dosage dilute alkali assisted ball milling. *Energy Convers Manag.* Pp: 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.04.078>.

J

Jensen C.U., Rodrigury J.K., Guero R., Karatzos S., Olofson G., Iversen S.B. (2017). Fundamentals of Hydrofaction : pétrole brut renouvelable issu de la biomasse ligneuse.

K

kannah R.Y., Banu J.R., Sivashanmughan P., Kavitha S. (2020). Valorization of food waste for bioethanol and biobutanol production: Food waste to valuable resources. Pp: 39-73.

Khandaker M.M., Abdullahi U.A., Dogara M., Badaludin N.A., Mohd K.S. (2020). Production de bioéthanol à partir de déchets de fruits et légumes à l'aide de *Saccharomyce cerevisiae*. Pp :12-58. Doi: 10.5772/intechopen.94358.

Kulkarni V.S., Kishor.D.B., Sudha R. (2012). Natural Polymers: A comprehensive review. International journal of research in pharmaceutical and biomedical science. Pp: 1597-1613.

L

Lee R.A.,Lavoie J.M. (2013). From first- to third-generation biofuels: Challenges of producing a commodity from a biomass of increasing complexity. Animal Frontiers.Pp: 6-11. Doi:10.2527/af.2013-0010

Lin Y., Tanaka S. (2006). Ethanol fermentation from biomasse resources: current state and prospects. Appl Microbiol Biotechnol. Pp: 627-642.

M

Maroufpour B., Rad F.A., Yazdanseta S. (2019). Bioethanol production as biofuel from potato peel using *Saccharomyces cerevisiae* PTCC 5052 et *Zymomonas mobilis* PTCC 1718. Bioagro. Pp: 177-184.

Meng F., Wang D. (2020). Effects of vacuum freeze drying pretreatment on biomass and biochar properties. Renew Energy. Pp: 349-34. [https:// doi. org/10.1016/j. renene. 2020. 03. 113](https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.113). Mikrobiol.

Mosier N., Wyman C., Dale B.D., Elander R., Lee YY., Holtyapple M.(2005). Features of promising technologies for pretreatment of Lignocellulosic biomass. Bioresour Technol. Pp: 86-673.

N

Nagy E., Mizsey P., Hancsók J., Boldyryev S., Varbanov P.(2015). Analysis of energy saving by combination of distillation and pervaporation for biofuel production. Chem. Eng. Process. Process Intensif.Pp: 86-94. [https:// doi.org/10.1016/j. cep.2015. 10.010](https://doi.org/10.1016/j.cep.2015.10.010).

Nichodemus C.O. (2017). Bioethanol: production, advantages, disadvantages and environmental impacts. Enviromental-Biotechnology.pp: 153-164. Doi:10.1088/1757-89X/976/1/012031.

Nikku M., Deb A., Sermyagina E., Puro L. (2019). Reactivity Characterization of Municipal Solid Waste and Biomasse.Pp:115-690.

Nitsche M., Gbadamosi R. (2017). Extractive and azeotropic distillation. In: Nitsche, M., Gbadamosi, R. (Eds.), *Practical Column Design. Guide*. Springer International Publishing, Cham. Pp. 153-164. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51688-2_5.

O

O'donohue M.J. (2008). La production de carburants à partir de biomasse lignocellulosique par voie biologique : état de l'art et perspectives. Vol. 15 N° 3 Pp :172 – 177.

Ogier J-C., Ballerini D., Leygue J-P., Rigall L., Pourquoié J. (1999). Production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique. *Revue de l'IFP*, Vol. 54 (1999), No. 1, Pp : 67-94. Doi: 10.2516/ogst:1999004.

Okolie J.A., Nanda S., Kozinski J.A. (2021). Chimie et applications industrielles spécialisées de la biomasse lignocellulosique. Pp : 2145-2169.

P

Phwan C.K., Ong H.C., Chen W-H., Ling T.C., Ng E.P., Show P.L. (2018). Comparison of pretreatment Technologies and fermentation processes of bioethanol from Microalgae. *Energy convers. Manag.* Pp:81-94.

Prasad S., Singh A., Joshi H.C. (2007). Ethanol as an alternative fuel from agricultural, industrial and urban residues. *Resour Conserve recycle*. Pp:1-39.

S

S. Djeddou S., Boutemak k., Cheknane B., Hadj-Ziane A., Ayoub F.M. (2018). Etude de la production de bioéthanol de deuxième génération à partir d'un déchet agroalimentaire. Pp : 385-390.

SADI M. (2012). Le bioéthanol : une véritable alternative pour une énergie propre. *Division Bioénergie et Environnement – CDER n°25*. Pp :11-25.

Sakar N., Ghosh S.K., Bannerjee S., Aikat K. (2012). Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. *Renew Energy*. Pp: 19-27.

Singh A., Olsen S.I. (2011). A critical review of biochemical conversion, sustainability and life cycle assessments of algal biofuel. *Appl Energy*. Pp: 3548-3555.

Smachetti M.E.S., Rizza L.S., Coronel C.D., Nascimento M.D., Curatti L. (2018). Microalgal biomasse as an Alternative Source of Sugars for the production of Bioethanol. In *Principals and Application of Fermentation Technology*; John Wiley & Sons, Ltd: Hobokon, NJ, USA, Pp; 351-386. ISBN 978-1-119-46038-1.

Sun Y., Cheng J. (2002). Hydrolyse of Lignocellulosic materials of ethanol productin: A review bioresour Technol. Pp: 1-11. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00212-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00212-7).

T

Thakare K., Trivedi M. (2021). Bioethnol production from waste paper. *International Journal of Scientific Research in biological sciences*. Pp: 49-51.

Timothy J.Tse., Daniel j. Wiens and Martin j.T. Reaney. (2021). Production bioethanol: a review of factors affecting ethanol yield. Pp:2-18. <https://doi.org/10.330/fermentation7040246>.

Tomas-Pejo E., Alvira P., Ballesteros M., Negro M.J. (2011). Pretreatment technologies for lignocellulose-to-bioethanol conversion. Pp: 76-149. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385099-7.00007-3>.

Tsegaye B., Balomajumder C., Roy P. (2020). Organosolv pretreatments of rice straw followed by microbial hydrolysis for efficient biofuel production. *Renew Energ*. Pp:923–934. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.176>.

V

Vasić K., Knez Z., Leitgeb M. (2021).bioethanol production by enzymatic hydrolysis from different Lignocellulosic sources. Pp: 1-23. <https://doi.org/10.3390/molecule26030753>.

W

Wang L., Sharifzadeh M., Templer R., Murphy R J. (2013).Bioethanol production from various waste papers: Economic feasibility and sensitivity analysis. *Applied Energy* .Pp: 1172-1182.

Wu F.C., Huang S.S., Shih I.L. (2014). Sequential hydrolysis of waste newspaper and bioethanol production from the hydrolysate. *Bioresource Technology* Pp: 159-168.

Y

Yeksh Kannah R., Rayesh Bannu J., SivashanNyhamP., Kavitha S. (2020). Valorisation des déchets alimentaires pour la production de bioéthanol. Food waste to valuable resources. Pp: 39-73.

Z

Zhang Y., Li T., Shen Y., Wang L., Zhang H., Qian H., Qi X. (2020). Extrusion followed by ultrasound as a chemical-free pretreatment method to enhance enzymatic hydrolysis of rice hull for fermentable sugars production. And Crops Prod Pp: 112-356. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112356>.

ملخص

بشكل عام ، توفر صناعة الأغذية الزراعية ومعالجة النباتات كميات كبيرة من البقايا العضوية الليجنوسيليلوزية التي يتم استغلالها بشكل سيئ. الغرض من هذا العمل هو إجراء دراسة بيليوغرافية حول تميم هذه الكتلة الحيوية لإنتاج الإيثانول الحيوي من الجيل الثاني. الكتلة الحيوية الليجنوسيليلوزية عبارة عن مادة معقدة تتكون من السليلوز ، الهيميسليلوز ، واللجنين. تحويل الكتلة الحيوية ليغنوسليلوز إلى إيثانول يتم عن طريق التحويل البيولوجي وعادة ما تكون هناك حاجة إلى عملية نموذجية لتحويل السكريات الهيكلية لجدار الخلية النباتية بشكل كافٍ إلى الإيثانول الحيوي. تتمثل مراحل هذه العملية في المعالجة المسبقة ، التحلل المائي الحمضي و / أو الأنزيمي ، التخمر والتقطير.

يتم تخمير ناتج التحلل المائي للكتلة الحيوية الليجنوسيليلوزية بواسطة كائنات دقيقة مختلفة ، من بينها *Escherichia coli* و *Saccharomyces cerevisiae* و *Zymomonas mobilis*. تعتبر *Saccharomyces cerevisiae* الكائن الدقيق الأنسب لإنتاج الإيثانول ، و من أجل تحسين إنتاج البيو إيثانول يجب دراسة العوامل المختلفة المؤثرة على عملية التخمر الكحولي والتحكم فيها.

تم إجراء العديد من الدراسات حول إنتاج الإيثانول الحيوي بواسطة *Saccharomyces cerevisiae* من كتل حيوية ليغنوسيليلوزية مختلفة مثل النفايات الورقية. أظهرت نتائج هذه الدراسات أن ناتج التحلل المائي للمواد الليجنوسيليلوزية ملائمة للنمو وإنتاج الإيثانول الحيوي.

الكلمات المفتاحية: الإيثانول الحيوي ، التخمر ، مادة الليجنوسليلوز ، المعالجة المسبقة ، خميرة الخبز

Résumé

Généralement l'industrie agroalimentaire et de transformation des plantes fournissent des quantités importantes de déchets lignocellulosiques qui sont mal exploités. Le but de ce travail est de faire une étude bibliographique sur la valorisation de cette biomasse pour la production de bioéthanol de deuxième génération. La biomasse lignocellulosique est un substrat complexe et composée de structures polymériques de la cellulose, l'hémicellulose et de la lignine. La conversion de la biomasse lignocellulosique en éthanol se fait par la voie de conversion biologique. Un processus typique est habituellement nécessaire pour convertir suffisamment les sucres structuraux de la paroi cellulaire végétale en bioéthanol: prétraitement, hydrolyse acide et/ou enzymatique, fermentation et distillation.

L'hydrolysate de la biomasse lignocellulosique est fermenté par différentes microorganismes, parmi lesquelles on peut citer: *Saccharomyces cerevisiae*, *Escherichia coli* et *Zymomonas mobilis*. *Saccharomyces cerevisiae* est le microorganisme le mieux adapté à la production d'éthanol. Différents paramètres influent la fermentation de bioéthanol doit être étudié et contrôlé afin d'améliorer la production.

Plusieurs études ont été réalisées sur la production de bioéthanol par *Saccharomyces cerevisiae* à partir de différentes biomasse lignocellulosique tel que les déchets de papier. Les résultats de ces études ont montré que l'hydrolysate de la matière lignocellulosique est favorable à la croissance et à la production de bioéthanol.

Mots clés: Bioéthanol, fermentation, matière lignocellulosique, prétraitement, *Saccharomyces cerevisiae*

Abstract

Generally, the agri-food and plant processing industry provides large quantities of lignocellulosic waste which is poorly exploited. The purpose of this work is to make a bibliographic study on the valorization of this biomass for the production of second-generation bioethanol. Lignocellulosic biomass is a complex substrate and composed of polymeric structures of cellulose, hemicellulose and lignin. The conversion of lignocellulosic biomass into ethanol occurs through the biological conversion pathway. A typical process is usually required to sufficiently convert the structural sugars of the plant cell wall in bioethanol pretreatment, acid and/or enzymatic hydrolysis, fermentation and distillation.

The hydrolyzate of the lignocellulosic biomass is fermented by different microorganisms, among which we can mention: *Saccharomyces cerevisiae*, *Escherichia coli* and *Zymomonas mobilis*. *Saccharomyces cerevisiae* is the microorganism best suited to the production of ethanol. Different parameters influencing the fermentation of bioethanol must be studied and controlled in order to improve production.

Several studies have been carried out on the production of bioethanol by *Saccharomyces cerevisiae* from different lignocellulosic biomass such as waste paper. The results of these studies have shown that the hydrolyzate of lignocellulosic material is favorable to growth and to the production of bioethanol.

Keywords: Bioethanol, fermentation, lignocellulosic material, pretreatment, *Saccharomyces cerevisiae*

CONCLUSION

CHAPITRE I :
LA MATIERE
LIGNOCELLULOSIQUE

CHAPITRE II :

LE BIOETHANOL

LES REFERENCERS BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE III :
PROCEDES DE
PRODUCTION DE
BIOETHAOL

INTRODUCTION