

الشعبية الديمقراطية الجزائرية الجمهورية  
République Algérienne Démocratique  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
بومرداس بوقرة أمحمد جامعة  
Université M'hamed Bougara de Boumerdès



**Faculté des Sciences - Département de Chimie**

**Domaine : Science de la matière**

**Filière : Chimie**

**Spécialité : Chimie Analytique**

Mémoire de projet de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Présenté et soutenu par :

- **Melle OUARET Randa**
- **Melle MERCHI Khalida**

**Thème**

**Synthèse et caractérisation d'un bioadditif issu de la biomasse lignocellulosique par hydrolyse en vue de l'amélioration d'indice d'octane des essences**

**Le 23 juin 2024, devant les membres de jury :**

M.BOUZID Mohamed	Professeur / Maitre de conférences A/B	FS-UMBB	Président
Mme SAADI Souad	Professeur / Maitre de conférences A/B	FS-UMBB	Examineur
Mme HAMMADOU Souad	Professeur / Maitre de conférences A/B	FS-UMBB	Promoteur
Mme BOUTALEB Imene	Ingénieure	Laboratoire centrale NAFTAL	Co- Promoteur

**Année universitaire : 2023 /2024**

# *Remerciement*

Nous exprimons notre gratitude envers Allah, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la force, le courage, la santé et la volonté pour accomplir cette tâche humblement.

Nous tenons à remercier notre encadrante, Madame BOUTALEB Imene, pour sa présence et son soutien. Sa présence a permis à notre équipe de s'épanouir professionnellement. Son expertise, ses connaissances et sa passion ont été une source d'inspiration pour nous.

Nous remercions également notre promotrice, Madame HAMMADOU Souad pour avoir accepté de superviser notre mémoire. Sa patience, disponibilité et dévouement tout au long de ce projet ont été inestimables pour nous.

Nous remercions également l'équipe du Laboratoire Central NAFTAL pour leur accueil chaleureux et leur assistance précieuse.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance envers les membres du jury qui ont généreusement accepté d'évaluer notre travail.

Enfin, nous souhaitons exprimer notre gratitude envers toutes les personnes qui ont apporté leur contribution, directe ou indirecte, pour l'élaboration de notre mémoire.



# Dédicace

*Je dédie ce travail :*

**A ma chère mère,**

**A mon cher père,**

*Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard,  
de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes  
objectifs.*

**A mes frères, Khalid ,Noureddine**

**A ma chère sœur, Khouloud**

*Pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.*

**A ma chère binôme, Randa**

*Pour ton soutien et ton travail acharné qui ont été essentiels à la réussite de ce projet.*

*Merci pour cette collaboration exceptionnelle et pour avoir partagé cette aventure académique avec moi, Ton professionnalisme et ta gentillesse ont rendu cette expérience enrichissante.*

**A ma chère cousine, Lamia**

*Qui m'a aidé et supporté dans les moments difficiles.*

**A mes chères amies,**

*Pour votre encouragement et votre présence qui ont rendu ce projet possible,  
de partager les bons moments et de surmonter des défis ensemble. Votre amitié a illuminé  
Cette expérience académique et l'a rendue mémorable. Cette réussite est aussi là votre.*



# Dédicace

*Je dédie ce travail :*

**A ma chère mère,**

*Ce mémoire est le fruit de ton amour infini et de ta force inébranlable. Ta présence bienveillante a été ma source de réconfort et d'inspiration tout au long de ce voyage. Merci pour ton soutien inconditionnel.*

**A mon cher père,**

*À travers ce mémoire, je rends hommage à ton héritage de sagesse et d'amour qui continue à m'inspirer chaque jour. Ta présence, bien que physique, reste vive dans mon cœur, guidant mes pas et illuminant ma route.*

*En ta mémoire,*

**A mes chères sœurs, Dyna, Neila et Nadine**

*Pour leur présence constante et leurs conseils avisés qui ont été comme un baume pour mon parcours académique.*

**A ma chère binôme, Khalida**

*Ta présence douce a transformé chaque défi en une aventure partagée, chaque obstacle en une opportunité de croissance.*

*Merci pour ta générosité, ton dévouement et ton soutien indéfectible qui ont fait de ce voyage académique une expérience inoubliable.*

**A mes proches**

*Pour votre encouragement et votre présence.*

*Ce mémoire est un témoignage de ma gratitude envers vous, qui m'avez soutenu à chaque étape de ce chemin. Votre présence bienveillante et votre soutien inébranlable ont été ma force motrice.*

*Merci du fond du cœur.*

## Résumé

Pour assurer un bon fonctionnement et une longue durée de vie des moteurs à essence, l'utilisation d'un carburant de qualité supérieure s'avère indispensable. À cet égard, l'indice d'octane est un facteur clé permettant à l'essence de résister aux détonations prématurées, et ainsi d'assurer une combustion optimale.

Le présent travail porte sur la synthèse du bioéthanol à partir de la paille.

Plusieurs étapes de traitement ont été mises en œuvre afin d'isoler la cellulose des autres composants tels que l'hémicellulose et la lignine, par des procédés acide puis basique. L'hydrolyse chimique de la cellulose purifiée a ensuite été optimisée.

Les solutions hydrolysées, riches en sucres, ont alors été soumises à une fermentation permettant la formation de bioéthanol. Ce dernier a été récupéré et purifié par distillation, puis caractérisé par diverses techniques analytiques.

## ملخص

لضمان تشغيل محركات البنزين بسالسة واستمرارها لفترة طويلة، من الضروري استخدام وقود عالي الجودة. وفي هذا الصدد يعد رقم الأوكتان عاملاً رئيسياً في تمكين البنزين من مقاومة التفجير المبكر وبالتالي ضمان الاحتراق

الأمثل.

يتكون العمل الحالي من سلسلة من الاختبارات المتعلقة بتركيب الإيثانول الحيوي من القش.

تم إجراء العديد من عمليات معالجة القش، والغرض منها هو فصل السليلوز عن المكونات الأخرى، على وجه

الخصوص الهيميسليلوز واللجنين ومركبات أخرى ويتم ذلك على التوالي في وسط حمضي ثم في وسط أساسي. تم بعد ذلك

تحسين التحلل الكيميائي للسليلوز المنقى.

خضعت المحاليل المنحلّة الغنية بالسكريات للتخمير لتكوين إيثانول حيوي ويتم استرجاع الأخير وتنقيته

بالتقطير؛ ثم تتميز بتقنيات تحليل مختلفة.

## **Abstract**

To ensure the smooth operation and long life of gasoline engines, the use of top-quality fuel is essential. In this respect, octane number is a key factor enabling gasoline to resist premature detonation, thus ensuring optimal combustion.

The present work focuses on the synthesis of bioethanol from straw.

Several processing steps were implemented to isolate cellulose from other components such as hemicellulose and lignin, using acid and basic processes. The chemical hydrolysis of purified cellulose was then optimized.

The hydrolyzed solutions, rich in sugars, were then subjected to fermentation to form bioethanol. The latter was recovered and purified by distillation, then characterized by various analytical techniques.

# SOMMAIRE

Résumé	
Liste des figures	
Liste des Tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction .....	1
<b>CHAPITRE I : Partie théorique</b>	
I. Partie théorique.....	2
Introduction .....	2
I.1 Essence, Indice d'Octane et fonctionnement des moteurs à combustion commandée	2
I.1.1 Notions sur le carburant essence.....	2
I.1.2 Fonctionnement du moteur à allumage commandée.....	2
I.1.3 Indice d'Octane et Phénomène de Cliquetis.....	3
I.1.3.1 Indice d'octane .....	3
I.1.3.2 Importance de l'Indice d'Octane dans le fonctionnement du moteur essence .....	3
I.1.3.3 Additifs conventionnels pour l'amélioration de l'indice d'octane .....	4
I.2 Effets de l'éthanol comme additif sur l'indice d'octane des essences.....	5
I.2.1 Impact de l'éthanol sur l'indice d'octane des essences .....	5
I.2.2 Potentiel et limites d'utilisation de l'éthanol comme additif.....	6
I.3 Bioéthanol .....	7
I.3.1 Définition et processus de fabrication du bioéthanol.....	7
I.3.2 Stratégies de valorisation de la biomasse pour la production de bioéthanol .....	8
A. Bioéthanol de première génération .....	8
B. Bioéthanol de deuxième génération .....	9
C. Bioéthanol de troisième génération .....	10
I.3.3 Perspectives d'intégration du bioéthanol dans les carburants traditionnels.....	11
I.4 Caractéristiques et valorisation de la biomasse lignocellulosique.....	12
I.4.1 Structure et composition de la biomasse lignocellulosique.....	12
A. Cellulose.....	13
B. Hémicellulose .....	13
C. Lignine .....	14
I.4.2 Techniques de prétraitement pour l'extraction de la cellulose et de l'hémicellulose	14
I.4.3 Défis et avancées dans l'utilisation de la paille de blé comme source de biomasse	16
I.5 Hydrolyse de la cellulose en glucose .....	17

I.5.1 Différentes voies d'hydrolyse .....	17
A. Hydrolyse chimique .....	18
B. Hydrolyse enzymatique .....	18
I.5.2 Méthodes d'hydrolyse acide de la cellulose .....	20
I.5.3 Accroissement du rendement en glucose par optimisation des conditions d'hydrolyse .....	20
I.6 Fermentation Alcoolique.....	23
I.6.1 Influence des conditions de fermentation sur le rendement et la qualité de l'éthanol .....	23
I.7 Processus de distillation et rectification pour la récupération et la purification de l'éthanol .....	25
I.7.1 Principes de la distillation et de la rectification dans la séparation des composants	25
I.7.2 Techniques avancées de purification pour l'obtention d'éthanol de haute qualité	26

## **CHAPITRE II : Partie pratique**

II. Partie pratique.....	27
II.1 Sélection et Prétraitement de la Biomasse Lignocellulosique .....	27
II.1.1 Justification du choix de la biomasse .....	27
II.1.2 Processus d'extraction de la cellulose .....	28
II.1.2.1 Broyage grossier .....	28
II.1.2.2 Prétraitement de la biomasse en cellulose.....	28
A. Elimination de l'hémicellulose .....	28
B. Elimination de lignine.....	29
C. Purification de la cellulose séparée.....	30
II.2 Optimisation du processus d'hydrolyse acide .....	30
II.2.1 descriptions du mode opératoire.....	31
II.2.2 Elaboration du plan d'expérience pour l'optimisation des paramètres d'hydrolyses	32
II.3 Neutralisation.....	33
II.4 Fermentation.....	34
II.5 Distillation.....	35
II.6 Méthodes d'analyse.....	35
II.6.1 Densimètre Anton Paar DMA 4500M.....	35
II.6.2 Chromatographie en phase gazeuse (CPG) .....	36
II.6.3 Spectroscopie UV-Visible .....	37

II.6.4 L'utilisation du bioéthanol de synthèse en tant qu'additif dans l'essence sans plomb.....	39
--	----

### **CHAPITRE III : Résultats et discussion**

III. Résultats et discussion.....	40
III.1 Composition de la paille .....	40
III.2 Étude de l'optimisation d'hydrolyse de la cellulose .....	41
III.2.1 Effet de la température et du temps.....	41
III.2.2 Effet de la concentration de l'acide sulfurique .....	43
III.2.3 Effet du rapport massique acide sulfurique/Cellulose sèche .....	44
III.2.4 Effet du rapport molaire acide/base .....	46
III.3 Fermentation alcoolique.....	47
III.3.1 Aspect morphologique de la souche de levures.....	47
III.3.2 Paramètres opératoires et leur influence.....	47
III.4 Distillation et analyse du bioéthanol de synthèse.....	49
Conclusion.....	52
Référence	
Annexes	

# Liste des tableaux

## CHAPITRE I

<b>Tableau I.01</b> : Propriété de l'éthanol.....	5
<b>Tableau I.02</b> : Avantages et les inconvénients de l'éthanol.....	6
<b>Tableau I.03</b> : Les trois générations de bioéthanol.....	11
<b>Tableau I.04</b> : Différents procédés de prétraitement de la biomasse.....	15
<b>Tableau I.05</b> : Composition chimique de la paille de blé.....	16
<b>Tableau I.06</b> : Caractéristiques de l'hydrolyse à l'acide dilué et à l'acide concentré .....	18
<b>Tableau I.07</b> : Principales différences entre l'hydrolyse enzymatique et chimique.....	19

## CHAPITRE II

<b>Tableau II.01</b> : Les paramètres influents sur l'hydrolyse.....	32
<b>Tableau II.02</b> : Les paramètres influents sur l'activité de la levure.....	34

## CHAPITRE III

<b>Tableau III.01</b> : Le rendement de la biomasse lignocellulosique utilisée et la cellulose produit.....	40
<b>Tableau III.02</b> : Effet de la température et du temps sur le rendement glucose.....	41
<b>Tableau III.03</b> : Effet de la concentration d'acide sulfurique sur le rendement glucose.....	43
<b>Tableau III.04</b> : Effet du rapport massique acide / cellulose sèche sur le rendement glucose...	44
<b>Tableau III.05</b> : Effet du rapport molaire acide/base sur le rendement glucose.....	46
<b>Tableau III.06</b> : Densité et pureté de l'éthanol de synthèse et commercial.....	49
<b>Tableau III.07</b> : Résultats d'analyses du bioéthanol par chromatographie.....	50

# Liste des Figures

## CHAPITRE I

<b>Figure I.01</b> : Procédé de fabrication du bioéthanol .....	7
<b>Figure I.02</b> : Production de bioéthanol à partir de la biomasse de première génération.....	9
<b>Figure I.03</b> : Production de bioéthanol à partir de ressources lignocellulosiques de 2 <sup>ème</sup> génération ....	9
<b>Figure I.04</b> . Production de bioéthanol à partir de microalgues (3 <sup>ème</sup> génération) .....	10
<b>Figure I.05</b> . Structure de la biomasse lignocellulosique.....	12
<b>Figure I.06</b> . Composition de la biomasse lignocellulosique.....	13
<b>Figure I.07</b> . Schéma descriptive de la cellulose.....	13
<b>Figure I.08</b> . Les trois principaux monomères qui composent la lignine .....	14
<b>Figure I.09</b> . Impact du prétraitement sur la matière lignocellulosique .....	15
<b>Figure I.10</b> . Schéma simplifié de la production de l'éthanol à partir de la biomasse lignocellulosique .....	17
<b>Figure I.11</b> . Présentation schématique de l'hydrolyse enzymatique de la biomasse lignocellulosique .....	19

## CHAPITRE II

<b>Figure II.01</b> Paille et paille broyée .....	28
<b>Figure II.02</b> : Solution de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	29
<b>Figure II.03</b> : Paille broyée immergé dans la solution de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	29
<b>Figure II.04</b> : Chauffage a reflux en milieu acide .....	29
<b>Figure II.05</b> : Chauffage a reflux en milieu basique .....	30
<b>Figure II.06</b> : Paille après traitement en milieu basique .....	30
<b>Figure II.07</b> : Cellulose après traitement à l'eau de javel .....	30
<b>Figure II.08</b> : hydrolyse de la cellulose en milieu acide .....	31
<b>Figure II.09</b> : les deux phases d'hydrolysat .....	31
<b>Figure II.10</b> : Mesure de Brix par DMA.....	32
<b>Figure II.11</b> : neutralisation de l'hydrolysat .....	33

<b>Figure II.12</b> : PH avant et après neutralisation .....	33
<b>Figure II.13</b> : détoxification de l'hydrolysate .....	34
<b>Figure II.14</b> : hydrolysate pendant la fermentation.....	34
<b>Figure II.15</b> : Distillation Atmosphérique ASTM D86.....	35
<b>Figure II.16</b> : Densimètre DMA 4500M.....	36
<b>Figure II.17</b> : Chromatographe.....	37
<b>Figure II.18</b> : moteur CFR.....	39

### **CHAPITRE III**

<b>Figure III.01</b> : Matière lignocellulosique (paille).....	40
<b>Figure III.02</b> : Cellulose +lignine .....	40
<b>Figure III.03</b> : Cellulose .....	40
<b>Figure III.04</b> : Taux de glucose en fonction du temps pour une température allant de 120°C à 150°C	42
<b>Figure III.05</b> : Taux de glucose en fonction de la concentration de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> pour une température de 180°C et un rapport d'H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /cellulose de 36.....	44
<b>Figure III.06</b> : taux de glucose en fonction du rapport d'H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /Cellulose pour une température de 180°C et une concentration d'H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> de 9%.....	45
<b>Figure III.07</b> : Aspect morphologique de la souche <i>S.cerevisiae</i> utilisée dans la présente étude.....	47
<b>Figure III.08</b> : Aspect du bioéthanol purifié.....	49

## Liste des abréviations

**1G, 2G, 3G** : 1ère génération, 2ème génération, 3ème génération

**A °** : Angströms

**A** : Absorbance

**ANOVA** : Analyse de Variance

**ASTM D86**: American Society for Testing and Materials

**Biochem**: Biochimiste ou biochimie

**CFR**: Cooperative Fuel Research

**°B ou °Bx** : Degré Brix

**°C** : Degré celsius

**CO<sub>2</sub>** : Dioxyde de carbone

**CNN** : Nano cristaux de cellulose

**CPG** : Chromatographie en phase gazeuse

**DMA** : Digital Density Meter

**ETBE** : Ethyl Tert-Butyl Ether

**ε** : Absorptivité molaire

**FID** : Flame Ionization Detector

**GC** : Gas Chromatography

**HSE** : Hygiène, Sécurité et Environnement

**KPa** : Kilos Pascal

**λ** : Longueur d'onde

**LASC** : Liquide Ionique et Auto-Solvant Composé

**MCC** : Cellulose microcristalline

**MJ** : Méga Joules

**MTBE** : Méthyl-Tertio-Butyl-Éther

**MTEP/ha/an** : Million de Tonnes équivalent pétrole/hectare/an

**pH** : Potentiel Hydrogène

**PMB** : Point mort Bas

**PMH**: Point mort Haut

**RON**: Research Octane Number

**ROM** : Research Octane Motor

**RSM** : Méthodologie de surface de réponse

**S. cerevisiae**: Saccharomyces cerevisiae

**TAME**: Tertio-amyl methyl ether

**V/V** : Rapport volumique

**W/W** : Pourcentage en poids par poids

# **INTRODUCTION**

## INTRODUCTION

---

La demande énergétique mondiale ne cesse de croître, stimulée par l'expansion démographique et le développement économique. Cependant, cette augmentation de la demande est confrontée à une diminution progressive des ressources fossiles conventionnelles telles que le pétrole, le gaz naturel et le charbon, entraînant des préoccupations environnementales liées aux émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, il est impératif d'explorer des sources d'énergie renouvelables et durables pour répondre à nos besoins énergétiques actuels et futurs.

Dans ce contexte, l'industrie agroalimentaire et de transformation des plantes génère une quantité considérable de résidus lignocellulosique sous-exploités.

Parmi les alternatives prometteuses, le bioéthanol issu de la biomasse lignocellulosique suscite un intérêt croissant. Cette étude se concentre spécifiquement sur l'utilisation de la paille de blé, une biomasse végétale abondante et naturelle, qui renferme des polymères de sucres tels que la cellulose, composant principal pouvant être hydrolysé pour produire des sucres fermentescibles

L'objectif de ce travail est de produire du bioéthanol deuxième génération en tant qu'additif pour améliorer l'indice d'octane des carburants essence destinée aux moteurs à combustion interne. Cependant, l'accent est mis sur l'optimisation de l'hydrolyse, une étape critique du processus de production du bioéthanol. Cette optimisation vise à accroître le rendement de production. De plus, cette étude cherche à caractériser et à améliorer les propriétés du bioéthanol, notamment son indice d'octane, pour qu'il puisse être utilisé comme additif dans les carburants conventionnels, contribuant ainsi à la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur des transports.

Nous entamons notre étude par des bases théoriques indispensables à une parfaite compréhension des différents aspects abordés, en particulier le carburant essence, la biomasse lignocellulosique, la synthèse de bioéthanol, l'hydrolysethermique et la fermentation.

Le second chapitre sera consacré à la méthodologie suivie et des protocoles mis en œuvre pour la production du bioéthanol ainsi que l'ensemble des analyses effectuées pour sa caractérisation, et l'essai moteur.

# **CHAPITRE I**

## **Partie théorique**

## **I. Partie théorique**

### **Introduction**

Face à une population en croissance exponentielle, l'extraction d'énergie des combustibles fossiles traditionnels (tels que le pétrole, le charbon, le gaz naturel et le nucléaire) se révèle de plus en plus insuffisante pour soutenir les besoins énergétiques mondiaux en constante expansion. Ainsi, l'exploration de solutions alternatives, notamment celle des biocarburants, revêt une importance capitale. En effet, ces derniers représentent une source d'énergie renouvelable largement saluée pour son caractère respectueux de l'environnement. Souvent désignés comme des énergies vertes, les biocarburants présentent une gamme d'avantages, allant de l'amélioration de la santé publique à l'impulsion économique, tout en contribuant de manière significative à la préservation de notre écosystème.

### **I.1 Essence, Indice d'Octane et fonctionnement des moteurs à combustion commandée**

L'essence, élément essentiel de nombreux moteurs à combustion interne, est bien plus qu'un simple carburant. Son indice d'octane, souvent méconnu du grand public, joue un rôle crucial dans le fonctionnement optimal des moteurs à combustion commandée.

#### **I.1.1 Notions sur le carburant essence**

Issus de la distillation et du traitement des fractions légères du pétrole brut, l'essence est composée d'une variété d'hydrocarbures de structures moléculaires différentes et contient également de grandes quantités de soufre, d'oxygène d'azote et d'impuretés [1]. D'une couleur jaune très claire et transparente, l'essence dégage une forte odeur, est hautement inflammable et extrêmement volatile, avec une pression de vapeur comprise entre 35 et 90 KPa à 20°C.

#### **I.1.2 Fonctionnement du moteur à allumage commandée**

Un moteur thermique à allumage commandé, aussi appelé moteur à essence, est un type de moteur à combustion interne alternatif qui convertit l'énergie de la combustion d'un mélange air-carburant (habituellement de l'essence) en travail mécanique en produisant un mouvement rotatif du vilebrequin dans un cylindre dont lequel un piston effectue un mouvement alternatif [2]. Le déplacement du piston est circonscrit entre deux limites

extrêmes dénommées respectivement le point mort haut (PMH) et le point mort bas (PMB). Le volume décrit par l'oscillation du piston constitue la cylindrée unitaire du moteur.

### **I.1.3 Indice d'Octane et Phénomène de Cliquetis**

Lorsque l'on explore les mécanismes complexes qui régissent les moteurs à combustion interne, deux concepts fondamentaux émergent comme des piliers essentiels : l'indice d'octane et le phénomène de cliquetis. Ces deux éléments, bien que distincts, sont étroitement liés dans le monde de l'ingénierie automobile, façonnant la performance et la durabilité des moteurs modernes.

#### **I.1.3.1 Indice d'octane**

L'indice d'octane est une évaluation de la capacité d'un carburant à résister à l'auto-inflammation ou à la détonation dans un moteur à combustion interne, il mesure la capacité d'un carburant à supporter une compression avant de s'enflammer spontanément.

Un indice d'octane élevé indique une plus grande résistance à l'auto-inflammation, permettant ainsi l'utilisation de moteurs à taux de compression plus élevés sans risque de détonation. Cette mesure revêt une importance capitale pour les moteurs à essence, où une détonation prématurée peut endommager le moteur et entraîner une perte de performance. Les carburants avec un indice d'octane élevé sont couramment utilisés dans les moteurs à haut rendement ou à performance élevée [2].

#### **I.1.3.2 Importance de l'Indice d'Octane dans le fonctionnement du moteur essence**

L'indice d'octane revêt une importance capitale dans le fonctionnement des moteurs à essence en raison de son rôle crucial dans la prévention de la détonation prématurée du carburant. La détonation, survenant lorsque le mélange air-carburant s'enflamme de manière incontrôlée avant l'étincelle de la bougie d'allumage, peut entraîner une augmentation brutale de la pression dans la chambre de combustion, générant des forces destructrices et des dommages sévères au moteur.

Des travaux approfondis ont démontré que la détonation peut intensifier les contraintes thermiques sur les composants du moteur, provoquant une surchauffe et une dégradation accélérée. Les carburants dotés d'un indice d'octane élevé sont conçus pour résister à la compression avant l'étincelle, garantissant ainsi une combustion progressive et contrôlée.

Cette caractéristique est essentielle pour maximiser l'efficacité énergétique du moteur tout en minimisant les risques de dégâts mécaniques [3].

Des recherches soulignent l'importance fondamentale d'une bonne qualité de carburant pour assurer un fonctionnement fiable et performant des moteurs à essence, en mettant en évidence l'impact significatif de l'indice d'octane sur la combustion et la performance globale du moteur [2].

### I.1.3.3 Additifs conventionnels pour l'amélioration de l'indice d'octane

En 1992, la loi sur la politique énergétique a été adoptée, obligeant les compagnies pétrolières à ajouter un composé à leur carburant afin de réduire les émissions de gaz d'échappement nocives. Cette pratique d'ajouter des composés pour augmenter l'indice d'octane remonte à l'époque où l'essence au plomb a été interdite en raison des risques pour la santé publique qu'elle représentait.

Les composés oxygénés, tels que les alcools ou les éthers contenant de l'oxygène, peuvent être mélangés à l'essence en petites quantités afin d'améliorer la qualité du carburant :

Le MTBE (Méthyl-Tertio-Butyl-Éther) est pratiquement le seul éther fabriqué dans le monde. Il est formé par la réaction du méthanol avec l'isobutane en présence d'un catalyseur acide (résine échangeuse d'ions). C'est un additif qui, ajouté à l'essence, permet d'augmenter son indice d'octane. Il améliore également la combustion grâce à la présence d'un atome d'oxygène dans sa structure il est miscible en toutes proportions avec l'essence.

Le TAME (tertio-amyl methyl ether) est un éther oxygéné utilisé comme additif il est attrayant en raison de sa faible pression de vapeur et de sa capacité à éliminer les isoamylènes qui ont une très grande réactivité photochimique.

Le méthanol a un bon indice d'octane mais des inconvénients: agressivité, faible pouvoir calorifique, nécessité d'un co-solvant Il peut être produit à partir de charbon, résidus pétroliers, biomasse ou gaz naturel [4].

L'utilisation de l'éthanol comme carburant débuta aux États-Unis à la fin des années 1970, contribuant à réduire les émissions de monoxyde de carbone selon le Clean Air Act de

1990 [5]. Cet additif à indice d'octane élevé est produit par fermentation de sucres ou d'amidon de plantes.

On cite d'autres additifs comme le fer pentacarbonyl, le ferrocène, le nickelcarbonyl, le tétraéthylétain. Aucun de ces produits n'est parvenu au stade industriel pour des raisons de toxicité, de coût ou d'effet secondaire.

## I.2 Effets de l'éthanol comme additif sur l'indice d'octane des essences

Le concept d'utiliser l'éthanol comme carburant remonte à Henry Ford lors de la conception de son premier modèle automobile. L'adoption d'un mélange essence-éthanol débuta à la fin des années 1970 aux États-Unis, permettant de réduire les émissions de monoxyde de carbone.

L'éthanol, aussi appelé "gasohol", est un additif anhydre pour l'essence qui augmente son indice d'octane. Il est obtenu par la fermentation des sucres ou de l'amidon présents dans les plantes.

De manière traditionnelle, l'éthanol est incorporé à l'essence dans des proportions de 5 à 10%, désignées respectivement par les appellations E5 et E10.

L'utilisation d'un mélange essence-éthanol composé à 85% d'éthanol permet de réduire de 30 à 36% les émissions contribuant au réchauffement climatique. De plus, cette solution peut diminuer d'environ 50% la consommation d'énergie issue du gaz naturel.

### I.2.1 Impact de l'éthanol sur l'indice d'octane des essences

Les propriétés de l'éthanol sont présentées dans le tableau I.1. L'éthanol possède des caractéristiques physicochimiques distinctes de celles de l'essence. L'une des principales caractéristiques qui distingue l'éthanol est son indice d'octane nettement plus élevé [6].

**Tableau I.01** : Propriétés de l'éthanol [6].

	<b>Essence</b>	<b>Ethanol</b>
<b>RO N</b>	92	111
<b>Densité(g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,74	0,79
<b>Chaleur de combustion (MJ/Kg)</b>	42.4	26.8
<b>Rapport stœchiométrique air/carburant</b>	14,3	9
<b>Point d'ébullition (°C)</b>	-----	78.5

Grâce à sa valeur d'indice d'octane plus élevée que l'essence traditionnelle, l'éthanol représente un additif prometteur.

Les travaux de recherche ont mis en évidence la capacité de l'éthanol à influencer notablement sur l'indice d'octane lorsqu'il est intégré aux mélanges essences. En effet, l'incorporation d'éthanol dans les carburants permet d'augmenter leur indice d'octane. Cette augmentation de l'indice d'octane se traduit par un double avantage: d'une part, elle optimise le rendement des moteurs et d'autre part, elle contribue à la réduction des émissions polluantes.

**I.2.2 Potentiel et limites d'utilisation de l'éthanol comme additif**

L'éthanol suscite un intérêt croissant en tant qu'additif énergétique, offrant la promesse de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de diversifier nos sources d'énergie. Cependant, son utilisation présente des défis et des limites à prendre en compte comme résumé dans le Tableau I.2 [7].

**Tableau I.02 : Avantages et les inconvénients de l'éthanol [7].**

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
Diminution des émissions de dioxyde de carbone et meilleur rendement énergétique des moteurs à explosion	Les véhicules utilisant l'E85 produisent des émissions plus élevées d'oxyde d'azote, d'éthylène et d'acétaldéhyde que les véhicules à essence
Indice d'octane* élevé permettant une meilleur efficacité des moteurs à explosions	Indice de cétane** faible ne permettant pas son utilisation dans les moteurs à combustion interne sans l'ajout d'un accélérateur d'ignition
Diminution des émissions de particules, de soufre, de benzène et de butadiène 1-3	Augmentation des émissions d'hydrocarbures par évaporation nécessitant un réglage de la pression de vapeur du carburant
Biodégradable	Emission d'acide acétique en cas de réaction entre le catalyseur et le carburant résiduel à l'échappement
Capacité énergétique inférieure an celle de l'essence (21285 kJ kg <sup>-1</sup> pour l'éthanol)	

### I.3 Bioéthanol

Le bioéthanol, une source d'énergie renouvelable, est produit par la fermentation de sucres provenant de diverses sources de biomasse son processus de fabrication implique le prétraitement, l'hydrolyse, la fermentation et le traitement en aval, avec différentes stratégies [8].

L'avenir de la technologie du bioéthanol évolue, avec des progrès dans les méthodes de production et une intégration croissante dans les systèmes de carburant existants [8].

#### I.3.1 Définition et processus de fabrication du bioéthanol

Le bioéthanol est considéré comme l'un des biocarburants les plus prometteurs en raison de ses avantages environnementaux. Son processus de production repose principalement sur l'utilisation de matières premières riches en sucres et en amidon. Cependant, il existe un potentiel important pour diversifier les sources de biomasse utilisées dans la production de bioéthanol. Les résidus agricoles, forestiers et les cultures énergétiques herbacées sont des exemples de biomasse lignocellulosique sous-utilisée qui pourraient être exploitées comme matières premières pour la production de bioéthanol.

Différents procédés de bioconversion ont été développés pour la production de bioéthanol à partir de ces matières premières renouvelables :

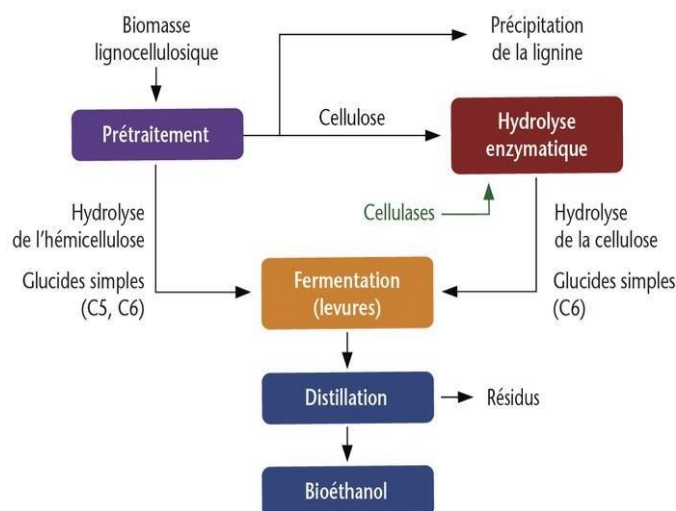


Figure I.01 : Procédé de fabrication du bioéthanol [9].

### **I.3.2 Stratégies de valorisation de la biomasse pour la production de bioéthanol**

Les stratégies de valorisation de la biomasse pour la production de bioéthanol impliquent diverses approches innovantes pour convertir efficacement la biomasse lignocellulosique en bioéthanol. Des études ont mis en évidence l'utilisation réussie de diverses matières premières telles que les gousses de *Delonix regia*.

Pour produire du bioéthanol à partir de biomasse lignocellulosique, des prétraitements comme l'acide ou le LASC, suivis d'une digestion enzymatique sont utilisés. Ces étapes visent à libérer les sucres, optimiser leur fermentation par des micro-organismes comme *Saccharomyces cerevisiae*, et souligner l'importance de ce biocarburant d'origine renouvelable [10].

La pollution sans cesse croissante et la crise du pétrole obligent les pays à diversifier leur moyen de production d'énergie, et, en particulier, à penser aux énergies renouvelables. L'une des menaces les plus préoccupantes à l'heure actuelle est le changement climatique causé par les émissions croissantes de gaz à effet de serre. En extrapolant la tendance actuelle, les émissions mondiales de CO<sub>2</sub>, qui représentent 75% des émissions de gaz à effet de serre, augmenteront de 55% d'ici 2030, ce qui pourrait provoquer un réchauffement global de 1,1 à 6,4°C. Actuellement, la biomasse assure environ 12% des besoins en énergie primaire de la planète et 4% de ceux de l'Union Européenne. Concernant les bioénergies, il existe différentes sources d'énergie issues de la biomasse : les biocarburants, les biocombustibles, dont le bois ou la paille, le biogaz, après méthanisation des déchets organiques [11].

Le bioéthanol peut être produit à partir de tous les groupes de matières premières par conséquent, l'éthanol obtenu à partir du groupe respectif peut être nommé d'après cette génération, c'est-à-dire le bioéthanol à base de 1G, 2G, 3G.

#### **A. Bioéthanol de première génération**

Le bioéthanol de première génération est fabriqué en fermentant des sucres fermentescibles tels que le glucose et le saccharose. Ces sucres sont soit naturellement présents dans certaines plantes telles que la canne à sucre et la betterave sucrière, soit obtenus par hydrolyse enzymatique de l'amidon contenu dans les grains de blé ou de maïs [12].

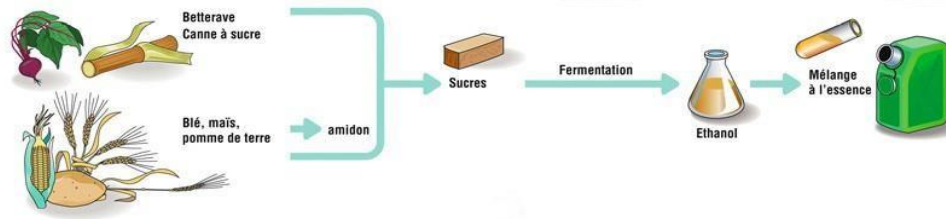


Figure I.02 : Production de bioéthanol à partir de la biomasse de première génération [13].

### B. Bioéthanol de deuxième génération

Le bioéthanol de deuxième génération, également appelé « biocarburant avancé », est produit par des matières premières lignocellulosique et des résidus de forêts agricoles. Les avantages de ces matières premières sont la facilité de disponibilité. Toutefois, l'expansion industrielle du bioéthanol de deuxième génération a connu l'obstacle dû à certains problèmes technologiques. Il s'agit du coût élevé et du rendement moyen du bioéthanol en raison de sa composition de lignine. D'autres problèmes principaux liés à la production de bioéthanol de deuxième génération sont l'exigence de technologies et d'installations de pointe [14].

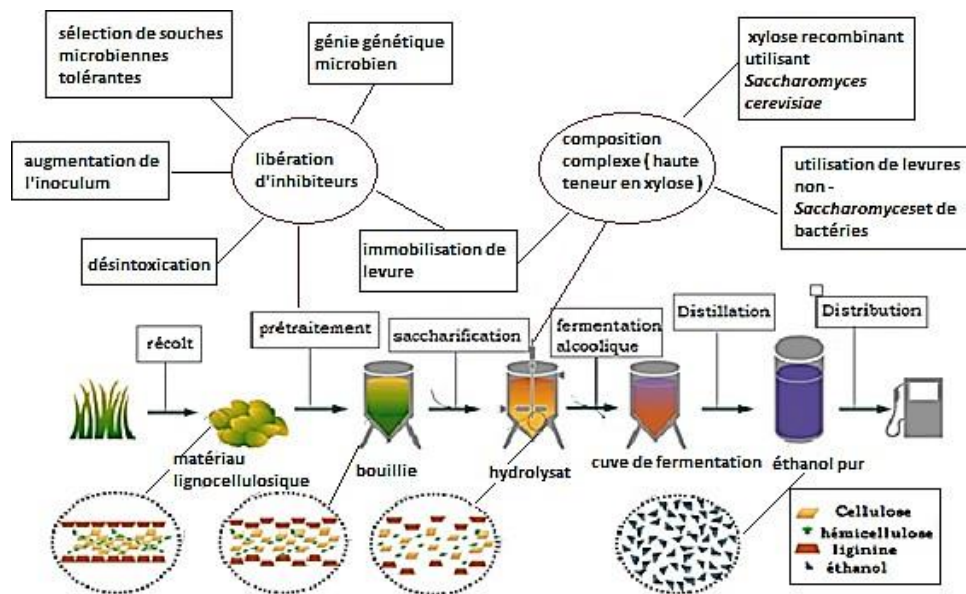


Figure I.03 : Production de bioéthanol à partir de ressources lignocellulosique de 2ème génération [15]

### C. Bioéthanol de troisième génération

Le bioéthanol de troisième génération issu de la biomasse de micro algues pourrait représenter une option de carburant respectueuse de l'environnement.

L'utilisation des algues comme matière première pour la production de bioéthanol présente plusieurs avantages. Tout d'abord, les micro-algues sont capables d'absorber rapidement le dioxyde de carbone et d'accumuler de fortes concentrations de lipides et de glucides, qui sont des composés clés pour la production de bioéthanol. De plus, leur culture est relativement aisée et requiert moins de surfaces terrestres que les plantes traditionnelles [16].

Ainsi, en exploitant la biomasse algale, riche en composés valorisables, pour produire du bioéthanol, ce procédé de troisième génération permettrait de disposer d'un carburant renouvelable et durable, tout en réduisant l'empreinte environnementale par rapport aux biocarburants issus des plantes terrestres.

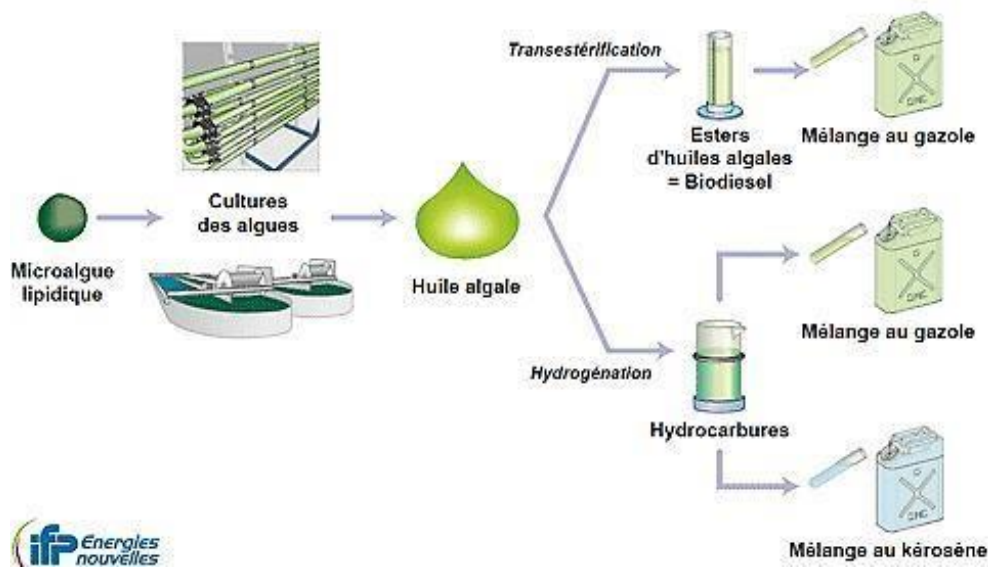


Figure I.04 : Production de bioéthanol à partir de microalgues (3ème génération) [17].

Tableau I.03 : Les trois générations de bioéthanol [18].

	<b>1<sup>ère</sup> génération</b>	<b>2<sup>ème</sup> génération</b>	<b>3<sup>ème</sup> génération</b>
<b>Origine des substrats</b>	Graine de blé, colza, tournesol	Déchets organiques, partie lignocellulosique des végétaux, bois	Microalgue
<b>Procédés mis en œuvre</b>	Fermentation, tran-estérification	Gazéification, hydrolyse enzymatique, méthanisation	Méthanisation, gazification
<b>Produit final</b>	Bioéthanol, biodiesel	Biométhane, bioéthanol, biodiesel, biohydrogène	Biométhane, bioéthanol, biodiesel
<b>Rendement énergétique MTEP/ha/an</b>	1 à 4	3,5 à 5	20 à 40
<b>Stade de maturité technologique</b>	Industriel	Industrialisation à court terme	Recherche/pilote

Chaque génération apporte des avancées technologiques significatives, mais soulève également des défis techniques et économiques. Il est essentiel de poursuivre les efforts de recherche et développement pour optimiser les procédés, réduire les coûts de production et améliorer la durabilité environnementale de ces biocarburants.

### I.3.3 Perspectives d'intégration du bioéthanol dans les carburants traditionnels

L'intégration du bioéthanol dans les carburants traditionnels est prometteuse en raison de son indice d'octane plus élevé, de son efficacité thermique et de son potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Le bioéthanol promet de remplacer les carburants conventionnels en raison de matières premières lignocellulosique et de microalgues, offrant une alternative durable pour l'intégration future des carburants.

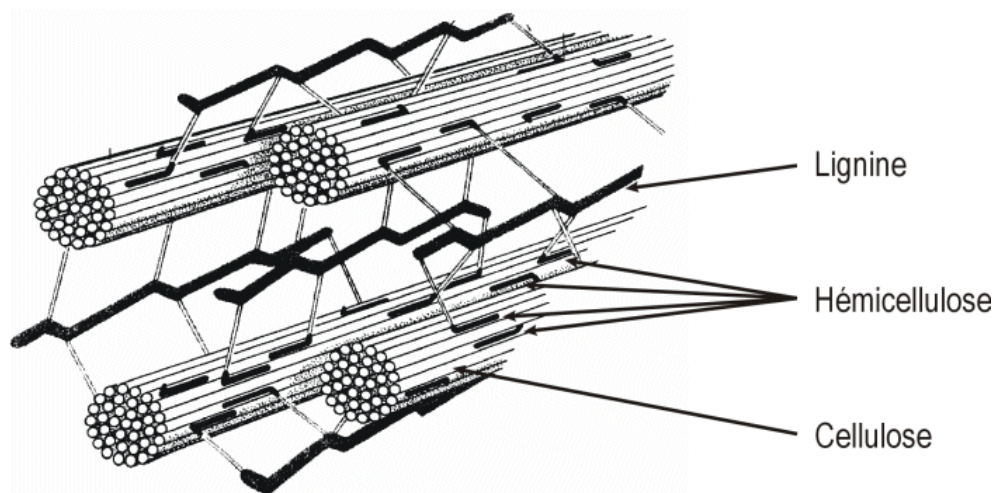
L'intégration du bioéthanol dans les carburants traditionnels atténue non seulement les impacts environnementaux, mais contribue également à un avenir énergétique plus durable.

## I.4 Caractéristiques et valorisation de la biomasse lignocellulosique

Les combustibles fossiles émettent des quantités importantes de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) lorsqu'ils sont brûlés pour produire de l'énergie. Cette accumulation de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère provoque le réchauffement climatique de la planète. Afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre il est crucial de se tourner vers des sources d'énergie renouvelables et durables. Parmi ces sources renouvelables respectueuses de l'environnement la bioénergie est considérée comme prometteuse, et la biomasse lignocellulosique en particulier présente un grand intérêt en raison de son abondance et de son faible coût. En valorisant cette ressource issue de matières végétales telles que le bois et les résidus agricoles en bioéthanol pour alimenter une partie de notre consommation énergétique.

### I.4.1 Structure et composition de la biomasse lignocellulosique

La biomasse lignocellulosique est la ressource biopolymère la plus abondante sur terre, se compose de trois fractions principales : la cellulose, présente à hauteur de 30 à 50%, l'hémicellulose représentant 20 à 30%, et la lignine constituant les 15 à 25% restants [19]. En plus de ces trois composants principaux la biomasse lignocellulosique abrite d'autres éléments en proportions mineures, parmi lesquels on compte notamment les pectines.



**Figure I.05 :** Structure de la biomasse lignocellulosique [20].

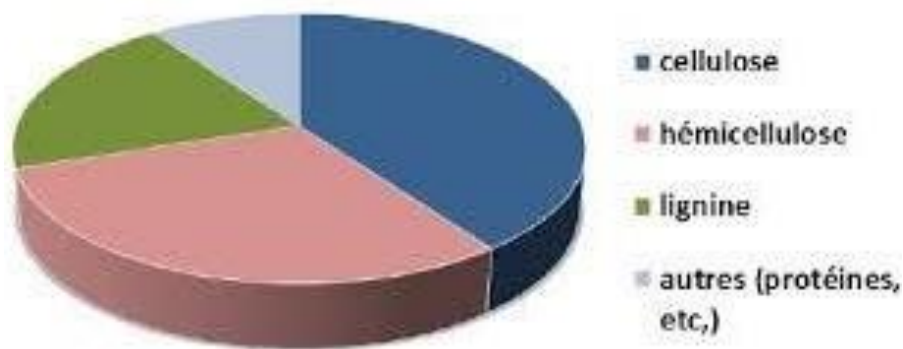


Figure I.06 : Composition de la biomasse lignocellulosique [21].

### A. Cellulose

La cellulose est le biopolymère le plus abondant au monde. C'est un sucre, polymère du glucose, de formule  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , avec  $n$  compris entre 200 et 3000 [22]. Dotée d'un caractère fortement hydrophile, la cellulose assure essentiellement un rôle structural en conférant une rigidité mécanique à la paroi végétale.

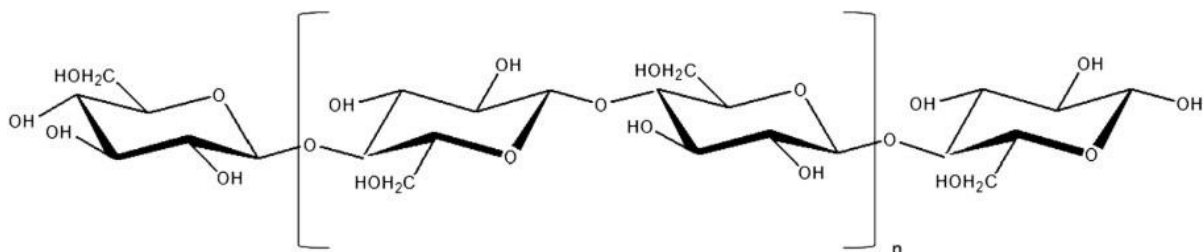


Figure I.07 : schéma descriptive de la cellulose [23].

### B. Hémicellulose

Composante majeure de la lignocellulose après la cellulose. Elle constitue une ressource abondante, renouvelable et fiable, offrant de multiples avantages tels que sa grande disponibilité et sa reproductibilité. L'hémicellulose est un groupe d'hétéros polysaccharides présents dans les parois des cellules végétales. Elle est liée chimiquement à la cellulose et à la lignine. La structure moléculaire de l'hémicellulose est complexe, résultant de l'assemblage d'une grande diversité de chaînes glycaniques aux compositions variées [24].

### C. Lignine

La lignine, polymère hydrophobe de structure complexe et difficile à valoriser, forme le squelette des plantes et des arbres. C'est principalement cette macromolécule qui confère aux végétaux leur structuration robuste et leur rigidité [25].

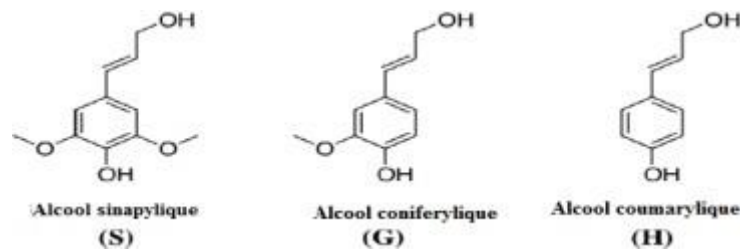


Figure I.08 : les trois principaux monomères qui composent la lignine [26].

### I.4.2 Techniques de prétraitement pour l'extraction de la cellulose et de l'hémicellulose

Le prétraitement de la biomasse représente la principale difficulté rencontrée dans le processus de production des biocarburants. Les méthodes de prétraitement visent à solubiliser et séparer un ou plusieurs composants constitutifs de la biomasse végétale. Le prétraitement de la biomasse a pour effet de rendre la fraction solide restante plus accessible, facilitant ainsi les traitements chimiques ou biologiques ultérieurs qui pourront lui être appliqués. Le complexe lignocellulosique forme une matrice où des chaînes de cellulose et de lignine sont liées entre elles par des molécules d'hémicellulose. L'objectif du prétraitement est de rompre cette matrice en diminuant le degré de cristallinité de la cellulose et en augmentant la proportion de sa forme amorphe, plus accessible aux traitements chimiques ou biologiques ultérieurs [27]. Un schéma illustrant cette destruction est présentée à la figure I.9.

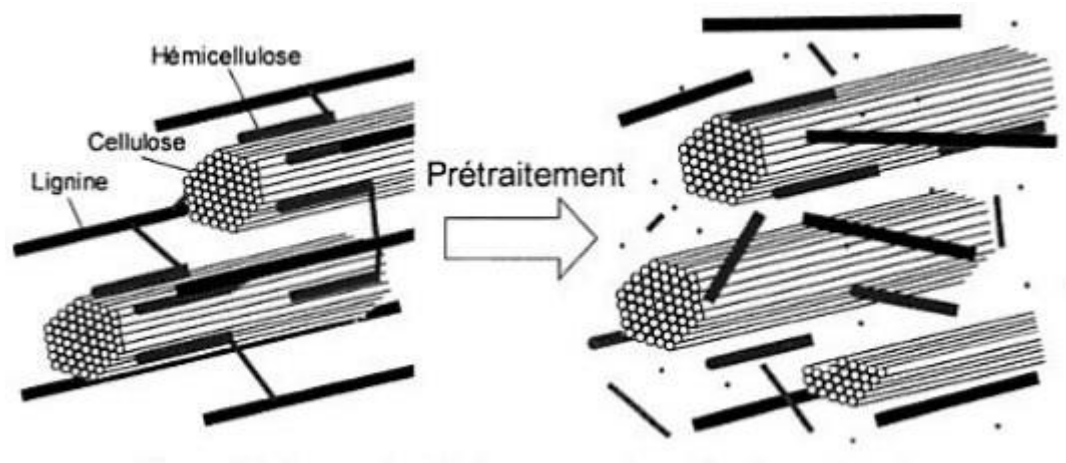


Figure I.09 : Impact du prétraitement sur la matière lignocellulosique [28].

Ci-dessous est exposé un récapitulatif des divers prétraitements typiquement employés pour les biomasses lignocellulosique :

Tableau I.04 : Différents procédés de prétraitement de la biomasse [29].

Type de procédés	Exemples
<b>Procédés physiques</b>	- Broyage et radiations de haute énergie
<b>Procédés chimiques</b>	- Avec des acides - Avec des bases - Avec des solvants organiques (organosolv) - Avec des agents oxydants - Avec des liquides ioniques
<b>Procédés thermochimiques</b>	- Explosion à la vapeur - Prétraitements à l'ammoniac - Explosion au CO <sub>2</sub> - Prétraitement mécanique/alcalin - Torréfaction
<b>Procédés biochimiques</b>	- Utilisation de champignons pour rendre soluble la lignine
<b>Combinés</b>	- Explosion de vapeur catalysée

Outre les prétraitements physiques, thermochimiques et biologiques (voir Tableau I.4), des procédés chimiques ont été largement employés pour le prétraitement de la biomasse lignocellulosique. Parmi ces procédés chimiques figurent l'hydrolyse acide, l'hydrolyse alcaline, ainsi que d'autres procédés spécifiques.

### I.4.3 Défis et avancées dans l'utilisation de la paille de blé comme source de biomasse

La paille de blé est essentiellement constituée de trois composants majeurs : la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Son analyse chimique révèle une richesse en glucides, mais également en protéines, minéraux (calcium et phosphore), silice, fibres détergentes acides et cendres (voir Tableau I.5). Parallèlement, la paille de blé renferme également des composés bioactifs et des vitamines en quantités notables [30].

**Tableau I.05 :** Composition chimique de la paille de blé [31].

Composants	Pourcentage (%)
Matière sèche	89 à 94
Énergie métabolisable mcal/lb	0,67
Protéines brutes	3,6
Fibres au détergent acide	54
Cellulose	33,7 à 40
Hémicellulose	21 à 26
Lignine	11 à 22,9
Cendres	7 à 9,9
Silice et silicates	4,5 à 5,5
Calcium	0,18
Phosphore	0,05

La composition en macro et micro nutriments de la paille de blé n'est pas fixe, mais est susceptible de varier en fonction du cultivateur ou de la variété de blé dont elle est issue. Mais également selon les stades de croissance des plantes au moment de la récolte, la nature du sol et des engrais utilisés pendant la culture, ainsi que les conditions climatiques rencontrées [31]. La structure complexe de la matrice lignocellulosique implique que la production d'éthanol à partir de paille de blé requiert au moins quatre étapes de traitement : un prétraitement, une hydrolyse, une fermentation et une distillation. Contrairement aux matières premières riches en saccharose ou amidons facilement valorisables, les biomasses lignocellulosique comme la paille de blé nécessitent un prétraitement préalable. Celui-ci vise à rendre la cellulose plus accessible aux enzymes afin de permettre une dépolymérisation efficace lors de l'étape d'hydrolyse.

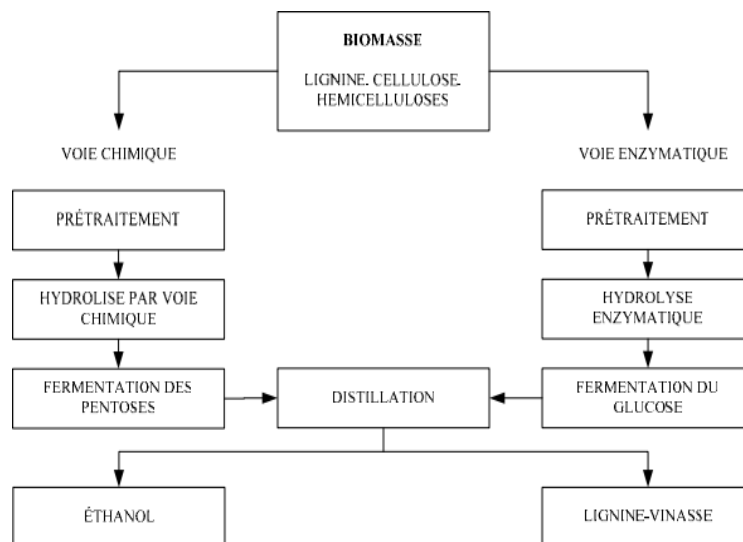
## I.5 Hydrolyse de la cellulose en glucose

L'hydrolyse de la cellulose est un processus essentiel pour convertir la biomasse végétale en sucres fermentescibles, qui sont employés dans différentes industries. Il y a deux principales techniques : l'hydrolyse enzymatique, qui utilise des enzymes cellulolytiques, et l'hydrolyse acide, qui utilise des acides forts pour rompre les liaisons de la cellulose.

Nous examinons ces deux méthodes ainsi que l'importance de l'amélioration des conditions de réaction afin d'accroître la production de glucose. Il est essentiel de mettre en place ces avancées afin d'améliorer l'efficacité de la production de biocarburants et de produits chimiques biosourcés, ce qui contribue à une économie plus durable [32].

### I.5.1 Différentes voies d'hydrolyse

La structure cristalline de la cellulose la rend plus résistante à l'hydrolyse que l'hémicellulose. Par conséquent, l'hydrolyse de la biomasse lignocellulosique nécessite l'utilisation d'un catalyseur, soit un acide (dilué ou concentré), auquel cas on parle d'hydrolyse chimique, soit des enzymes spécifiques, ce qui est alors appelé hydrolyse enzymatique (également connue sous les noms d'hydrolyse biochimique ou saccharification) [33].



**Figure I.10** : Schéma simplifié de la production de l'éthanol à partir de la biomasse lignocellulosique [34].

### A. Hydrolyse chimique

L'hydrolyse chimique peut être effectuée à l'aide d'acide dilué et d'acide concentré pour décomposer la biomasse en sucres fermentables pour la production d'éthanol.

L'hydrolyse de l'acide dilué, est efficace pour libérer les sucres fermentables comme la xylose et le glucose à partir de la biomasse telle que le réchaud de maïs, les pelures de manioc et les déchets végétaux de l'Amazonie [35].

D'autre part, l'hydrolyse acide concentrée, peut également produire efficacement de la xylose à partir de la cuisinière de maïs.

Le choix entre l'hydrolyse acide diluée et concentrée dépend de facteurs tels que la concentration d'acide, le temps de réaction et la teneur en matière sèche, ce qui a un impact sur l'efficacité de la libération du sucre. Les deux méthodes ont montré du succès dans la production de fortes concentrations de sucres réducteurs adaptés à la fermentation ultérieure en bioéthanol, soulignant leur importance dans la production de biocarburants à partir de la biomasse lignocellulosique [36].

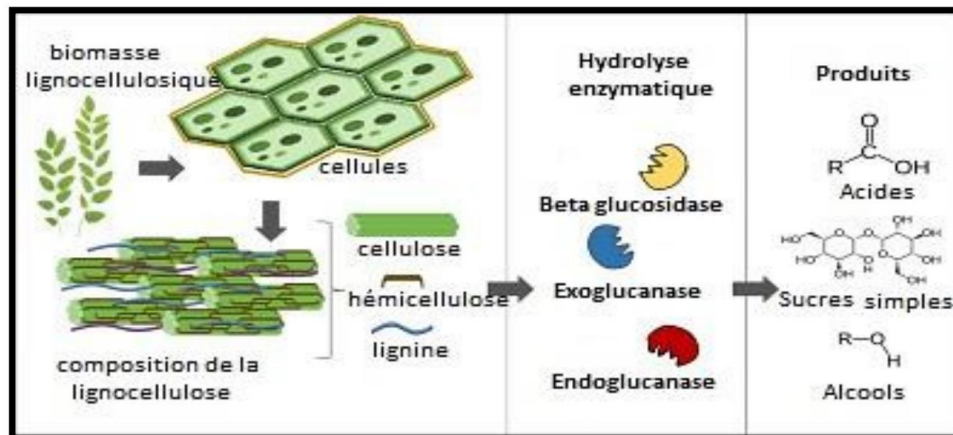
**Tableau I.06 :** Caractéristiques de l'hydrolyse à l'acide dilué et à l'acide concentré [37].

Acide dilué	Acide concentré
Effet mineur sur la cellulose	Hydrolyse de la cellulose
Hydrolyse des hémicelluloses	Hydrolyse des hémicelluloses
Altération de la lignine	Altération de la lignine
Formation de la lignine	Formation d'inhibiteurs de fermentation

### B. Hydrolyse enzymatique

L'hydrolyse enzymatique de la cellulose consiste à décomposer la cellulose en sucres solubles dans l'eau à l'aide d'enzymes cellulolytiques. Il utilise la masse de culture des micro-organismes cellulolytiques comme source enzymatique, en éliminant les étapes de séparation et en améliorant les taux d'hydrolyse et les rendements en sucre.

Des efforts sont en cours pour améliorer la stabilité enzymatique et optimiser les stratégies de processus afin d'augmenter la concentration, le rendement et la productivité du sucre dans l'hydrolyse de la cellulose pour la production de biocarburants [38].



**Figure I.11** : Présentation schématique de l’hydrolyse enzymatique de la biomasse lignocellulosique [39].

En conclusion, le tableau suivant résume les différences les plus importantes entre l’hydrolyse enzymatique et l’hydrolyse chimique :

**Tableau I.07** : Principales différences entre l’hydrolyse enzymatique et chimique [40].

Hydrolyse chimique	Hydrolyse enzymatique
Crée de problème de corrosion	Ne crée pas de problème de corrosion
Rendement d’hydrolyse élevé	Rendement d’hydrolyse plus élevé
Cinétique de processus très courte	Cinétique de processus beaucoup plus lente
Formation des produits indésirables	Pas de formation des produits indésirables

### I.5.2 Méthodes d'hydrolyse acide de la cellulose

L'acidification de la cellulose est possible de plusieurs manières, comme le montrent les contextes de recherche répertoriés.

Une méthode consiste à utiliser de l'acide chlorhydrique concentré produit par absorption de chlorure d'hydrogène, cet acide est ensuite utilisé pour décomposer efficacement la cellulose, ce qui donne un rendement élevé en cellulose microcristalline (MCC) [41].

Une autre approche implique l'utilisation d'acide sulfurique à 64 % à 45 degrés Celsius pendant 1 heure pour créer des nano cristaux de cellulose (CNC) dotés de propriétés physiques et chimiques améliorées, notamment une cristallinité plus élevée et une charge négative à la surface. Ces propriétés sont bénéfiques pour l'activité et l'absorption de l'enzyme [42].

### I.5.3 Accroissement du rendement en glucose par optimisation des conditions d'hydrolyse

En raison de la structure cristalline de cellulose et de sa résistance naturelle, elle n'est pas assimilable directement par les organismes vivants ou les processus industriels.

C'est à ce moment que l'hydrolyse joue un rôle essentiel en rompant les longues chaînes polymériques de la cellulose en monomères de glucose. Dans la production de glucose à partir de biomasse cellulosique, la transformation de la cellulose en glucose revêt une importance capitale dans différentes industries, comme la fabrication de bioéthanol, de produits chimiques biosourcés et de nombreux autres produits à valeur ajoutée issus du glucose [43].

Plusieurs paramètres et conditions clés influencent l'efficacité de l'hydrolyse de la cellulose en glucose. Il est essentiel d'optimiser judicieusement ces facteurs afin d'optimiser le rendement en glucose. Les paramètres clés à prendre en compte sont les suivants [43]:

- **Température:** La température joue un rôle crucial dans l'hydrolyse, une température trop élevée peut dénaturer les enzymes, tandis qu'une température trop basse ralentit considérablement la réaction. La plage de températures optimale varie selon le type d'hydrolyse (acide, enzymatique) et les catalyseurs spécifiques utilisés
- **pH:** Le pH du milieu réactionnel affecte l'activité des enzymes et des catalyseurs, ainsi que la stabilité des produits formés,

Pour l'hydrolyse acide, un pH acide (généralement inférieur à 2) est nécessaire pour faciliter la protonation des liaisons glycosidiques.

Pour l'hydrolyse enzymatique, un pH proche de la neutralité (4-8) est généralement requis pour une activité enzymatique optimale

- **Temps de réaction:** Le temps de réaction est un facteur important qui détermine le degré de conversion de la cellulose en glucose. Un temps de réaction trop court peut entraîner une conversion incomplète, tandis qu'un temps trop long peut conduire à une dégradation du glucose formé ou à une consommation excessive d'énergie
- **Concentration en acide ou en enzymes:** Dans l'hydrolyse acide, la concentration en acide (généralement l'acide sulfurique ou chlorhydrique) affecte la vitesse et l'efficacité de la réaction

Dans l'hydrolyse enzymatique, la concentration en enzymes (cellulases, glucosidases, etc.) est cruciale pour une conversion efficace de la cellulose

- **Taille des particules et prétraitement de la biomasse:** La taille des particules de biomasse cellulosique et les prétraitements appliqués (physiques, chimiques ou biologiques) influencent l'accessibilité de la cellulose aux enzymes ou aux catalyseurs, affectant ainsi l'efficacité de l'hydrolyse.
- **Présence d'inhibiteurs :** Certains composés présents dans la biomasse, tels que les composés phénoliques ou les produits de dégradation des sucres, peuvent inhiber l'activité des enzymes ou des catalyseurs, réduisant ainsi le rendement en glucose.

Des méthodes et des techniques ont été utilisées afin d'améliorer les conditions de l'hydrolyse et d'accroître la production de glucose. On cite certaines techniques couramment employées :

- **Méthodologie de surface de réponse (RSM):** La RSM est une technique statistique puissante qui permet d'étudier l'effet de plusieurs variables indépendantes sur une réponse donnée. Elle implique la construction de modèles mathématiques pour décrire les interactions entre les variables et la réponse, permettant ainsi d'identifier les conditions optimales. La RSM est largement utilisée pour optimiser les conditions d'hydrolyse enzymatique et acide.

- **Plans d'expériences:** Les plans d'expériences, tels que les plans factoriels complets ou fractionnaires, sont utilisés pour étudier l'effet des différents paramètres d'hydrolyse et de leurs interactions sur le rendement en glucose. Ces techniques permettent de réduire le nombre d'expériences nécessaires tout en fournissant des informations précieuses sur les conditions optimales
- **Modélisation cinétique:** La modélisation cinétique implique le développement de modèles mathématiques pour décrire la cinétique de la réaction d'hydrolyse. Ces modèles tiennent compte de facteurs tels que la concentration en substrat, en enzymes ou en catalyseurs, ainsi que de paramètres environnementaux comme la température et le pH. Ils permettent de prédire les conditions optimales pour maximiser le rendement en glucose
- **Techniques d'optimisation numérique:** Des techniques d'optimisation numérique, comme les algorithmes génétiques, la programmation quadratique séquentielle ou les méthodes de descente de gradient, peuvent être appliquées pour trouver les conditions optimales d'hydrolyse en minimisant ou maximisant une fonction objective (rendement en glucose) sous certaines contraintes
- **Analyse de variance (ANOVA):** L'ANOVA est une méthode statistique utilisée pour analyser les résultats expérimentaux et déterminer les facteurs qui ont un effet significatif sur la réponse étudiée (rendement en glucose). Elle permet d'identifier les paramètres clés à optimiser et d'évaluer les interactions entre les variables.

Ces méthodes d'optimisation sont souvent combinées et adaptées en fonction du type d'hydrolyse, des contraintes expérimentales et des objectifs spécifiques de l'étude.

L'accroissement du rendement en glucose par l'optimisation des conditions d'hydrolyse de la biomasse cellulosique présente des implications pratiques significatives dans divers domaines industriels et environnementaux.

## I.6 Fermentation Alcoolique

La fermentation est un processus au cours duquel des micro-organismes, grâce à des enzymes qu'ils sécrètent, transforment les sucres simples comme le glucose en alcool éthylique, selon la réaction suivante [44] :



Il existe une grande variété de bactéries et de levures, mais ce sont les espèces *Saccharomyces cerevisiae* (une levure) et *Zymomonas mobilis* (une bactérie) qui sont actuellement les plus utilisées dans l'industrie pour produire de l'éthanol à partir de sucres [44].

L'espèce *Saccharomyces cerevisiae* est la plus largement utilisée et examinée pour la production de bioéthanol, car elle fait preuve de robustesse et d'une adaptation particulière à la fermentation du glucose issu de la dégradation de la biomasse lignocellulosique [44].

La levure *Saccharomyces cerevisiae* atteint son rendement maximal pour la production d'éthanol à une température de 33°C [45]. Les conditions physicochimiques comme le pH et la température ont un impact significatif sur le déroulement du processus de fermentation. Quant au pH du milieu, les conditions optimales se situent dans une gamme allant de 4 à 4,8 [46].

### I.6.1 Influence des conditions de fermentation sur le rendement et la qualité de l'éthanol

La production d'éthanol par fermentation est grandement influencée par les paramètres environnementaux. La température, l'acidité (pH), la concentration en sucre et la durée de fermentation sont des facteurs clés qui affectent le métabolisme des levures et l'activité des enzymes responsables de cette transformation. En ajustant judicieusement ces conditions, les producteurs peuvent maximiser le rendement et la pureté du bioéthanol obtenu. Une maîtrise adéquate de ces variables est donc essentielle pour une fermentation efficace et un éthanol de qualité supérieure.

#### • Température

La température joue un rôle prépondérant dans la fermentation alcoolique par *Saccharomyces cerevisiae*. L'intervalle de 30°C à 35°C s'avère optimal pour cette levure. En deçà de 30°C ou au-delà de 38°C, les performances fermentaires et les rendements en éthanol

chutent drastiquement. Un autre aspect à considérer est la nature exothermique de la fermentation, dégageant 1,2 MJ de chaleur par kilogramme d'éthanol généré. Cette production de chaleur peut rapidement mener à des températures problématiques, en particulier dans les grands volumes de fermentation industrielle. De plus, des températures trop élevées exacerbent les effets inhibiteurs de l'éthanol sur la croissance levurienne [47].

- **pH**

*S. cerevisiae* a la capacité de fermenter à un pH minimum de 3,5. Cependant, des valeurs entre 4 et 5 sont préférables pour une fermentation optimale. Un pH plus élevé permet de raccourcir la phase de latence et favorise une croissance levurienne maximale. Cet avantage est d'autant plus marqué lorsque le milieu contient des composés inhibiteurs, comme c'est le cas lors de la production d'éthanol de seconde génération à partir de biomasse lignocellulosique. Dans de telles conditions, le maintien d'un pH adéquat autour de 5 s'avère essentiel pour assurer des rendements fermentaires satisfaisants [47].

- **Concentration en sucre**

La quantité d'éthanol produite peut être accrue en augmentant la teneur en sucres du moût jusqu'à un certain seuil. Typiquement, le rendement maximal de conversion des sucres en éthanol est obtenu lorsque la concentration initiale en sucres se situe dans la plage de 150 à 200 grammes par litre de moût. Au-delà de ces valeurs, un excès de sucres n'entraîne pas d'augmentation supplémentaire significative du taux de production d'éthanol [48].

- **Durée de fermentation**

La durée de fermentation exerce une influence notable sur la croissance des micro-organismes responsables de la production d'éthanol. Une fermentation trop courte limite la prolifération microbienne, réduisant ainsi l'efficacité du processus. À l'inverse, une fermentation excessivement longue provoque des effets toxiques sur les micro-organismes. Afin d'obtenir une fermentation complète, il est possible de prolonger sa durée tout en abaissant la température, mais cela a pour conséquence de diminuer le rendement final en éthanol. Un juste milieu doit donc être trouvé concernant le temps de fermentation pour maximiser à la fois la croissance microbienne et la production d'éthanol [48].

## **I.7 Processus de distillation et rectification pour la récupération et la purification de l'éthanol**

Après la fermentation, l'éthanol doit être soumis à des processus de séparation et de purification. La distillation, suivie de la rectification, joue un rôle crucial dans la concentration et la purification de l'éthanol produit. La distillation permet une première récupération, tandis que la rectification élimine les impuretés résiduelles par distillation fractionnée.

### **I.7.1 Principes de la distillation et de la rectification dans la séparation des composants**

La distillation permet de retirer l'alcool et les autres composés secondaires souhaités produits lors de la fermentation du moût fermenté et de les concentrer

La distillation consiste à extraire des vapeurs riches en composants les plus volatils du mélange initial. Le mélange initial n'est pas un mélange simple eau-éthanol, bien qu'il soit l'essentiel, mais un mélange complexe où des produits secondaires issus de la fermentation tels que des aldéhydes, des esters, du méthanol ou encore des alcools dits supérieurs avec plus de deux carbones [49].

Le distillat, obtenu après la distillation contient encore de nombreux composés volatils autres que l'éthanol, la rectification permet de séparer l'éthanol concentré de ces impuretés. Ces derniers sont classés en deux catégories selon leur point d'ébullition par rapport à celui de l'éthanol : les produits de tête (composés à point d'ébullition inférieur) et les produits de queue (composés à point d'ébullition supérieur).

La rectification du distillat est un processus crucial de la distillation, qui vise à purifier le produit obtenu en éliminant les composants volatils indésirables et en augmentant la concentration de substances aromatiques nobles. Ce processus implique la séparation des composants en fonction de leur volatilité [49].

### **I.7.2 Techniques avancées de purification pour l'obtention d'éthanol de haute qualité**

Diverses techniques de purification sont utilisées pour obtenir de l'éthanol de haute qualité. L'adsorption continue à l'aide de zéolite 3A et d'oxyde de calcium peut purifier l'éthanol jusqu'à une concentration de 99,5 %, améliorant ainsi sa qualité. De plus, une méthode de purification de l'éthanol de qualité chromatographique consiste à éliminer les impuretés par adsorption sur charbon actif modifié, ce qui permet d'obtenir une pureté de l'éthanol supérieure à 99,99 % en poids [50].

De nouvelles technologies de séparation, telles que la distillation extractive et les tamis moléculaires, sont utilisées dans les bioraffineries pour récupérer et déshydrater efficacement l'éthanol, réduire les coûts et améliorer l'efficacité énergétique [50].

# **CHAPITRE II**

## **Partie pratique**

## II. Partie pratique

Ce chapitre présente les procédures et les approches utilisées pour étudier la synthèse de bioéthanol à partir de déchets lignocellulosique. Il détaille la méthodologie et les protocoles employés pour examiner ce processus. Dans un premier temps, nous extrayons la cellulose de la paille, puis nous réalisons une hydrolyse optimisée de la biomasse résultante afin de convertir la cellulose en sucres fermentescibles. Ensuite, nous utilisons ces sucres dans un processus de fermentation alcoolique pour produire du bioéthanol. Les étapes de distillation et de rectification ont été effectuées au laboratoire central de NAFTAL, utilisant un équipement étalonné et en observant strictement les normes et les consignes relatives à l'hygiène, à la sécurité et à l'environnement (HSE).

### II.1 Sélection et Prétraitement de la Biomasse Lignocellulosique

La sélection et le prétraitement de la biomasse lignocellulosique sont des étapes cruciales de la production de biocarburants et de produits biochimiques.

Le prétraitement représente l'une des étapes les plus critiques et coûteuses dans la conversion de la biomasse lignocellulosique en biocarburants. En effet, la nature récalcitrante et la structure complexe de cette biomasse rendent le prétraitement indispensable avant sa valorisation. Son efficacité conditionne grandement les rendements de production de biocarburants obtenus. Les principaux objectifs du prétraitement sont d'augmenter l'accessibilité de la biomasse en augmentant sa surface spécifique, en perturbant sa matrice lignocellulosique, en solubilisant l'hémicellulose et/ou la lignine, ainsi qu'en réduisant la taille des particules. Une étape de prétraitement optimisée est donc essentielle pour atteindre des rendements de conversion élevés.

#### II.1.1 Justification du choix de la biomasse

La paille a été sélectionnée comme biomasse pour cette étude en raison de sa disponibilité abondante et de son potentiel à fournir un rendement intéressant en sucre fermentescible. En tant que résidu agricole largement produit dans de nombreuses régions, la paille offre une source renouvelable et peu coûteuse de matière première pour la production d'éthanol. De plus, la composition lignocellulosique de la paille, riche en cellulose, en hémicellulose et en lignine, en fait un substrat idéal pour notre objectif visant à maximiser le rendement en sucre fermentescible. Les efforts visant à valoriser la paille dans le domaine énergétique contribuent également à réduire les déchets agricoles et à promouvoir une

économie circulaire durable. Ainsi, la sélection de la paille comme biomasse s'inscrit parfaitement dans notre démarche visant à développer un bioadditif à haute valeur ajoutée pour améliorer l'indice d'octane des essences tout en assurant une approche écologiquement responsable.

## II.1.2 Processus d'extraction de la cellulose

### II.1.2.1 Broyage grossier

Le broyage de la paille de blé a été réalisé afin d'augmenter sa surface spécifique. Cette action permet une meilleure exposition des enzymes ou des réactifs chimiques pendant le prétraitement, favorisant ainsi une réactivité optimale et une efficacité accrue des réactions ultérieures.



Figure II.01 : paille et paille broyée

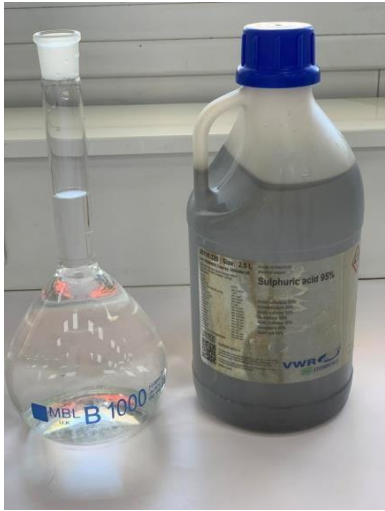
### II.1.2.2 Prétraitement de la biomasse en cellulose

Ce processus initial, nommé pré-hydrolyse, consiste à séparer l'hémicellulose et la lignine de la cellulose. Il comprend plusieurs phases, parmi lesquelles :

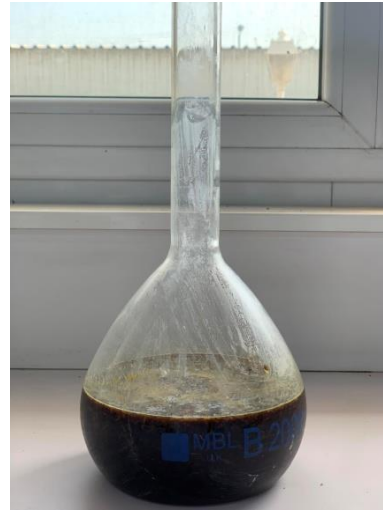
#### A. Elimination de l'hémicellulose

Les hémicelluloses sont les premiers des constituants de la biomasse à réagir durant le prétraitement acide, 50g de la poudre de paille a été immergée dans 250ml d'une solution de  $H_2SO_4$  2 %, puis le mélange a été mis en bas d'un dispositif de chauffage à reflux à  $100^\circ C$ , sous agitation continue pendant 20min.

Une fois le temps écoulé, et après refroidissement du mélange, deux phases ont été observées (solide, liquide). La phase liquide contenant l'hémicellulose est évacuée par filtration tandis que la phase solide (résidu) est rincée à l'eau distillée, afin de subir d'autres phases de traitement.



**Figure II.02 :** Solution de  $H_2SO_4$



**Figure II.03 :** Paille broyée immergé dans la Solution de  $H_2SO_4$



**Figure II.04 :** Chauffage à reflux en milieu acide

## **B. Elimination de la lignine**

La séparation de la lignine du résidu solide obtenu précédemment est réalisé en mettant en contact sous agitation ce dernier à une solution de NaOH à 1,5 % à reflux ( $T=121^{\circ}C$ ) pendant 20min. Après refroidissement deux phases (solide, liquide) ont été obtenues. La phase solide composée de cellulose, est récupérée par filtration puis rincé à l'eau distillée. La lignine est transférée dans la phase liquide (filtrat).



**Figure II.05 :** Chauffage a reflux en milieu basique



**Figure II.06 :** Paille après traitement en milieu basique

### C. Purification de la cellulose séparée

Le résidu de cellulose issu du traitement basique, reconnaissable par sa teinte jaunâtre, est exposé à une solution de javel à 2 % dans un volume de 100 ml. Ce processus est généralement utilisé pour désinfecter et décolorer les matières. Après séparation par filtration de la solution de javel, la cellulose (le résidu) présente une couleur blanchâtre, comme illustré dans la figure II.7.



**Figure II.07 :** Cellulose après traitement à l'eau de javel

## II.2 Optimisation du processus d'hydrolyse acide

La cellulose est un polymère complexe composé de longues chaînes de glucose lié ensemble par des liaisons chimiques fortes. Cette structure particulière confère à la cellulose une grande stabilité, mais complique son utilisation en tant que source d'énergie ou de matière première industrielle. Cependant, l'hydrolyse chimique permet de rompre ces liaisons covalentes, libérant ainsi les unités de glucose individuelles. Le glucose obtenu peut alors être

valorisé pour la production de divers composés chimiques, biocarburants ou matériaux cellulosiques.

### II.2.1 Description du mode opératoire

La cellulose sèche est d'abord immergée dans une solution d'acide sulfurique concentré. Le mélange est ensuite agité de manière continue et chauffé à reflux sous un dispositif approprié. Une fois le temps d'hydrolyse écoulé, la solution est refroidie pour arrêter la réaction. À ce stade, deux phases distinctes sont observées : une phase solide constituée du résidu de cellulose et une phase liquide contenant les sucres fermentescibles résultant de l'hydrolyse. Pour évaluer la concentration en sucres dans la phase liquide, la mesure du Brix<sup>°</sup> est réalisée à l'aide d'un appareil préalablement étalonné. Cette mesure est obtenue par une simple injection de l'échantillon dans la cellule de mesure de l'appareil, fournissant ainsi une indication précise de la concentration en glucose.



**Figure II.08** : hydrolyse de la cellulose en milieu acide



**Figure II.09** : les deux phases d'hydrolysat



**Figure II.10 :** Mesure de Brix par DMA.

## II.2.2 Elaboration du plan d'expérience pour l'optimisation des paramètres d'hydrolyses

Pour élaborer un plan d'expérience visant à optimiser les paramètres d'hydrolyse de la cellulose, nous avons suivi les lignes directrices d'un article de référence dans le domaine. Nous avons sélectionné avec soin les variables clés à différents niveaux à l'aide d'une méthodologie de planification expérimentale appropriée : la température et le temps de réaction, la concentration de l'acide sulfurique, rapport masse acide sulfurique / cellulose sèche et le rapport molaire acide/base. Ces paramètres seront explorés à différents niveaux à l'aide d'une méthodologie de planification expérimentale appropriée comme le montre le tableau II.01.

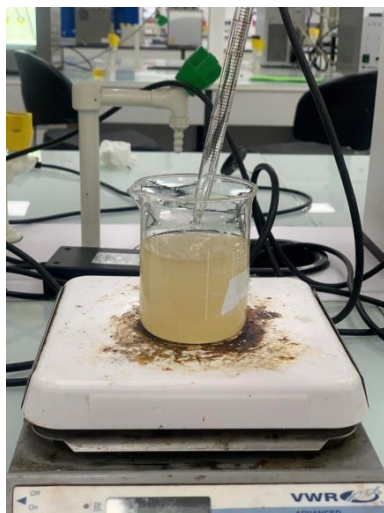
**Tableau II.01:** Les paramètres influents sur l'hydrolyse

Paramètres	Valeur minimum (-1)	Valeur centré (0)	Valeur maximale (1)
Température (°C)	120	150	180
Temps (min)	30	60	90
Concentration d'acide (%)	3	6	9
Rapport acide sulfurique/cellulose sèche	12	24	36
Rapport acide/base	1	2	3

Pour étudier l'impact du temps et de la température, nous avons maintenu la concentration d'acide sulfurique et le rapport de masse acide sulfurique/cellulose sèche à des niveaux minimaux, afin de minimiser leur influence sur la solution. Une fois que les conditions optimales de température et de temps ont été déterminées, nous avons exploré l'effet de la concentration d'acide en fixant le rapport de masse acide sulfurique/cellulose sèche à son maximum. L'objectif était de déterminer la concentration minimale d'acide nécessaire pour éviter la formation de furfural, tout en maximisant le rendement en glucose. La concentration d'acide offrant le meilleur rendement en glucose a été sélectionnée comme valeur optimale pour valider le rapport de masse acide sulfurique/cellulose sèche. Enfin, une neutralisation partielle a été introduite comme une innovation de ce processus. Les essais portant sur l'impact du rapport acide/base molaire sur le rendement en glucose ont été réalisés en trois répétitions pour assurer la fiabilité des résultats. Ces résultats seront détaillés et discutés dans le chapitre trois.

### II.3 Neutralisation

Après avoir obtenu l'hydrolysate par le processus d'hydrolyse de la cellulose, nous avons procédé à sa neutralisation à l'aide de soude (NaOH). Cette neutralisation était cruciale pour ajuster le pH de la solution à un niveau optimal pour la fermentation ultérieure.



**Figure II.11** : neutralisation de l'hydrolysate



**Figure II.12** : PH avant et après neutralisation

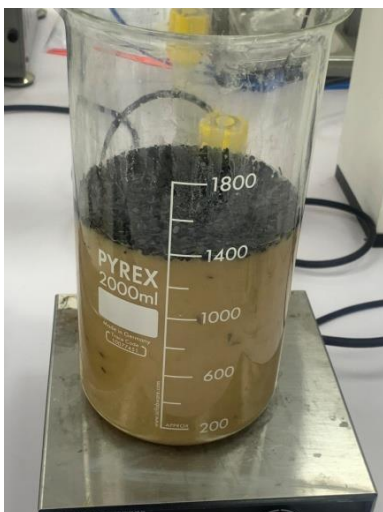
## II.4 Fermentation

La levure *Saccharomyces cerevisiae* est choisie pour fermenter les solutions riches en sucre, appelées moûts. Pour démarrer l'activation de la levure, une quantité de 10 g est ajoutée à 100 ml de moût dans un bécher stérilisé, à température ambiante. Les hydrolysats de cellulose, préalablement détoxifiés par traitement au charbon actif pour éliminer sélectivement les substances potentiellement toxiques ou inhibitrices de la croissance microbienne, sont ensuite soumis à une fermentation alcoolique. Cette fermentation se déroule dans des conditions anaérobies, en présence de la levure *Saccharomyces cerevisiae* activée dans un rapport massique précis de 1 pour 10.

Pendant cette phase de fermentation, maintenue à une température de 30 °C, le mélange est agité à 200 tours par minute, pour une durée totale de 72 heures.

**Tableau II.02:** Les paramètres influents sur l'activité de la levure

Paramètres Opérateurs	Valeurs optimales pour l'activité de la levure
Température	30°C
pH	5
Sucre fermenté	glucose
Temps de fermentation	72h
Type de fermentation	Anaérobie



**Figure II.13 :** détoxification de l'hydrolysat



**Figure II.14 :** hydrolysat pendant la fermentation

## II.5 Distillation

La solution fermentée est transférée dans un ballon de distillation d'une capacité de 125 ml, qui est ensuite placé dans l'appareil de distillation atmosphérique ASTM D86, comme représenté dans la figure. L'objectif de cette opération de distillation est de chauffer le ballon à une température d'environ 80 °C, légèrement supérieure à la température d'ébullition de l'éthanol qui est de 78,5 °C. Pendant la distillation, la vapeur se forme, s'élève et ensuite se condense dans un bain de refroidissement, ce qui entraîne la transition de la vapeur à l'état liquide. Le liquide condensé est collecté dans une éprouvette d'une capacité de 100 ml.



Figure II.15 : Distillation Atmosphérique ASTM D86

## II.6 Méthodes d'analyse

### II.6.1 Densimètre Anton Paar DMA 4500M

Ce dispositif utilise la méthode des corps oscillants pour mesurer la densité d'un liquide. Une cellule de mesure, de volume constant et connu, est utilisée à cet effet. Lorsque le liquide est introduit dans la cellule, des vibrations non amorties se produisent, dont la fréquence varie en fonction de la masse du liquide. Cet appareil permet des mesures de masse volumique dans une plage allant de 0 à 3 g/cm<sup>3</sup>, avec une précision de 5x10<sup>-5</sup> g/cm<sup>3</sup>. De plus, il est capable de mesurer la température dans une plage de 0 à 90°C, avec une précision de 0,03°C.

Avant chaque mesure et après le nettoyage, des vérifications à l'air sont effectuées pour assurer la fiabilité des valeurs obtenues. Dans notre cas, cet appareil est utilisé pour évaluer la concentration en sucre dans les hydrolysats obtenus, exprimée en degrés Brix ( $^{\circ}\text{B}$ ).

En outre, il peut mesurer la pureté et la densité de l'alcool obtenu après distillation. Les résultats peuvent être exprimés en termes de masse volumique ou de concentration, tels que les degrés Brix, le pourcentage en volume d'alcool (%v/v) ou le pourcentage en masse d' $\text{H}_2\text{SO}_4$  (%w/w).

L'échelle de Brix est spécifiquement utilisée pour quantifier la quantité de sucre présente dans un liquide, et elle est exprimée en degrés Brix ( $^{\circ}\text{B}$  ou  $^{\circ}\text{Bx}$ ).

Un degré Brix équivaut 1 gramme de saccharose pour 100 g de solution analysée.



Figure II.16 : Densimètre DMA 4500M

### II.6.2 Chromatographie en phase gazeuse (CPG)

La chromatographie en phase gazeuse (CPG), également appelée gas chromatography (GC), est une méthode de séparation utilisée pour analyser des mélanges de molécules volatiles, désignées sous le terme d'analytes. Un échantillon est introduit dans un flux de gaz porteur qui traverse une colonne contenant une phase stationnaire. Les composés de l'échantillon se séparent en fonction de leur affinité pour la phase stationnaire et de leur temps de rétention dans la colonne. Chaque composé sort de la colonne séquentiellement et est détecté par un détecteur approprié.

Les conditions spécifiques d'analyse sont les suivantes :

- Température du four : maintenue constante à 45 °C pendant 3 minutes, puis augmentée à un taux de 20 °C par minute jusqu'à atteindre 360 °C, maintenue pendant 10 minutes.
- Température de l'injecteur : 275 °C.
- Température du détecteur : FID (Flame Ionization Detector), 365 °C.
- Mode d'injection : fractionnement 69:1, avec un volume d'injection de 1 µL.
- Débit du gaz vecteur : 0,25 ml/min.

Le dispositif utilisé pour réaliser une analyse en chromatographie en phase gazeuse est communément appelé chromatographe. Il est composé de divers éléments, comme représenté dans le schéma ci-dessous :

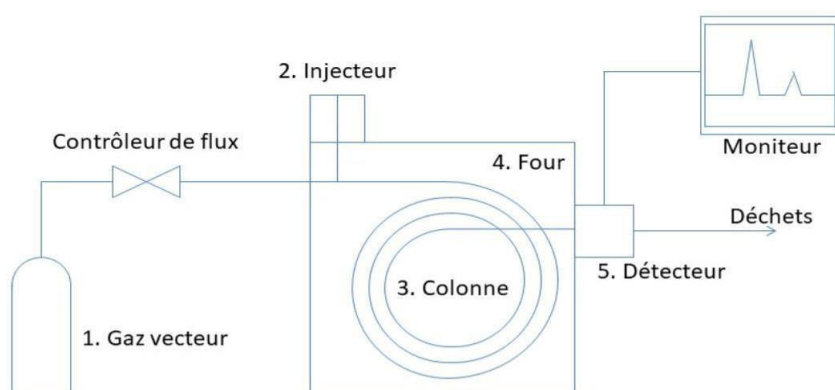


Figure II.17 : Chromatographe

### II.6.3 Spectroscopie UV-Visible

Les échantillons de bioéthanol de synthèse ont été analysés et dosés par spectroscopie UV-Visible. La procédure implique la dilution de l'échantillon de bioéthanol dans l'hexane, suivi de l'analyse de la solution obtenue à une longueur d'onde d'environ  $\lambda = 195$  nm. Ces analyses ont été réalisées à l'aide d'un spectromètre de type UV-1601 SHIMADZU.

Les dosages des échantillons de bioéthanol ont été effectués à partir d'une courbe d'étalonnage préalablement établie, en utilisant la méthode des ajouts dosés. Cette méthode consiste à prélever plusieurs volumes identiques VX (5 ml) de l'échantillon à doser, dont la concentration en analyte Cx doit être déterminée. Chaque prélèvement est placé dans une fiole

de 10 ml, à laquelle on ajoute des quantités connues d'une solution de référence de concentration C (19,72 g/L) en éthanol étalon (Biochem, 96 %, densité d = 0,778), ainsi que de l'hexane pour atteindre un volume total Vt de 10 ml pour chaque échantillon à analyser.

Chaque solution préparée, ayant une concentration Ct et un volume Vt, est analysée par spectroscopie UV-visible pour déterminer son absorbance At, exprimée par l'équation

$$A = \varepsilon \cdot l \cdot C_t.$$

La concentration totale en analyte (éthanol) dans chaque fiole, Ct, est calculée en fonction des volumes V et Vx (volume de l'échantillon à doser) selon l'équation:

$$C_t = \frac{(C \cdot V + C_x \cdot V_x)}{V_T}$$

L'absorbance correspondante est donnée par:

$$A = \varepsilon \cdot l \cdot C_t = \varepsilon \cdot l \cdot \frac{(C \cdot V + C_x \cdot V_x)}{V_T}$$

Cette relation peut être réarrangée pour exprimer l'absorbance en fonction du volume ajouté V d'éthanol de référence,  $A = a \cdot V + b$ , où a et b sont des constantes déterminées à partir de la droite d'étalonnage.

Le rapport  $b/a = C_x \cdot V_x / C$  permet de calculer la concentration Cx en analyte dans l'échantillon à doser:

$$C_x = \frac{b \cdot C}{a \cdot V_x}$$

Les valeurs d'absorbance pour chaque fiole en fonction du volume d'éthanol de référence ajouté sont répertoriées dans le tableau suivant :

<b>V(ml)</b>	0	2	4
<b>A</b>	0,6	0,8	1

Cette méthode permet une analyse précise de la concentration en éthanol dans les échantillons de bioéthanol, en utilisant une approche standardisée de calibration et de mesure par spectroscopie UV-Visible.

#### II.6.4 L'utilisation du bioéthanol de synthèse en tant qu'additif dans l'essence sans plomb

Des tests ont été effectués pour évaluer l'efficacité d'un bioéthanol synthétisé en tant qu'additif visant à améliorer la résistance à la détonation de l'essence, en remplacement des additifs toxiques couramment utilisés tels que le ETBE et le MTBE. Pour évaluer cette efficacité, nous avons ajouté 3% de notre bioéthanol à 300ml de l'essence sans plomb, puis mesuré la résistance à la détonation à l'aide d'un moteur CFR. Les résultats de ces tests sont présentés dans le chapitre III.



Figure II.18 : moteur CFR

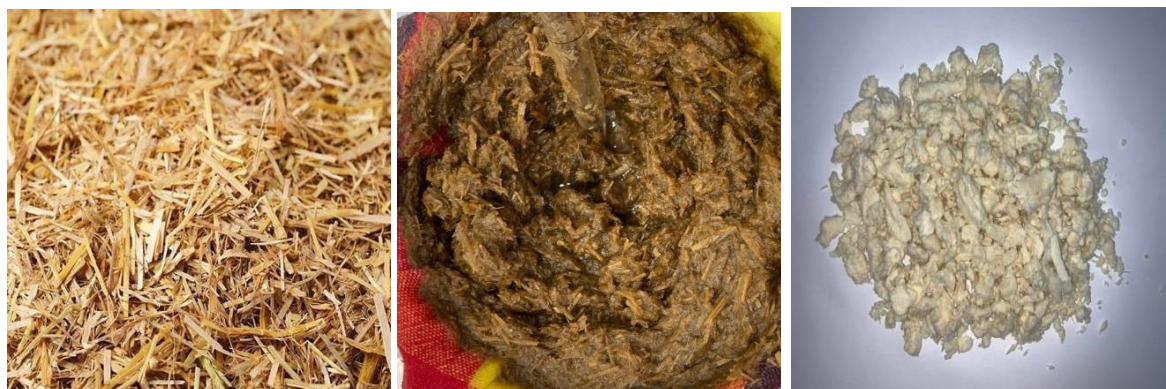
# **CHAPITRE III**

## **Résultats et discussion**

### III. Résultats et discussion

Cette section présente et interprète les résultats obtenus au cours de nos expériences, qui se sont concentrées sur l'optimisation de l'hydrolyse, de la fermentation et de la distillation pour la production de bioéthanol. Nous analyserons les données recueillies à chaque étape du processus, mettrons en évidence les tendances observées et discuterons de leur signification par rapport à nos hypothèses initiales et aux travaux existants dans le domaine. L'objectif est de fournir une compréhension approfondie des phénomènes étudiés et d'évaluer l'impact de nos résultats sur l'efficacité et la viabilité de la production de bioéthanol.

#### III.1 Composition de la paille



**Figure III.01: Matière  
lignocellulosique (paille)**

**Figure III.02: Cellulose +lignine**

**Figure III.03: Cellulose**

D'après les données de pesée consignées dans le tableau III.1, le taux de récupération de la cellulose se situe entre 30 et 43%. Ce rendement d'extraction, qui avoisine les 95%, prend en considération la présence d'impuretés résiduelles dans le produit final.

**Tableau III.01** : le rendement de la biomasse lignocellulosique utilisée et la cellulose produit

Quantité de biomasse utilisée	Quantité de cellulose produite
50g	22,3g
65g	29,2g
78g	35,7g

### III.2 Étude de l'optimisation d'hydrolyse de la cellulose

Conformément à l'approche préconisée par Ni et al. (2013), qui repose sur l'utilisation d'acides à faible concentration, avec des température relativement élevées à des temps réduit, nous avons sélectionné cinq paramètres principaux dans le processus d'optimisation de l'hydrolyse chimique de la cellulose : Le temps, la température, concentration acide sulfurique , rapport massique acide sulfurique / cellulose sèche et le rapport molaire acide/base .

L'influence de chaque paramètre sur le rendement en glucose a été étudiée séquentiellement, tout en maintenant autres paramètres constants.

#### III.2.1 Effet de la température et du temps

Pour investiguer l'impact du temps et de la température, nous avons maintenu la concentration d'acide sulfurique et le rapport masse acide sulfurique/cellulose sèche à des niveaux minimaux.

Les résultats de l'effet de la température et du temps sur le rendement du glucose sont présentés dans le tableau III.02.

**Tableau III.02** : effet de la température et du temps sur le rendement glucose

Expériences	Concentration d'H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%)	Température (°C)	Temps (minutes)	Rapport H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /Cellulose	Taux de glucose (g/l)
1	3	120	30	12	86,6
2	3	120	60	12	88,4
3	3	120	90	12	88,1
4	3	150	30	12	88,4
5	3	150	60	12	99,8
6	3	150	90	12	98,0
7	3	180	30	12	92,0
8	3	180	60	12	115,5
9	3	180	90	12	121,6

- **Effet de la température**

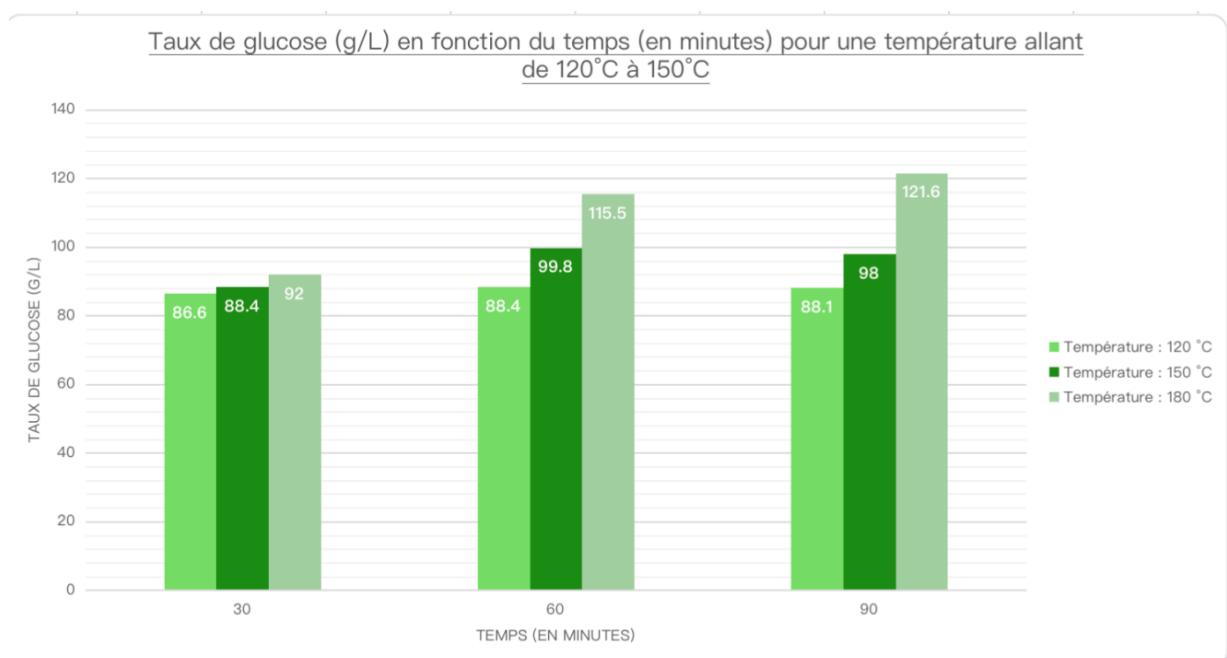
Les expériences montrent que les taux de glucose augmentent généralement avec l'augmentation de la température.

Par exemple, les expériences 8 et 9, réalisées à 180°C avec une concentration de 3% d'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, présentent les taux de glucose les plus élevés (115.5 g/L et 121.6 g/L respectivement).

- **Effet du temps de réaction**

En général, une augmentation du temps de réaction semble favoriser une hydrolyse plus complète de la cellulose, bien que ce soit plus marqué dans certaines conditions que dans d'autres.

Par exemple, l'expérience 9 (90 minutes à 180°C avec 3% d'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) montre une nette augmentation du taux de glucose par rapport aux expériences avec des temps plus courts sous les mêmes conditions de température et de concentration.



**Figure III.04 :** Taux de glucose en fonction du temps pour une température allant de 120°C à 180°C

### ❖ Conditions optimales de la température et du temps

Les expériences 8 et 9 semblent indiquer une possible condition optimale avec une température de 180°C, une concentration de 3% d'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et un temps de réaction de 90 minutes, produisant les taux de glucose les plus élevés dans cette étude.

### III.2.2 Effet de la concentration de l'acide sulfurique

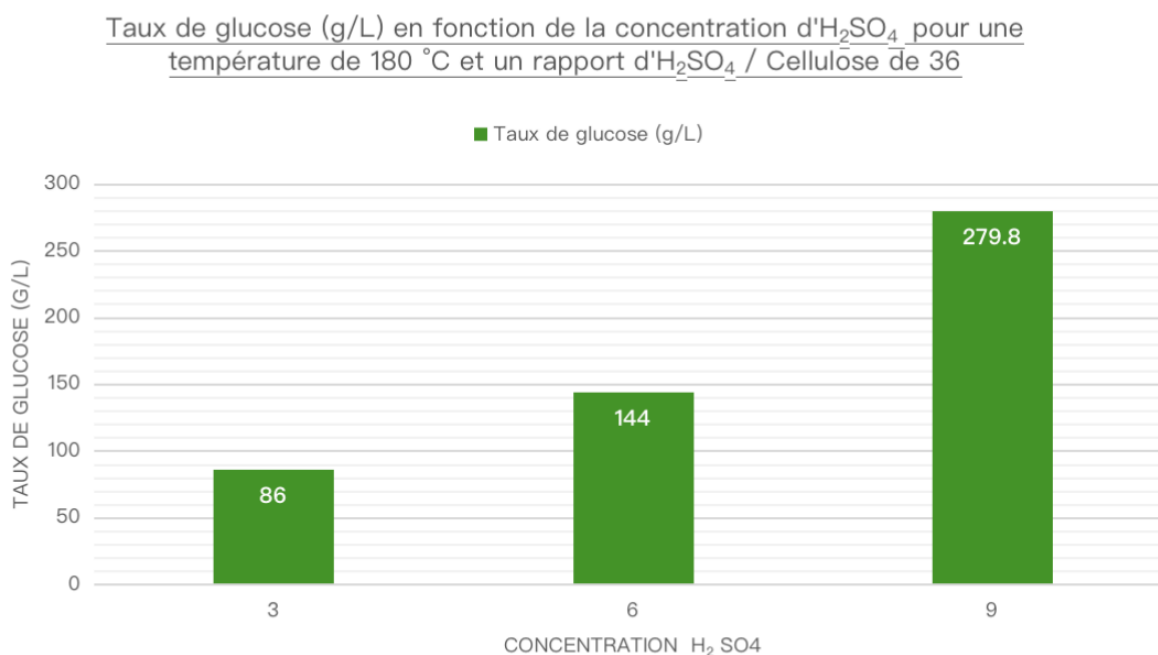
Une fois que la température et le temps optimaux ont été déterminés, nous avons étudié l'effet de la concentration d'acide sulfurique en fixant le rapport masse acide sulfurique/cellulose sèche à son maximum.

Les résultats de l'effet de concentration de l'acide sulfurique sur le rendement du glucose sont présentés dans le tableau III.03.

**Tableau III.03** : effet de la concentration d'acide sulfurique sur le rendement glucose

Expérience	Concentration d'H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Température (°C)	Temps (min)	Rapport H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /Cellulose	Taux de glucose (g/L)
1	9	180	90	36	279,8
2	6	180	90	36	144
3	3	180	90	36	86

On observe que les taux de glucose augmentent avec une concentration plus élevée d'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Par exemple, l'expérience 1 avec 9% d'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a produit un taux de glucose très élevé de 279.8 g/L, tandis que l'expérience 3 avec 3% d'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a donné un taux beaucoup plus bas de 86 g/L. Cela confirme que des concentrations plus élevées d'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> favorisent une meilleure hydrolyse de la cellulose en augmentant l'acidité du milieu réactionnel. Il est à noter cependant que même avec ces concentrations plus élevées, l'acide sulfurique reste une concentration d'acide relativement faible dans le contexte de ces expériences.



**Figure III.05 :** Taux de glucose en fonction de la concentration de  $H_2SO_4$  pour une température de 180°C et un rapport d' $H_2SO_4$ /cellulose de 36

❖ **Condition optimale de la concentration de l'acide sulfurique :**

L'expérience 1 semble indiquer une possible condition optimale avec une concentration de 9%

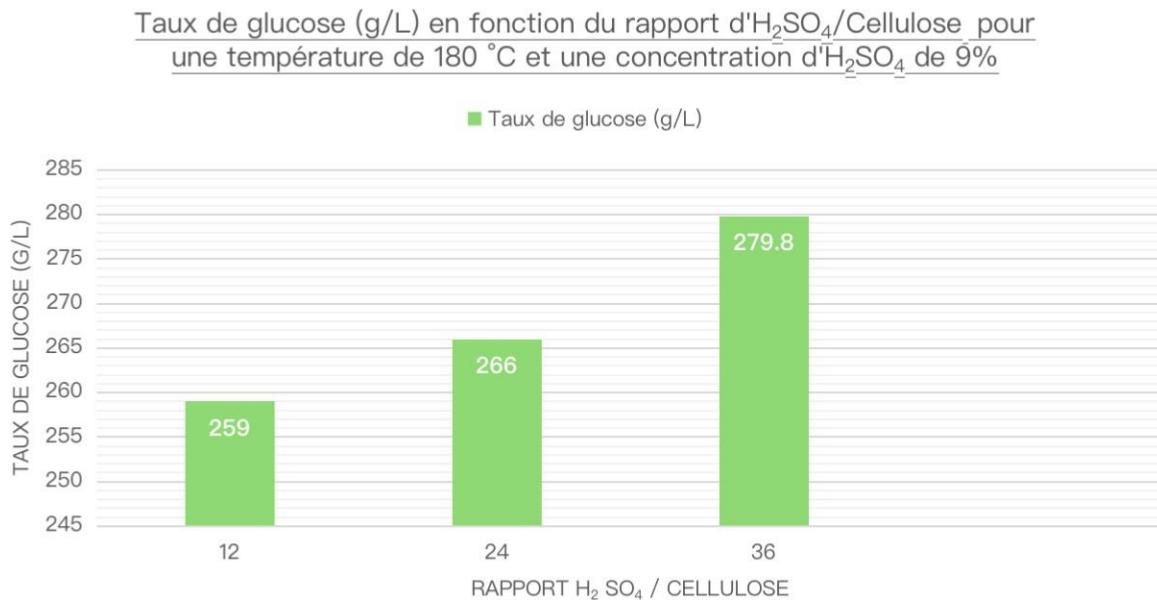
### III.2.3 Effet du rapport massique acide sulfurique/Cellulose sèche

La concentration qui a produit le meilleur taux de glucose a été sélectionnée comme valeur optimale pour confirmer le rapport masse acide sulfurique/cellulose sèche comme l'indique le tableau III.04

**Tableau III.04 :** effet du rapport massique acide / cellulose sèche sur le rendement glucose

Expérience	Concentration d' $H_2SO_4$ (%)	Température (°C)	Temps (min)	Rapport $H_2SO_4$ /Cellulose	Taux de glucose (g/L)
1	9	180	90	36	279,8
2	9	180	90	24	266
3	9	180	90	12	259

Généralement, un rapport plus élevé (36) semble conduire à des taux de glucose plus élevés, comme observé dans l'expérience 1 (279.8 g/L). L'expérience 5, avec un rapport de 12, a produit un taux de glucose élevé de 259 g/L, indiquant que d'autres facteurs peuvent également influencer l'efficacité de l'hydrolyse en dehors du rapport H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/Cellulose.



**Figure III.06 :** taux de glucose en fonction du rapport d'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/Cellulose pour une température de 180°C et une concentration d'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> de 9%

❖ **Condition optimale du rapport massique acide sulfurique /cellulose sèche :**

L'expérience 1 continue de démontrer des conditions potentiellement optimales avec 9% d'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 180°C, 90 minutes et un rapport de 36, produisant le taux de glucose le plus élevé (279.8 g/L).

### III.2.4 Effet du rapport molaire acide/base

Enfin, nous avons exploré l'influence du rapport molaire acide/base sur le rendement en glucose comme l'indique le tableau III.05.

**Tableau III.05** : Effet du rapport molaire acide/base sur le rendement glucose

Expérience	Rapport	Concentration NaOH (mol/L)	Volume (ml)	Taux de glucose (g/L)
1	3	0,5	250	46,1
2	2	0,8	176	70
3	1	1,6	68	164,1

Les expériences montrent une variation significative de la concentration de NaOH utilisée pour neutraliser les produits sucrés. L'expérience 3, avec la concentration la plus élevée de NaOH (1.6 mol/L), a produit le taux de glucose le plus élevé (164.1 g/L). Cela suggère que des concentrations plus élevées de NaOH sont efficaces pour neutraliser efficacement les produits sucrés.

#### ❖ Condition optimale de neutralisation

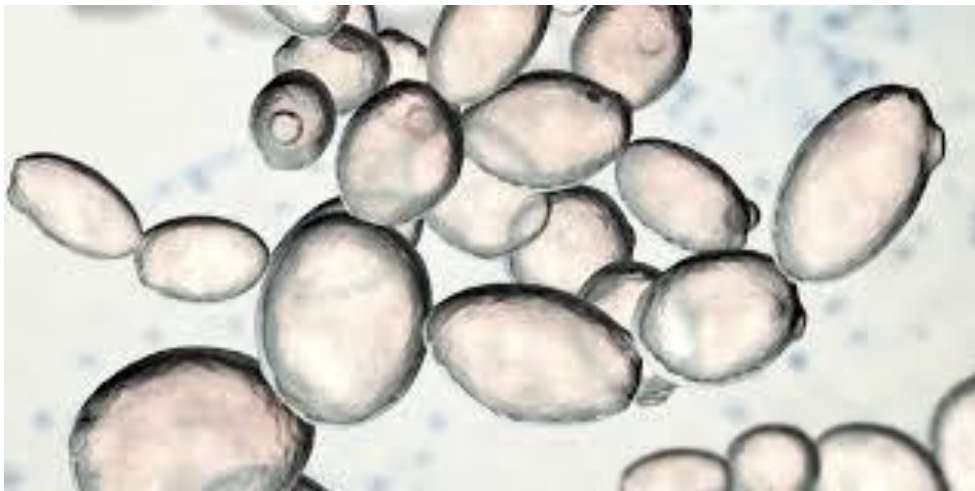
L'expérience 3, avec une concentration de NaOH de 1.6 mol/L et un taux de glucose de 164.1 g/L, semble indiquer des conditions potentiellement optimales pour la neutralisation des produits sucrés. Cependant, d'autres considérations telles que les coûts et l'efficacité opérationnelle doivent être prises en compte pour déterminer la meilleure concentration de NaOH à utiliser dans un processus industriel.

En conclusion, les conditions optimales identifiées pour maximiser le taux de glucose à partir de l'hydrolyse de la cellulose sont : une concentration d'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> de 9%, une température de 180°C, un temps de réaction de 90 minutes, un rapport H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/Cellulose de 36 et un rapport molaire acide/base de 1. Ces paramètres ont été sélectionnés en fonction des résultats les plus élevés de glucose obtenus dans les expériences, ce qui suggère qu'ils représentent une combinaison efficace pour cette méthode d'hydrolyse spécifique.

### III.3 Fermentation alcoolique

#### III.3.1 Aspect morphologique de la souche de levures

L'observation microscopique de la souche de levure *Saccharomyces cerevisiae* employée dans le procédé de fermentation a permis de visualiser sa morphologie, représentée sur la Figure III .04. Les cellules présentent une forme arrondie, plus ou moins ovale, ressemblant à un ellipsoïde de révolution dont le grand axe mesure entre 5 et 8 micromètres de longueur.



**Figure III.07 :** Aspect morphologique de la souche *S. cerevisiae* utilisée dans la présente étude

#### III.3.2 Paramètres opératoires et leur influence

- **Température**

La température de 30°C est optimale pour l'activité de la levure *Saccharomyces cerevisiae*. Cette température permet une activité enzymatique maximale, favorisant ainsi la conversion efficace des sucres en éthanol. Des températures trop élevées ou trop basses peuvent ralentir la fermentation ou même tuer les levures, respectivement.

- **pH**

Un pH de 5 est idéal pour *Saccharomyces cerevisiae* car il maintient l'environnement légèrement acide, ce qui est favorable pour l'activité des enzymes fermentatives. Un pH optimal aide également à minimiser la contamination par d'autres microorganismes indésirables.

- **Substrat fermenté**

Le glucose est un sucre simple facilement fermentable par **Saccharomyces cerevisiae**. En utilisant du glucose comme substrat, la levure peut rapidement commencer la fermentation, produisant de l'éthanol et du dioxyde de carbone comme principaux produits.

- **Temps de fermentation**

Un temps de fermentation de 72 heures est suffisant pour permettre une conversion presque complète du glucose en éthanol. Ce temps permet à la levure d'atteindre son potentiel maximum de fermentation avant que les nutriments ne s'épuisent ou que les produits inhibiteurs ne s'accumulent.

- **Type de fermentation**

Les conditions anaérobies sont cruciales pour la fermentation alcoolique, car la présence d'oxygène favoriserait la respiration aérobie, qui produit de l'eau et du dioxyde de carbone au lieu d'éthanol. En absence d'oxygène, la levure est obligée de fermenter les sucres, maximisant ainsi la production d'éthanol.

En conclusion, les conditions de fermentation choisies (30°C, pH 5, glucose comme substrat, 72 heures, conditions anaérobies) ont permis une fermentation efficace des hydrolysats de cellulose par **Saccharomyces cerevisiae**. Les résultats obtenus démontrent que ces paramètres opératoires sont appropriés pour maximiser la production d'éthanol, offrant ainsi une base solide pour des applications industrielles et des recherches futures dans le domaine de la bioénergie.

### III.4 Distillation et analyse du bioéthanol de synthèse

Lors de la première distillation du bioéthanol synthétisé, le distillat obtenu présentait une faible concentration en éthanol de seulement 12%. Cependant, en effectuant deux distillations supplémentaires consécutives, appelées rectification d'alcool, dans le but d'éliminer l'eau mélangée à l'éthanol, un nouveau distillat a pu être produit avec une teneur en éthanol beaucoup plus élevée, atteignant 89,5%. Ces résultats ont été confirmés par une analyse réalisée à l'aide d'un densimètre DMA 35 Basic.

Le tableau III.06 répertorie les valeurs de densité et de pureté mesurées pour le bioéthanol synthétisé ainsi que pour l'éthanol commercial. Ces données ont été recueillies et consignées dans le but de faciliter la comparaison entre ces deux types d'éthanol.

**Tableau III.06: Densité et pureté de l'éthanol de synthèse et commercial.**

Échantillon	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Pureté %(v/v)
Éthanol commercial	0.805-0.812	96%
Bioéthanol de synthèse	0,827	89.5 %

Bien que le bio-alcool examiné présente une apparence limpide et transparente, comme illustré par la figure III.08.



**Figure III.08 :** Aspect du bioéthanol purifié

**Tableau III.07** : Résultats d'analyses du bioéthanol par chromatographie

Nom	Temps de rétention (min)
Ethanol commercial	8.427
Bioéthanol	8.504

Le chromatogramme de l'échantillon du bioéthanol de synthèse révèle deux pics :

- L'un correspond à l'éthanol, élué à un temps de rétention de 8.54 min identique au pic observé dans le chromatogramme de l'échantillon de référence.
- Le 2<sup>ème</sup> pic correspond à un constituant dont le temps de rétention est de 8.77 min. La présence de ce pic montre que l'échantillon de synthèse n'est pas pur.

---

# Conclusion

## CONCLUSION

---

Cette étude a montré essentiellement :

- Que de nombreux constituants sont séparés de la cellulose grâce au traitement acide pour éliminer l'hémicellulose et le traitement basique pour éliminer la lignine.

- Les conditions optimales déterminées pour maximiser le taux de glucose à partir de l'hydrolyse de la cellulose sont les suivantes : une concentration d'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> de 9 %, une température de 180°C, un temps de réaction de 90 minutes, un rapport H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/Cellulose de 36, et un rapport molaire acide/base de 1.

- Les caractéristiques du bioéthanol purifié par plusieurs distillations sont proches de celles de l'éthanol commerciale, à savoir : l'apparence incolore, l'odeur, la densité (0.83 à 15°C), le temps de rétention en chromatographie en phase gazeuse (8.504 min), la bande en spectroscopie UV ( $\lambda \approx 190$  nm).

- Les rendements en bioéthanol est assez important 78% (V/V) mais reste relativement plus faible que l'éthanol commerciale. Cela est dû pertes au cours de distillation et de fermentation. Une étude paramagnétique et d'optimisations est nécessaire pour améliorer les caractéristiques et les rendements en bioéthanol.

- L'incorporation de 5 % du bioéthanol d'origine lignocellulosique à une essence non additive amélioré son indice d'octane d'une façon surprenante, voir son passage de 95 NO à 99.3 NO. Cette addition donne de meilleurs résultats que ceux obtenus avec les additifs commerciaux (PTE et MTBE), connus par leur nuisance à l'environnement. L'implantation d'une bio-industrie alimentée par des déchets forestiers serait donc une perspective très prometteuse dans le cadre des énergies renouvelables et développement.

# Liste de références

## REFERENCES

---

- [1] Amaral, L. V., Santos, N. D. S. A., Roso, V. R., & et al. (2021). Effects of gasoline composition on engine performance, exhaust gases and operational costs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110196.
- [2] Heywood, J. B. (1988). *Internal combustion engine fundamentals*. New York: McGraw-Hill.
- [3] Dec, J. E. (2017.). A review of recent literature on mixture preparation and combustion in SI engines. *SAE Technical Paper*.
- [4] Pélerin, E., Mercier, C., & Regali, H. (2005). Éthers oxygénés : une solution pour augmenter l'indice d'octane des essences sans plomb. *Revue de l'Énergie*, 567, 278-285.
- [5] Balat, M., & Balat, H. (2009). Production et utilisation récentes de l'éthanol-carburant dans le monde. *Applied Energy*, 86(11), 2273-2282.
- [6] Starkman, E. S., Newhall, H. K., & Sutton, R. D. (1964). Comparative performance of alcohol and hydrocarbon fuels. *SAE Paper No. 640649*.
- [7] Riess, J. (2012). Intensification de la brique « fermentation alcoolique » des substrats betteraviers et autre substrat pour la production d'éthanol. Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- [8] Fasioli, R., Silva, M. do S. M., & Batistote, M. (2022). Biomass: bioethanol transformation and production process. *Revista de Agricultura Neotropical*.
- [9] Tessier, L. (2018). *Le Monde en images*. CCDMD.
- [10] Shukla, A. K., Kumar, D., Girdhar, M., Kumar, G. A., Goyal, A., Malik, T., & Mohan, A. R. (2023). Strategies of pretreatment of feedstocks for optimized bioethanol production: Distinct and integrated approaches. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*.
- [11] Mango, D. A., Soudais, Y., & Lemont, F. (2010). Hydrolyse sous pression de la biomasse ligno-cellulosique. *Sud Sciences et Technologies*, 18, 29-39. hal-01846919.
- [12] Lestari, S., et al. (2009). Transforming triglycerides and fatty acids into biofuel. *ChemSusChem*, 2(12), 1109-1119.
- [13] Cuypers, P. (2019). Par le groupe de travail sur les biocarburants commun à la commission des affaires économiques et à la commission des affaires européennes, sur la filière française des biocarburants.
- [14] Akbi, A. (2013). Les implications du développement des biocarburants. Thèse de doctorat, École doctorale 513 Droit et Sciences Politiques, Économiques et de Gestion Nice, Paris.
- [15] Chacón-Navarrete, H., Martín, C., & Moreno-García, J. (2021). Yeast immobilization systems for second-generation ethanol production: Actual trends and future perspectives. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 15(5), 1549-1565.

## REFERENCES

---

- [16] Tse, T. J., Wiens, D. J., & Reaney, M. J. (2021). Production of bioethanol—A review of factors affecting ethanol yield. *Fermentation*, 7(4), 268.
- [17] Vaitilingom, G., Mouloungui, Z., Benoist, A., Broust, F., Daho, T., & Piriou, B. (2021). Vers une génération plus "verte" de biodiesels. *OCL*, 28.
- [18] Flippy.(2010). Les biocarburants.
- [19] Paul, S., & Dutta, A. (2018). Challenges and opportunities of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion. *Resources, Conservation and Recycling*, 130, 164-174.
- [20] Gnansounou, E., & Dauriat, A. (2010). Bioenergy and Energy Planning Research Group BPE.
- [21] Richel, A. (2012). La lignine, une molécule d'intérêt issue du bioraffinage.
- [22] Couhert, C. (2007). Pyrolyse flash à haute température de la biomasse lignocellulosique et de ses composés : Production de gaz de synthèse. École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [23] Chirat, C. (2017). Use of vegetal biomass for biofuels and bioenergy: Competition with the production of bioproducts and materials? *Comptes Rendus Physique*, 18(7-8), 462-468.
- [24] Saha, B. C. (2003). Hemicellulose bioconversion. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 30, 279–291.
- [25] Hugues, P. (2015). Stratégies technologiques et réglementaires de déploiement des filières bioénergies françaises. Paris, ENMP.
- [26] Strassberger, Z., Tanase, S., et al. (2014). The pros and cons of lignin valorisation in an integrated biorefinery. *R&C Advances*, 4(48), 25310.
- [27] Sanchez, Ó. J., & Cardona, C. A. (2008). Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. *Bioresource Technology*, 99, 5270-5295.
- [28] Didden, I., Destain, J., & Thonart, P. (2008). Le bioéthanol de seconde génération. *Presse agronomique de Gembloux*, 23-11.12.
- [29] Wertz, J. (2012). Prétraitement de la biomasse lignocellulosique. *Revue Rencontre de la Biomasse*, 9(60-62).
- [30] Slavin, J. (2003). Why whole grains are protective: Biological mechanisms. *Proceedings of the Nutrition Society*, 62(1), 129-134.
- [31] Yasin, M., Bhutto, A. W., Bazmi, A. A., & Karim, S. (2010). Efficient utilization of rice-wheat straw to produce value added composite products. *International Journal of Chemical and Environmental Engineering*, 1(2), 136-143.

## REFERENCES

---

- [32] Smith, A., & Brown, J. (2020). Hydrolysis of cellulose: Enzymatic versus acid catalysis. *Journal of Renewable Energy*, 45(3), 211-225.
- [33] Abo, B. O., et al. (2019). Lignocellulosic biomass for bioethanol: An overview on pretreatment, hydrolysis and fermentation processes. *Reviews on Environmental Health*, 34(1), 57-68.
- [34] Kacimi, M. M. (2008). Analyse du secteur de l'éthanol selon les principes du développement durable. Sherbrooke, Québec, Canada.
- [35] Chatterjee, S., Ghosh, A., Khan, T., Roy, S., & Biswas, M. (2019). Modeling of pretreatment process of lignocellulosic biomass by dilute acid hydrolysis.
- [36] Fehér, A., Fehér, C., Rozbach, M., & Barta, Z. (2017). Combined approaches to xylose production from corn stover by dilute acid hydrolysis. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*.
- [37] Wertz, J. (2016). Prétraitements de la biomasse lignocellulosique. *ValBiom*, 158.
- [38] Shuddhodana, D., Mohnot, R., Biswas, V. S., & Bisaria. (2016). Enzymatic hydrolysis of lignocellulosic residues.
- [39] Saldarriaga-Hernández, S., Velasco-Ayala, C., Flores, P. L. I., de Jesús Rostro-Alanis, M., Parra-Saldivar, R., Iqbal, H. M., & Carrillo-Nieves, D. (2020). Biotransformation of lignocellulosic biomass into industrially relevant products with the aid of fungi-derived lignocellulolytic enzymes.
- [40] Alio, M. A. (2020). Production de bioéthanol à partir d'une biomasse lignocellulosique multiressources locale par prétraitement Organosolv et hydrolyse enzymatique. Thèse de doctorat en Génie des procédés, Université Clermont Auvergne, France.
- [41] Ananda, S., Amarasekara, V., Chioma, N., & Harshica, F. (2023). Hydroxy sulfonic acid catalyzed hydrolysis of cellulose. *Biofuels*.
- [42] Ricardo, H., Perez, R., Salgado, D., Olarte, A., Salgado, E., Garcia, A., Medrano, F., Martinez, V., & Smyrnov, V. (2022). Comparing acid and enzymatic hydrolysis methods for cellulose nanocrystals (CNCs) obtention from agroindustrial rice husk waste. *Journal of Nanotechnology*.
- [43] Zhu, J. Y., & Pan, X. J. (2010). Propriétés de base réactives de la cellulose avec des traitements pour augmenter la digestibilité enzymatique. *Revue de la Science des Polymères, Partie B : Physique des Polymères*, 48(19), 1905-1916.
- [44] Gonçalves, D. L., Matsushika, A., de Sales, B., Goshima, T., Bon, E. P. S., & Stambuk, B. U. (2014). Xylose and xylose/glucose co-fermentation by recombinant *Saccharomyces cerevisiae* strains expressing individual hexose transporters. *Enzyme Microb. Technol.*, 63, 13-20.

## REFERENCES

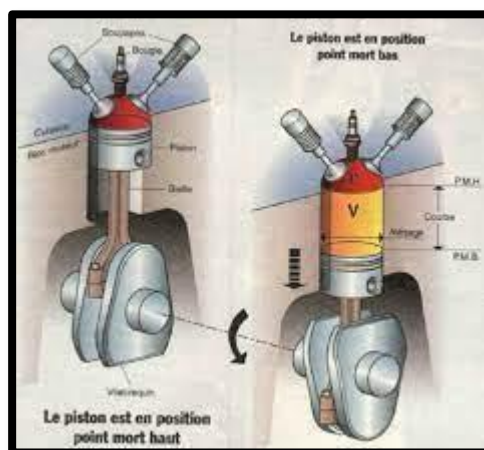
---

- [45] Aldiguiér, A. S., Alfenore, S., Cameleyre, X., Goma, G., Uribelarrea, J. L., Guillouet, S. E., & Molina-Jouve, C. (2004). Synergistic temperature and ethanol effect on *Saccharomyces cerevisiae* dynamic behaviour in ethanol bio-fuel production. *Bioprocess Biosyst. Eng.*, 26(4), 217-222.
- [46] Buzás, Z., Dallmann, K., & Szajani, B. (1989). Influence of pH on the growth and ethanol production of free and immobilized *Saccharomyces cerevisiae* cells. *Biotechnol. Bioeng.*, 34(6), 882-884.
- [47] Boucher, J. (2014). Étude des possibilités de production d'éthanol hémicellulosique dans le cadre d'une bioraffinerie papetière. Thèse de doctorat, Grenoble.
- [48] Mohd Azhar, S. H., Abdulla, R., Jambo, S. A., Marbawi, H., Gansau, J. A., Mohd Faik, A. A., & Rodrigues, K. F. (2017). Yeasts in sustainable bioethanol production: A review. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 10, 52-61.
- [49] Oleksandr, O., Liaposchenko, V. M., Mareno, M. S., Skydanenko, I. P., Ochowiak, M., Mizakova, J. P., Vitalii, Y., Storozhenko, V. A., & Smyrnov, V. S. (2023). Modeling of technological processes for a rectification plant in second-generation bioethanol production.
- [50] Mukhtar Anas Ibrahim, Muhammad Hafizh Musyaffa, Heriyanto, & Haryadi. (2022). Purification of ethanol by continuous adsorption method using zeolite 3A and calcium oxide. *Jurnal Kimia Riset*, 7(1).

# **Annexes**

**Annexe 1 :****Moteur à allumage commandé**

Par définition, un moteur thermique à allumage commandé est un moteur alternatif à combustion interne permettant de produire un travail mécanique, sous forme de rotation du vilebrequin, à partir de la combustion d'un mélange carburé (air-essence) à l'intérieur d'un cylindre, dont lequel se déplace un piston en mouvement alternatif. Le déplacement du piston s'effectue entre deux limites appelées respectivement le Point Mort Haut (PMH) et le Point Mort Bas (PMB). Le volume balayé par ce déplacement de piston est la cylindrée unitaire du moteur.

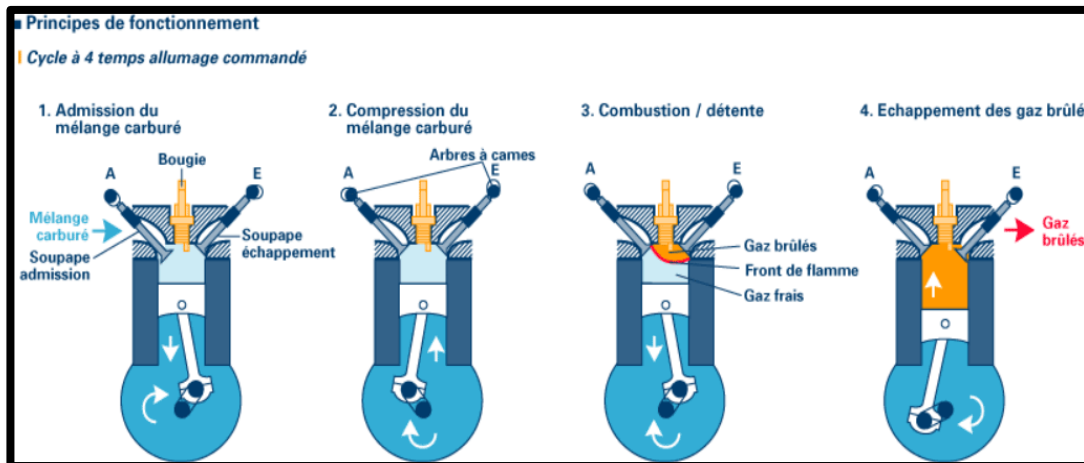


Moteur thermique à allumage commandé

Le dimensionnement des différents éléments mécaniques du moteur est déterminant pour les performances globales du moteur. Par exemple, le rapport volumétrique de compression (ou taux de compression défini comme étant le rapport entre le volume total d'un cylindre ( $V_v + v$ ) et le volume mort  $v$ ) est judicieusement fixé par les constructeurs entre 9 et 12 sur les moteurs actuels. Les variantes essentielles dans les moteurs thermiques à allumage commandé concernent le cycle de fonctionnement (deux temps ou quatre temps) ainsi que les modes d'alimentation et de combustion. En effet, le mélange carburé est réalisé, soit avant son introduction dans les cylindres (injection indirecte) soit dans les cylindres (injection directe).

Dans notre cas, on s'intéressera principalement au moteur thermique 4-temps à allumage commandé à injection indirecte montre les quatres temps d'un cycle de fonctionnement de ce type de moteur .

commandé à injection indirecte montre les quatre temps d'un cycle de fonctionnement de ce type de moteur.



### fonctionnement d'un moteur thermique 4-temps à allumage commandé

Par ordre, ces quatre temps sont :

- 1er temps : l'admission, qui correspond au remplissage du cylindre. La soupape d'admission est ouverte et le piston descend et aspire le mélange air-essence.
- 2e temps : la compression, le piston remonte comprimant ainsi le mélange air-essence. Une étincelle est générée par la bougie d'allumage pour enflammer le mélange.
- 3e temps : la combustion et la détente, c'est pendant ce temps que la combustion se développe pour transformer l'énergie chimique contenue dans le mélange air-essence en énergie mécanique. Avec l'expansion des gaz brûlés, le piston est repoussé vers le bas.
- 4e temps : L'échappement, qui correspond à la vidange des gaz brûlés du cylindre. La soupape d'échappement est alors ouverte. Le piston remonte et évacue les gaz

brûlés.

L'admission d'essence de ces moteurs est réalisée, de plus en plus, par des injecteurs à commande électronique. Quant à l'admission d'air, elle est modulée par une vanne papillon motorisée, placée en général à l'entrée de la conduite d'admission. Le travail produit par le moteur est alors directement lié au remplissage des cylindres en air, d'où l'utilité d'un ajout de systèmes de suralimentation pour améliorer les performances du moteur

## ANNEXES

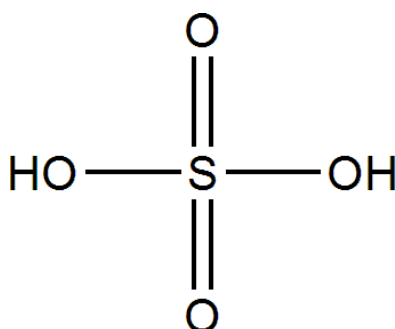
### Annexe 2:

#### Acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

- Fiche toxicologique de l'acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> :

FORMULE	NOM	NUMERO CAS	NUMERO CE	NUMERO INDEX	SYNONYMES
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Acide sulfurique	7664-93-9	231-639-5	016-020-00-8	
	Oléum (...%SO <sub>3</sub> )			016-019-00-2	Acide sulfurique fumant

- Formule chimique de l'acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> :



### **ACIDE SULFURIQUE 95 % technique**

**SCHWEFELSÄURE 95 % technisch**

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – 98,08 g/mol, CAS-Nr.: 7664-93-9

**Contenu: 1 litre**

**Réf. Produit: 130-0001**

**MENTION D'AVERTISSEMENT: DANGER**

**MENTIONS DE DANGER** H314 Provoque des brûlures de la peau et des lésions oculaires graves. **CONSEILS DE PRUDENCE** P280 Porter des gants et des vêtements de protection, ainsi qu'un équipement de protection des yeux/du visage. P305 + P351 + P338 EN CAS DE CONTACT AVEC LES YEUX: rincer avec précaution à l'eau pendant plusieurs minutes. Enlever les lentilles de contact si la victime en porte et si elles peuvent être facilement enlevées. Continuer à rincer. P310 Appeler immédiatement un CENTRE ANTIPOISON ou un médecin.



*Art-Chimie*

Art-Chimie

26 Aizpardi karrika • F-64700 Hendaya / Hendaye  
Tél. +33 (0)6 01 83 41 01 • www.art-chimie-online.com

POUR USAGE  
PROFESSIONNEL

UN 1830  
N. CE: 231-639-5  
ADR / RID: 8, II

## Annexe 3:

### Hydroxyde de Sodium NaOH

- Fiche toxicologique:

#### Hydroxyde de sodium et solutions aqueuses

Fiche toxicologique n°20

##### Généralités

Edition \_\_\_\_\_ Avril 2021

Formule:

NaOH

##### Substance(s)

Formule Chimique	Détails	
NaOH	Nom	<b>Hydroxyde de sodium</b>
	Numéro CAS	<b>1310-73-2</b>
	Numéro CE	<b>215-185-5</b>
	Numéro index	<b>011-002-00-6</b>
	Synonymes	<b>Soude caustique</b>

##### Etiquette



Hydroxyde de sodium

##### Danger

- H314 - Provoque de graves brûlures de la peau et de graves lésions des yeux

Les conseils de prudence P sont sélectionnés selon les critères de l'annexe 1 du règlement CE n° 1272/2008.  
215-185-5