

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



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

**Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master en :**  
**Filière : Génie des Procédés**  
**Spécialité : Génie Chimique**

**Thème :**

**Etude de la valorisation énergétique de la biomasse  
lignocellulosique (Palmes sèches) du palmier dattier au  
sud-ouest de l'Algérie**

**Préparé par :**

Mlle. NASSAMOU Zineb

Mlle. MAHDJOUBI Wahiba

**Membres de jury d'évaluation :**

<b>M. BOUSSEM Fayçal</b>	<b>Président</b>	<b>MAA</b>	<b>Univ. Adrar</b>
<b>M. BOULAL Ahmed</b>	<b>Encadreur</b>	<b>MCA</b>	<b>Univ. Adrar</b>
<b>M. BOUALLALA M'hammed.</b>	<b>Co-encadreur</b>	<b>MCA</b>	<b>Univ. Adrar</b>
<b>Mlle. TEHAMI Wafaâ</b>	<b>Examineur</b>	<b>MCB</b>	<b>Univ. Adrar</b>

**Année Universitaire : 2019/2020**

# *Dédicaces*

*Je dédie ce projet :*

*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,*

*A ma chère sœur et son mari et les enfants (Safa, Abdeelmoemin,*

*Joiria ),*

*A mon frère et ses enfants (Isselam et Mrwan)*

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

*A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès. Je souhaite une bonne santé. A tous ceux que j'aime.*

*À ceux qui m'ont donné la force et le courage de faire ce travail*

*gronde merci Dr. Boulal A .*

*Wahiba. M*

# *Dédicaces*

*Je dédie à mes chers parents, ils me soutiennent toujours*

*À mes sœurs et frères*

*À toute ma famille*

*À tous mes camarades de classe*

*À tous mes amis proches*

*À ceux qui m'ont donné la force et le courage de faire ce travail*

*Zineb N*

# Remerciement

*Je remercie en premier lieu Dieu tout puissant de m'avoir accordé  
la puissance et la volonté pour achever ce travail.*

*On tient à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de nos lors de la rédaction de ce  
mémoire.*

*Mes remerciements vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail en  
particulier :*

*Nous voudrions dans un premier temps remercier, Je tiens tout particulièrement à témoigner ma profonde  
gratitude à mon Directeur de thèse **Dr. BOULAL Ahmed**, Maître de Conférence "A" à l'université d'Adrar,  
pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre  
réflexion.*

*Nous tenons à remercier **M.A. BOUSSEM Fayçal**, Maître de Conférence "" à l'Université d'Adrar,  
d'avoir bien voulu accepter de présider le jury de ce mémoire.*

*Nous remercions également **Dr. TEHAMI Wafaâ**, Maître de Conférence "B" à l'Université d'Adrar,  
d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Mes sincères remerciements vont également toute l'équipe de l'INRA surtout **Mr Kherssi Med**  
Nous remercions également toute l'équipe laboratoire de l'université Ahmed Draïa-Adrar les  
intervenants professionnels responsables de notre formation, pour avoir assuré la partie pratique  
surtout **Mr. BOUKHATECH I, ELHACHEMI, Sadjai, Mebarqa, Somiya***

*Sans oublier, Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à tous les Masters de Génie chimique «  
promotion 2020 ».*

*Merci..*

## Résumé

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la diversification des ressources des énergies renouvelables comme une biomasse. Dans cette recherche, nous nous sommes focalisés sur la valorisation des palmes sèches des palmiers dattiers, cette matière non comestible par l'homme est considérée comme un déchet non valorisé. Où on a étudié les propriétés physico-chimiques et biochimiques de cette matière, qui lui permettent d'être un matériau valorisable pour la production de bioéthanol, ainsi que les techniques adoptées pour atteindre les meilleurs résultats en termes de qualité. Grâce aux procédés technologiques, une deuxième génération a été identifiée dans la production de bioéthanol à partir de ces produits lignocellulosique (palmes sèches).

L'estimation de tonnage de sous-produit de palmier dattier (palmes sèches) dans la région d'Adrar s'élèverait à 51,273 tonnes/an, quantité tout à fait exploitable quant à la production de bioéthanol, L'étude a été menée sur la production de bioéthanol par fermentation alcoolique anaérobie à l'aide de *Saccharomyces cerevisiae*, après broyage, vapocraquage et hydrolyse acide. Ces résultats ont montré que la meilleure dilution qui permet un milieu favorable pour une bonne dégradation anaérobie par la levure utilisée est de 1g de FPS par 60 ml d'eau (1/60), cette dilution donne un rendement final de l'ordre de 55%. i.e. chaque 100 g de FPS produisent 55 ml d'éthanol de concentration 90°. Les caractéristiques finales sont acceptables comparé à l'éthanol commercial.

**Mots clés :** Palmes sèches, Palmiers dattiers, Valorisation, fermentation anaérobie, bioéthanol, *Saccharomyces cerevisiae*.

## Summary

This work is part of the diversification of renewable energy sources such as biomass. In this research, we focused on the recovery of dry palms from date palms, this material inedible by humans is considered as non-recovered waste. Where we studied the physico-chemical and biochemical properties of this material, which allow it to be a recoverable material for the production of bioethanol, as well as the techniques adopted to achieve the best results in terms of quality. Thanks to technological processes, a second generation has been identified in the production of bioethanol from these lignocellulosic products (dry palms).

The estimated tonnag of date palm by-product (dried palm) in the Adrar region would therefore amount to 51.273 tonnes / year, a quantity that can be fully exploited for the production of bioethanol. The study was carried out. on the production of bioethanol by anaerobic alcoholic fermentation using *Saccharomyces cerevisiae*, after grinding, steam cracking and acid hydrolysis. These results showed that the best dilution which allows a favorable medium for the good anaerobic degradation by the yeast used is 1g of SPF per 60mL of water (1/60), this dilution also gives a final yield of the order of 55 % this lasts for each 100g of SPF to produce 55mL of ethanol of 90 ° concentration. The final characteristics are acceptable compared to commercial ethanol.

**Key words:** Dry palms, date palms, valorization, anaerobic fermentation bioethanol, *Saccharomyces cerevisiae*.

## ملخص

هذا العمل يدخل في اطار تنويع مصادر الطاقة المتجددة مثل الكتلة الحيوية. في هذا البحث ، ركزنا على استغلال الجريد الجاف للنخيل التمر، وتعتبر هذه المادة غير صالحة للأكل من قبل الإنسان نفايات غير مثمرة. حيث قمنا بدراسة الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبيوكيميائية لهذه المادة والتي تتيح لها أن تكون مادة قابلة للاستعمال والتمين لإنتاج الإيثانول الحيوي ، وكذلك التقنيات المعتمدة لتحقيق أفضل النتائج من حيث الجودة. بفضل العمليات التكنولوجية ، تم تحديد جيل ثاني في إنتاج الإيثانول الحيوي من المواد السليلوزية (الجريد الجاف).

وبالتالي ، فإن الكمية المقدره بالطن من المنتج الثانوي لنخيل التمر (الجريد الجاف) في منطقة أدرار تصل إلى 51.273 طن / سنة ، وهي كمية يمكن استغلالها بالكامل لإنتاج الإيثانول الحيوي. تم تنفيذ الدراسة. على إنتاج الإيثانول الحيوي عن طريق التخمير اللاهوائي الكحولي باستخدام *Saccharomyces cerevisiae*، بعد الطحن والتكسير بالبخار والتحلل المائي الحمضي. أظهرت هذه النتائج أن أفضل التخفيف الذي يمثل الوسط الملائم لتحلل اللاهوائي الجيد بواسطة الخميرة المستخدمة هو 1 جم من طحين الجريد الجاف لكل 60 مل من الماء (60/1) ، وهذا التخفيف يعطي أيضًا ناتجًا نهائيًا بنسبة 55%. إذا لكل 100 جرام من من طحين الجريد الجاف ينتج مقدار 55 مل من الإيثانول بتركيز 90°. الخصائص النهائية مقبولة مقارنة بالإيثانول التجاري.

**الكلمات المفتاحية:** نخيل التمر، الجريد الجاف، التتمين التخمير، اللاهوائي البيواتانول،

*Saccharomyces cerevisiae*.

## Tableaux des matières

	<b>Page</b>
Dédicace.....	I
Remerciements.....	III
Résumé.....	IV
Summary.....	V
ملخص.....	VI
Liste des figures.....	X
Liste des photos.....	XI
Liste des tableaux.....	XII
Liste des abréviations.....	XIII
<b>Introduction générale.....</b>	<b>01</b>
<b>Première partie</b>	
<b>Chapitre I : Généralité sur le palmier dattier</b>	
I.1. Introduction.....	08
I.2. Historique et origine.....	08
I.3. Systématique du <i>phoenix dactylifera</i> L. ....	09
I.4. Biologie du palmier dattier.....	09
I.4.1. Présentation de l'espèce.....	09
I.4.2. Morphologie du palmier dattier.....	09
I.4.2.1. Le système racinaire.....	10
I.4.2.2. Le stipe ou tronc.....	10
I.4.2.3. Les feuilles.....	11
I.4.2.4. Les organes floraux.....	11
I.4.2.5. La fleur femelle.....	12
I.4.2.6. La fleur mâle.....	12
I.4.2.7. Le fruit « la datte ; Tmar ».....	13
I.5. Cycle de développement.....	13
I.6. Aire géographique et importance.....	14
I.6.1. Dans le monde.....	14
I.6.2. En Algérie.....	15
I.6.3. En région d'Adrar.....	15
<b>Chapitre II : Bioéthanol et biomasse lignocellulosique</b>	
II. 1. Généralité sur le biocarburant.....	17
II.1.1. Définition.....	17
II.1.2. Différentes biocarburants.....	17
II.1.3. Différentes générations des biocarburants.....	17
II.1.3.1. Les biocarburants de 1 <sup>ère</sup> génération.....	17
II.1.3.2. Les biocarburants de 2 <sup>ème</sup> génération.....	18
II.1.3.3. Les biocarburants de 3 <sup>ème</sup> génération : Les micro-algues.....	19
II.1.4 Les avantages et Les inconvénients des biocarburants.....	20
II.2. Le Bioéthanol.....	21



II.2.1- Définition.....	21
II.2.2. Les propriétés physico-chimique de bioéthanol .....	22
II.2.3. Production de bioéthanol.....	22
II.2.4. Utilisation du bioéthanol.....	23
II.2.5. Avantages et inconvénients du bioéthanol .....	23
II.2.6. Obtention de la bioéthanol .....	24
II.2.6. 1. Distillation.....	24
II.2.6. 2. Rectification .....	25
II.3. La Biomasse lignocellulosique.....	25
II.3.1. Définition .....	25
II.3.2. Composition de la biomasse (lignocellulosique) .....	25
II.3.3. Ressources de biomasse utilisée pour la fabrication de biocarburants .....	28

### **Chapitre III : Fermentation**

III.1. Définition.....	30
III.2. Les différents types des fermentations .....	30
III.2.1. Fermentation alcoolique .....	30
III.2.2. Fermentation lactique.....	30
III.2.3. Fermentation acétique .....	30
III.2.4. Fermentation malolactique.....	30
III.3. Production de bioéthanol à partir de la biomasse lignocellulosique .....	31
III.3.1. Préparation du substrat de fermentation .....	31
III.3.2. procédés de fermentation alcoolique .....	34
III.3.3. Les microorganismes utilisés.....	34
III.3.3.1. Définition de la levure boulangère type ( <i>saccharomyces cerevisiae</i> ).....	35
III.3.3.2. Le métabolisme de <i>Saccharomyces cerevisiae</i> .....	35
III.3.4. Paramètres de fermentation.....	36
III.3.5. Influence des paramètres environnementaux sur la croissance des micros organisme .....	36
III.3.5.1. Effet de la température.....	36
III.3.5.2. Effet du pH.....	37
III.3.5.3. Rôle d'O <sub>2</sub> .....	37

### **Deuxième partie**

#### **Chapitre IV: Matériels et Méthodes**

IV.1. Introduction .....	40
IV.2. Présentation de la station d'expérimentation agricole d'Adrar (INRAA).....	40
IV.3. Matériels utilisé .....	40
IV.3.1 Appareillages .....	40
IV.3.2.Réactifs chimique .....	41
IV.3.3.Matériel végétal (substrat de la fermentation) .....	41
IV.3.4.Matériel biologique.....	42
IV.4. Méthodes .....	42
IV.4.1. Le processus de production de bioéthanol.....	42
IV.4.1.1.Préparation du substrat avant la fermentation.....	42

IV.4.1.2. Préparation de l'inoculum .....	45
IV.4.1.3. Fermentation alcoolique .....	46
IV.4.1.4. Distillation alcoolique .....	46
IV.4.1.5. Rectification .....	47
IV. 5. Les analyses effectuées .....	47
IV.5.1. Dosage de la cellulose .....	47
IV.5.2. Indice de la lignine.....	48
IV.5.3. Dosage de l'holocellulose.....	49
IV.5.4. Détermination du pH.....	50
IV.5.5. Détermination de la densité.....	51
IV.5.6. Dosage des sucres réducteurs.....	52
IV.5.7. Détermination de taux de solides solubles (°Brix) .....	54
IV.5.8. Dénombrements cellulaire.....	55
IV.5.9. Dosage de degré d'alcool.....	56
IV.5.10. Analyse spectroscopie d'absorption IR.....	57
<b>Chapitre V. Résultats et discussion</b>	
V.1. Estimation du tonnage des palmes sèches .....	59
V. 2. Résultats de l'analyse chimique et biochimique des palmes sèches.....	59
V.3. Résultats des analyses physico-chimiques durant la fermentation alcoolique.....	60
V.3.1 Le pH .....	60
V.3.2 La densité .....	61
V.3.3 Le taux solides solubles (TSS).....	62
V.3.4 Sucres réducteurs .....	62
V. 3.6 Dénombrement cellulaire .....	63
V.3.5 Degré d alcoolique des dilutions étudiées .....	65
V.4. Résultats d'analyse de produit fini .....	65
V.4.1 Caractérisation physico-chimiques du produit fini .....	66
V.4.2. Analyse spectroscopie d'absorption IR.....	66
V. 5. caractéristiques générales de bioéthanol obtenu.....	68
V.6. Rendements .....	68
<b>Conclusion et Perspectives .....</b>	<b>70</b>
<b>Références Bibliographiques.....</b>	<b>73</b>

## Liste des figures

	<b>Page</b>
<b>Figure I.1:</b> Figuration schématique du dattier.....	10
<b>Figure I.2:</b> Schéma d'un palme.....	11
<b>Figure I.3:</b> Fleur femelle.....	12
<b>Figure I.4 :</b> La fleure mâle.....	12
<b>Figure I.5:</b> Le fruit « la datte ; Tmar ».....	13
<b>Figure I.6:</b> Aire géographique des palmiers dattiers dans le monde.....	14
<b>Figure II.1:</b> lustration de quelques types et procédés de biocarburants de 1 <sup>ère</sup> génération.....	18
<b>Figure II.2:</b> Lustrations de quelques types et procédés de biocarburants 2 <sup>ème</sup> génération.....	19
<b>Figure II.3:</b> Lustrations de quelques types et procédés de biocarburants 3 <sup>ème</sup> génération.....	20
<b>Figure II.4:</b> Molécule d'éthanol.....	21
<b>Figure II.5:</b> Composition de la biomasse (lignocellulosique) .....	26
<b>Figure II.6:</b> Structure de cellulose.....	26
<b>Figure II.7 :</b> Structure de hémicelluloses.....	27
<b>Figure II.8 :</b> Structure de la lignine.....	27
<b>Figure II.9</b> Ressources de biomasse utilisées pour la fabrication de biocarburants	28
<b>Figure III.1:</b> Fermentation de glucose a éthanol par levure.....	36
<b>Figure IV.1:</b> Courbe d'étalonnage de Glucose.....	53
<b>Figure IV.2</b> Courbe d'étalonnage de degré d'alcool .....	57
<b>Figure V.1:</b> Evolution du pH au cours de la fermentation.....	61
<b>Figure V.2:</b> Evolution du la densité au cours de la fermentation .....	61
<b>Figure V.3 :</b> Evolution du degré de Brix au cours de la fermentation .....	62
<b>Figure V.4 :</b> Evolution des sucres réducteurs au cours de la fermentation .....	63
<b>Figure V. 5:</b> Aspect morphologique de la souche <i>S. cerevisiae</i> au microscope 400X	63
<b>Figure V.6 :</b> concentration cellulaire en fonction du temps.....	64
<b>Figure V.7 :</b> Degré alcoolique des dilutions étudiées (pour 20ml de distillat).....	65
<b>Figure V.8:</b> Spectre Infra Rouge du bioéthanol obtenu.....	67

## Liste des photos

	<b>Page</b>
<b>Photo IV.1:</b> Palmaire dattier.....	41
<b>Photo IV.2:</b> Palmes sèches.....	41
<b>Photo. IV.3:</b> La souche de fermentation .....	42
<b>Photo IV.4:</b> Broyage des palmes sèches.....	43
<b>Photo IV.5:</b> Farine du palme sèche (0.2mm).....	43
<b>Photo IV.6:</b> Les quatre (04) dilutions.....	44
<b>Photo IV.7:</b> Hydrolyse acide.....	44
<b>Photo IV.8 :</b> Ajustement de pH du mout .....	45
<b>Photo IV.9:</b> Réactivation de la levure.....	45
<b>Photo IV.10:</b> Dispositif expérimental de la fermentation alcoolique.....	46
<b>Photo IV.11:</b> Mentagre de la distillation.....	47
<b>Photo IV.12:</b> Rectification .....	47
<b>Photo IV.13:</b> Ebullition d échantillons .....	48
<b>Photo IV.14:</b> Résidu après calcination .....	48
<b>Photo IV.15:</b> Suivie de la réaction de la lignine .....	49
<b>Photo IV.16:</b> Suivie de la réaction de hemicellulose .....	50
<b>Photo IV.17:</b> Filtration du résidu .....	50
<b>Photo IV.18:</b> Mesure de pH a l'aide de pH mètre.....	51
<b>Photo IV.19:</b> Mesure de la densité à l'aide d'un pycnomètre .....	51
<b>Photo IV.20:</b> Gamme d'échantillons étalons de Glucose.....	53
<b>Photo IV.21:</b> Spectromètre UV-Visible.....	54
<b>Photo IV.22:</b> Détermination le toux de solide solubles à l aide d un refractomètre.	55
<b>Photo IV.23:</b> Microscope optique .....	56
<b>Photo V.1</b> Teste d inflammation .....	68

## Liste des tableaux

	<b>Page</b>
<b>Tableau I.1:</b> Statistique de production de palmier dattier en Adrar.....	15
<b>Tableau II.1:</b> Les principaux avantages et inconvénients des biocarburants.....	20
<b>Tableau II.2:</b> Caractéristiques physico-chimiques de l'éthanol comme combustible liquide.....	22
<b>Tableau II.3:</b> Avantages et inconvénients du bioéthanol.....	24
<b>Tableau III.1:</b> Procèdes de prétraitement de la biomasse lignocellulosique.....	31
<b>Tableau III.2:</b> Conditions, avantages et inconvénients d'hydrolyse à l'acide dilué...	33
<b>Tableau III.3:</b> Conditions, avantages et inconvénients d'hydrolyse à l'acide concentré.....	33
<b>Tableau IV.1:</b> Réactifs chimiques .....	41
<b>Tableau IV.2:</b> Diverses dilutions préparées (FPS/eau)	43
<b>Tableau IV.3:</b> Préparation de la gamme étalons.....	53
<b>Tableau IV.4:</b> Préparation de la gamme étalons (degré d'alcool).....	57
<b>Tableau V.1:</b> Les valeurs des indices biochimiques de la poudre des palmes sèches .....	59
<b>Tableau V.2:</b> Caractérisations physico-chimiques du produit fini.....	66
<b>Tableau V.3:</b> Groupements correspondant à la vibration de valence.....	66
<b>Tableau V.4 :</b> Le rendement en alcool des quatre dilutions .....	68

## List des abréviations

<b>AFNOR</b> : Association Française de Normalisation	<b>L</b> : Litre
<b>AOAC</b> : Official Methods of Analysis of Association Official Analytical	<b>MADR</b> : Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural
<b>Bio-ETBE</b> : bio-Ethyle- tertio-butyl-éther	<b>MO</b> : Matière Organique
<b>Bio-DME</b> : bio-diméthyléther	<b>Min</b> : Minute
<b>Bio-MTBE</b> : bio-Méthyl-tertio-butyl-ether	<b>MS</b> : Matière Sèche
<b>CACI</b> : Chambre Algérienne de Commerce et d'Industrie	<b>MM</b> : Matière minérale
<b>CE</b> : Comité Européenne	<b>N</b> : Normalité
<b>CO<sub>2</sub></b> : Dioxyde de Carbone	<b>O<sub>2</sub></b> : Oxygène
<b>°C</b> : Degré Celsius	<b>UIC</b> : Union des Industries Chimiques.
<b>CRAAQ</b> : Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec	<b>UV</b> : Ultraviolet Agricoles
<b>C</b> : Concentration (g/l)	<b>pH</b> : Potentiel d'Hydrogène
<b>DO</b> : Densité Optique	<b>Qx</b> : Quintaux
<b>DSA</b> : Direction des Services Agricoles	<b>Q T F</b> : Quantum Tuning France 2020
<b>DME</b> : Diméthyléther	<b>T</b> : température
<b>ETBE</b> : Ethyl-Tertio-Butyl-Ether	<b>V</b> : Volume
<b>EMHV</b> : Ester Méthylique d'Huile Végétale	<b>IEA</b> : Sustainable production of second-generation biofuels. Potential and perspectives in major economies and developing countries
<b>FAO</b> : Food and Agriculture Organisation	<b>IR</b> : infrarouge
<b>FAO</b> : Food and Agriculture Organisation	<b>INRAA</b> : Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie
<b>F P S</b> : Farine des palmes sèches	<b>µL</b> : Microlitre
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b> : Acide Sulfurique	: représente la pente de la droite
<b>HCl</b> : Acide Chlorhydrique	
<b>H</b> : Heure	
<b>kg</b> : Kilogramme	
<b>KMnO<sub>4</sub></b> : Permanganate de Potassium	

*Introduction*

*Générale*

### Introduction

Dans le domaine énergétique, le recours aux énergies fossiles est très largement prépondérant dans tous les secteurs d'activité, et en particulier dans les transports. Cependant, le constat de la raréfaction de ces énergies fossiles est réel et des alternatives permettent de préparer l'avenir tout en minimisant les effets sur le réchauffement climatique, l'instabilité des prix du pétrole et l'incertitude de la sécurité d'approvisionnement sont les enjeux actuels majeurs qui poussent vers une diversification des sources énergétiques et vers le développement et la promotion des énergies renouvelables (ANFA, 2009). Dans le secteur du transport, responsable d'environ un quart des émissions attribuables à l'énergie, les biocarburants sont actuellement au cœur de l'attention. Les biocarburants constituent aujourd'hui l'alternative renouvelable principale capable de diminuer significativement la consommation du carburant fossile dans le transport. (Mertens, 2010).

Le bioéthanol produit par fermentation des sucres de cultures agricoles telles que la canne à sucre, la betterave à sucre, le sorgho et le lactosérum; ainsi que les matières premières amylicées telles que les céréales, à savoir le maïs, le blé et les plantes-racines telles que le manioc et quelques exemples courants de bioéthanol de première génération (IEA., 2010). Cependant, des limitations majeures associées avec les biocarburants de première génération incluent la concurrence pour l'utilisation des terres arables avec la nourriture et les cultures de fibres, les structures de marché restreintes, l'absence de systèmes agricoles bien établis pratiques dans les économies en développement, coût élevé en raison des besoins en eau et en engrais et menace pour la biodiversité (Anuja et *al.*, 2020).

Les biocarburants de deuxième génération sont produits à partir de cultures non alimentaires telles que les biodéchets et biomasse lignocellulosique. Les matériaux lignocellulosiques sont l'un des plus grands ressources biochimiques renouvelables du monde avec une production annuelle estimée de 10 à 50 milliards de tonnes, qui pourraient être disponibles pour la production de biocarburants à grande échelle (Sanchez et *al.*, 2008), quand par rapport aux matières premières utilisées pour la production de biocarburant de première génération, l'utilisation de la biomasse lignocellulosique comme source de biocarburant est une source non



## Introduction générale

---

comestible qui n'entre pas en concurrence avec les aliments cultures, ces dernières peuvent être cultivées spécifiquement pour la production de bioénergie conduisant à une productivité élevée et augmente l'efficacité de l'utilisation des terres et la qualité du sol. La biomasse lignocellulosique est donc considérée comme la seule ressource prévisible, faisable et durable pour les carburants renouvelables. Une biomasse lignocellulosique typique est principalement composée d'environ 40 à 50% de cellulose, un polymère de glucose de 25 à 35% d'hémicellulose, un hétéropolymère composé de pentoses de 15 à 20% de lignine, un non-polysaccharide constitué d'unités phényl-propane (Sun et *al.*, 2002). La production de biocarburant à partir de la biomasse lignocellulosique se produit dans trois étapes de prétraitement de la biomasse par des méthodes physiques, chimiques ou biologiques, hydrolyse enzymatique de polysaccharides cellulose et hémicellulose intomonomère sucres et enfin fermentation de ces sucres simples en alcool. Puisque la lignine n'est pas un polysaccharide et ne peut pas être hydrolysée et fermentée pour produire du bioéthanol, il peut être récupérée après l'étape de prétraitement et utilisé pour produire de la chaleur et de l'électricité à l'installation de production de bioéthanol pour une utilisation complète de la biomasse lignocellulosique (Hahn-Hagerdal et *al.*, 2006). Les sources conventionnelles de biomasse lignocellulosique comprennent les résidus agricoles, herbacés, feuillus et résineux dédiés, tandis que les sources non conventionnelles comprennent les déchets cellulosiques industriels, les déchets solides municipaux et les mauvaises herbes. Exemples des matières premières de deuxième génération sont les tiges de maïs, la bagasse de canne à sucre, la paille de blé, le riz paille, déchets alimentaires, bagasse aux pommes de cajou, etc (Anuja et *al.*, 2020).

De nombreux microorganismes (levures) peuvent être utilisés pour transformer la biomasse en éthanol (Nigam, 2000). La levure de *S. cerevisiae* peut être utilisée pour produire de l'éthanol à 48,8 ml/kg à partir du sous-produit de la conserverie d'ananas et 120,7 ml/kg du jus de sorgho (Johansson et *al.*, 2012).

Le palmier dattier est un arbre rustique s'adaptant aux régions les plus arides du monde. C'est une monocotylédone arborescente, de la famille des palmacées ou phoenicicacées sous famille des coryphinées, du genre phoenix et de l'espèce *Phœnix dactylifera* L. Il constitue la principale source de vie de la population saharienne (Chehema; 2001). Le Palmier dattier est une des plantes d'importance socio-économique majeure dans les pays du Maghreb. Il est

## **Introduction générale**

---

représenté par, environ 120 millions de Palmier, répartis essentiellement (2/3) au Proche Orient et en Afrique du Nord, et constituent une source de vie non négligeable. De plus les palmeraies créent un microclimat qui permet d'associer d'autres cultures sous-jacentes telles que des cultures maraîchères, des céréales et des arbres fruitiers (Ghobrini;2010 ). Par ailleurs, en Algérie la superficie globale des palmiers-dattiers s'élève à 167.663 hectares, alors que les palmiers productifs sont estimés à 15,7 millions et ceux plantés à 18,53 millions. Une production de plus de 10,58 millions de quintaux a été enregistrée dans la filière des dattes en 2017, la récolte de la variété la plus prisée de datte en l'occurrence "Deglet Nour" a atteint 5,67 millions de quintaux, contre 2,87 millions pour la Degla Beïda (datte blanche) et les dattes sèches, et plus de 2 millions de quintaux pour les dattes moelles (CACI; 2017). La wilaya d'Adrar a produit 935.680 quintaux de dattes en (2019-2020) provenant de plus de 2 millions de palmiers dattiers (DSA-Adrar, 2020). Cette importante production a été commercialisée en majorité par troc aux pays frontaliers étrangers et une faible quantité est consommée localement (Boulal et *al.*, 2015, 2016). Outre sa production de dattes pour l'alimentation humaine, le palmier dattier, offre une large gamme de sous-produits (palme sèche et pédicelle) exploité par la population saharienne, à savoir palmes sèches, utilisées comme clôtures, brises vent, dans la confection de couffins, de chapeau, etc., ils peuvent même servir en industrie de papier ; les régimes de dattes, comme balais traditionnels, et comme combustibles; le liffe pour la confection des semelles de sandales et alimentation du bétail. Aussi, ces sous-produits peuvent être transformés, par des procédés biotechnologiques en biocarburant, substance énergétique qui peut remplacer le pétrole léger, ou au moins permettre le couplage de l'essence (5 à 10 %). Le but de ce travail est la valorisation des sous-produits de palmier dattier (palme sèche, pédicelle,.....) issus de leur élagage, et leur transformation en bioéthanol à haute concentration.

Ce travail de fin d'étude de master entre dans le cadre de la valorisation du substrat locale disponible avec un tonnage important et maîtrise des techniques de transformation et aussi la diversification des sources d'énergies renouvelables.

Ce mémoire comporte deux parties contenant 05 chapitres:

**La première partie** de ce mémoire présente une synthèse bibliographique divisée en trois chapitres. Le premier chapitre rapporte des données générales sur le palmier dattier et les date. Le deuxième chapitre porte sur le bioéthanol, ce chapitre présente les différents types de

## **Introduction générale**

---

bioénergies, leurs voies de production et leur utilisation dans divers domaines. Le troisième chapitre se focalise sur la production de bioéthanol et présente les différentes étapes de production de bioéthanol et la matière première utilisée. Ensuite les étapes du procédé de fermentation alcoolique qui permet de transformer les sucres simples en bioéthanol.

**La deuxième partie** est divisée en deux chapitres: quatrième chapitre rapporte sur les matériels et méthodes expérimentales mis en jeu pour la réalisation de ce travail, et le cinquième chapitre qui va contenir l'ensemble des résultats obtenus et leur interprétations.

Ce travail de mémoire est clôturé par une conclusion générale et des perspectives.

*Partie*

*Bibliographique*

*Chapitre I:*  
*Généralité sur*  
*le palmier*  
*dattier*

### I.1. Introduction

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) constitue l'armature de l'écosystème, oasien des régions sahariennes, il représente également une production agricole importante des régions arides et semi arides. Il constitue l'élément fondamental de l'écosystème oasien et a toujours joué un rôle économique et sociale clef pour les populations de ces régions via la production des fruits de dattes et des sous-produits (levure, pâtes (Btana), farine, sirop, vinaigre, confiserie, bioéthanol...). Ces produits représentent la base de l'alimentation humaine et animale des régions sahariennes. Le palmier dattier assure aussi la stabilité de la population saharienne en Algérie, qui est estimée à plus de 2.8 millions d'habitants. La datte est un aliment de grande valeur énergétique, appréciée aussi bien sur le plan national qu'international. La datte reste insuffisamment valorisée et subit même des pertes importantes, principalement en raison de l'insuffisance des conditions de récolte, de stockage, de conditionnement, de l'absence d'une véritable industrie de conservation et de transformation ainsi que le manque d'organisation des circuits de commercialisation (Boulal, 2017).

### I.2. Historique et origine

Le palmier dattier, *Phoenix dactylifera* L., appartient à une grande famille d'arbre à palme " Palmacées". Ses noms en anglais: Date palm; en arabe: Nakhla ou tamar. C'est Carlos Linné « le prince du monde végétal », en 1734 qui a repris le nom de *Phoenix dactylifera* et qui a fait sa description morphologique complète. Par contre, le nom de Dactylifera, du latin : dactylus, dérivant du grec : dactulos qui désigne doigt d'où la forme du fruit .Le palmier dattier est largement cultivée pour son fruit qui à une forme ovoïde «baie », un aliment excellent, et sa commercialisation constitue une source de revenu pour les populations des oasis. C'est la plante verte des oasis sahariennes; il est indispensable dans ces régions, car son bois, ses palmes, ses rachis et ses régimes sont utilisés pour le chauffage, à la lutte contre la désertification. On peut aussi extraire à partir de sa sève des boissons très appréciées comme : lagmi. Ou faire de la confiture, sirop, rob à partir des dattes.

Le palmier dattier est une plante monocotylédone arboricole, dioïque (individus mâles et femelles sont séparés). Selon Aug Chevalier (1952), ce genre comprend 12 espèces réparties dans le monde entier. L'espèce, *Phoenix Dactylifera* se trouve en Europe méditerranéenne, l'Afrique, l'Asie occidentale, les USA, et l'Australie (Benouamane; 2015).

### I.3. Systématique du *phoenix dactylifera* L.

La classification botanique du palmier dattier donnée par (Djerbi, 1994) est la suivante :

Groupe :	Spadiciflore.S
Embranchement :	Angiospermes
Classe:	Monocotylédones
Ordre:	Palmales
Famille:	Palmoë
Tribu:	Phoenixées
Genre:	<i>Phoenix</i>
Espèce:	<i>Phoenix dactylifera</i> L.

Le genre Phoenix comporte au moins douze espèces, la plus connue est le dactylifera, dont les fruits « dattes » font l'objet d'un commerce international important.(Chniti; 2015)

### I.4. Biologie du palmier dattier

#### I.4.1.Présentation de l'espèce

Le palmier dattier est une plante dioïque. Il comporte des pieds mâles (dokkar) et des pieds femelles (nakhla). Il se multiplie aussi bien par semis de graines (noyaux) que par plantations des rejets (djebbars). La multiplication par noyaux ne reproduit pas fidèlement la « variété » dont il est issu. On obtient en moyenne par semis de noyaux, 50% de sujets mâles et 50% de sujets femelles. L'hétérozygotie des plants originaux provoque une très forte hétérogénéité de la descendance. A l'origine, cette méthode de multiplication permettait aux phoeniculteurs d'opérer des sélections parmi les meilleurs plants issus de noyaux et de les multiplier ensuite par voie végétative. Ainsi, les individus de palmiers actuels ne sont que le produit de cette sélection et ne sont en fait que des cultivars (Oucif, 2017).

#### I.4.2. Morphologie du palmier dattier

La figure suivante montre une présentation schématique du palmier dattier.

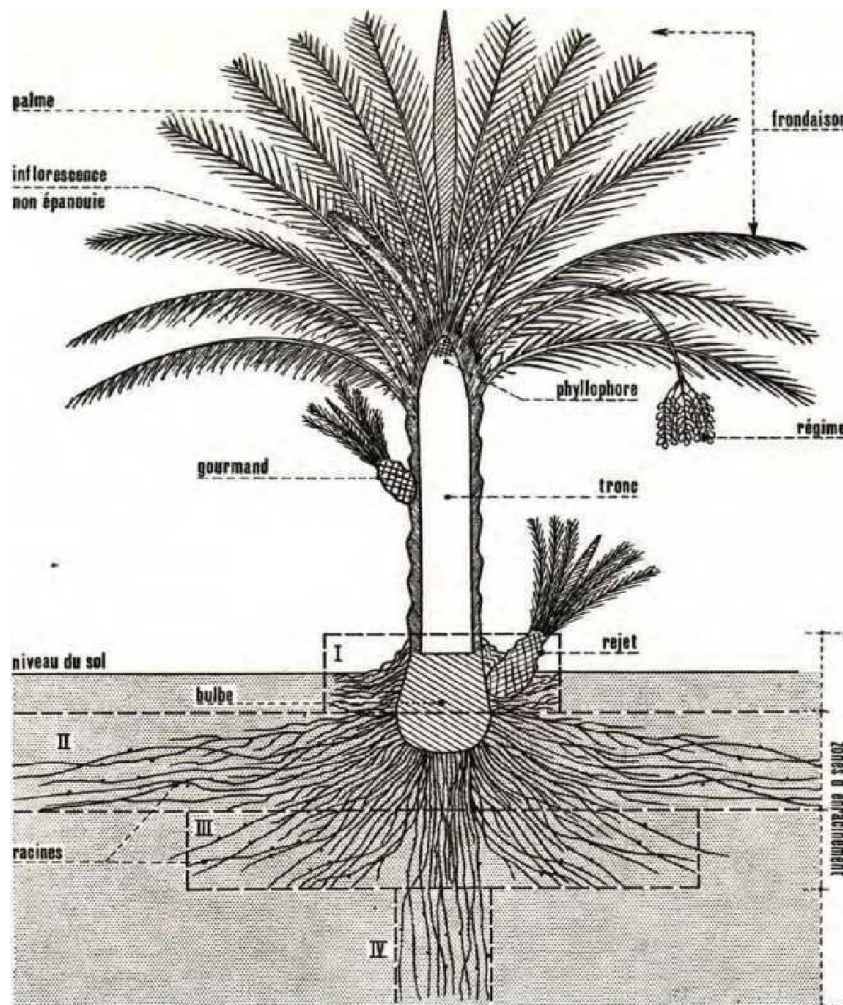


Figure I.1: Figuration schématique du dattier (Retima, 2015)

#### I.4.2.1. Le système racinaire

Le système racinaire présente plusieurs zones d'enracinement : les racines respiratoires, les racines de nutrition, les racines d'absorption et une zone dont les racines sont très bien développées particulièrement dans le cas où la nappe phréatique se trouve à une grande profondeur (Achoura, 2013).

#### I.4.2.2. Le stipe ou tronc

Le palmier dattier est une plante arborescente à tronc monopodique, de forme cylindrique à tronconique. Il reçoit souvent le nom de stipe (Fig. I.1). Il a un port élancé, de couleur brune, lignifié et non ramifié. L'élongation du palmier dattier se fait dans sa partie coronaire grâce au

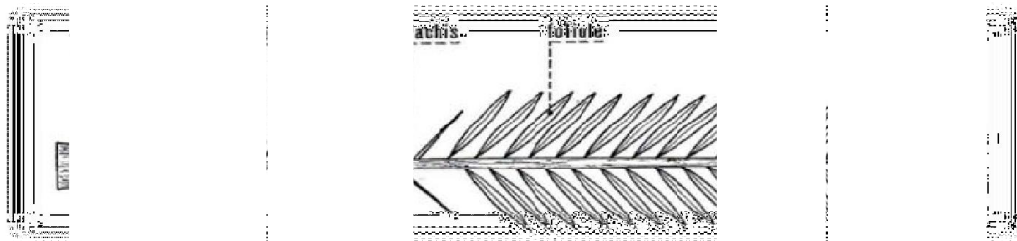


bourgeon terminal ou phyllophore. La croissance en hauteur dépend de plusieurs facteurs liés au cultivar et l'environnement. En général, les palmiers dattiers mâles croissent plus rapidement que les palmiers femelles. Le stipe atteint 30 à 40 m de long et l'élongation est d'environ 20 à 30 cm par ans (Daddi, 2010).

### I.4.2.3. Les feuilles

Elles sont issues du bourgeon terminal, ce sont des feuilles composées, pennées, disposées sur le tronc en hélice c'est la phyllotaxie. Les feuilles sont longues, ont un limbe divisé en deux rangés de folioles étroites, pliées raides, piquante au sommet disposées en position oblique sur le long du rachis, isolées ou groupées, leur épiderme est recouvert d'un enduit cireux, la couleur varie avec les clones (Benouamane , 2015) .

A l'extrémité inférieur de la palme il ya le rachis qui s'élargi afin de former le pétiole (Kornaf) où sa base est recouverte par le fibrillum ou le life. Il est semi-cylindrique plus ou moins ailé, dure et relativement rigide portant les épines (chouk ou sreb) (Fig. I.2). Parmiles index taxonomiques qui nous permettent de différencier les clones c'est bien les caractères de la palme (Benouamane , 2015).



**Figure I.2:** Schéma d'un palmier (<https://www.researchg.com>)

### I.4.2.4. Les organes floraux

D'après Peyron (2000), tous les *Phoenix*, et donc le palmier dattier, sont des arbres dioïques. Les sexes étant séparés, il existe donc des pieds mâles donnant du pollen et des pieds femelles produisant des fruits, les dattes. Les fleurs sont portées par des pédicelles, ou des épillets qui sont à leur tour sont portés par un axe charnu, la hampe ou spadice.

Selon le même auteur, l'ensemble est enveloppé dans une grande bractée membraneuse (Oucif , 2017) :

### I.4.2.5. La fleur femelle

Elle est globuleuse, d'un diamètre de 3 à 4 mm et est formée de 3 sépales soudés. Une corolle formée de 3 pétales ovales et arrondies et 6 étamines avortées. Le gynécée comprend 3 carpelles indépendants à un seul ovule. La sortie des fleurs « Talâa » a lieu de la fin Janvier jusqu'au début Mai selon les variétés et l'année (Belaroussi, 2019).



Figure I.3: Fleur femelle (ps://sites.googl.com)

### I.4.2.6. La fleur mâle

De forme allongée, constituée d'un calice composé de 3 spathe soudées par leurs bases, de 3 pétales légèrement allongées formant la corolle. Signale que la fleur possède 6 étamines à déhiscence interne et trois pseudo-carpelles. Après l'éclatement de la spathe mâle (fin Janvier), la fleur laisse échapper un pollen (Belaroussi, 2019).



Figure I.4: la fleure mâle (www.alamyimages.fr)

### I.4.2.7. Le fruit « la datte ; Tmar »

Le fruit du Palmier Dattier est une baie appelée « Datte, Tmar en arabe», contenant une seule graine « noyau » après fécondation, l'ovule évolue pour donner un fruit de couleur verte (taille d'un pois puis d'un fruit de raisin jusqu'à la taille normale de la datte). Elle est de forme généralement allongée, oblongue ou arrondie, ovoïde, parfois sphérique. Cas de la variété Tantebouchet, elle est composée d'un noyau, ayant une consistance dure, entouré de chair (Absi ,2013).



Figure I.5: Le fruit « la datte ; Tmar » (<https://fi.pinterest.com>)

### I.5.Cycle de développement

Le palmier dattier en Algérie comporte généralement quatre phases de développement (Oucif ,2017) :

**a-Phase jeune:** Depuis la plantation jusqu'aux premières productions. Cette phase dure entre 5 à 7 années, selon le milieu et les soins apportés à la culture.

**b-phase juvénile :** C'est la pleine production. Elle se situe autour de 30 ans d'âge du palmier.

**c-Phase adulte:** Autour de 60 ans d'âge, début de décroissance de la production surtout si le palmier est dans des conditions de culture médiocres.

**d-Phase de sénescence :** Après 80 ans et plus, chute de la production.

## I.6. Aire géographique et importance

### I.6.1. Dans le monde

La culture du palmier dattier est concentrée dans les régions arides au Sud de la Méditerranée et dans la frange méridionale du Proche Orient depuis le Sud-Est de l'Iran jusqu'à la côte atlantique de l'Afrique du Nord à l'Ouest, entre les altitudes 15° et 35° Nord.

L'Espagne reste le seul pays d'Europe à produire des dattes principalement dans la célèbre palmeraie d'Elche, située à l'Ouest d'Alicante à 39° Nord. L'aire de culture historique, traditionnelle, du dattier est celle pour laquelle la phoeniciculture y est millénaire ( Zango ,2016).

Il s'agit du Moyen et du Proche-Orient, de l'Afrique du Nord et d'une partie du Nord-ouest de l'Inde et du Pakistan Le palmier dattier se trouve aussi en Afrique subsaharienne notamment dans les pays sahélien. Il a également été introduit au Mexique, en Argentine et en Australie où il est cultivé à plus faible échelle. On le rencontre aussi un peu partout à travers le monde sous forme de pieds isolés ou en petits peuplements pour l'ornementation des villes, comme c'est le cas à Sanremo en Italie, mais aussi en Russie et en Afrique du Sud.

La production mondiale de dattes est estimée à près de 8 millions de tonnes en 2011. Avec plus de 18% de la production, l'Egypte est le premier pays producteur de dattes au monde (Zango, 2016).

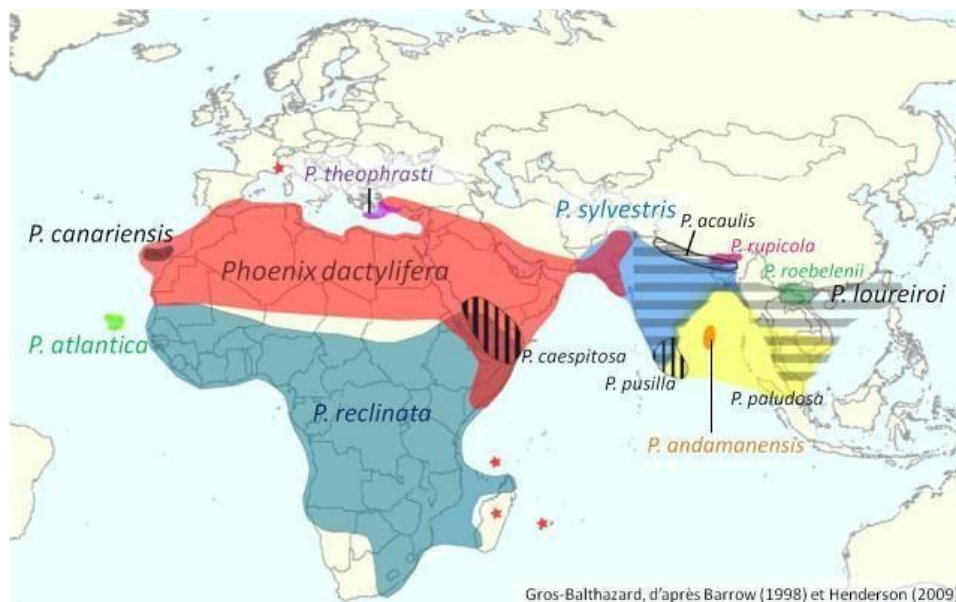


Figure I.6: Aire géographique des palmier dattiers dans le monde (Gueye , 2011).

**I.6.2. En Algérie**

L'origine du Palmier Dattier en Algérie, vient de la « Péninsule Arabique » ; à travers les commerçants qui ont propagé du Palmier autour de la Méditerranée, il était introduit spécialement dans les lieux disposant d'eau dans le Sahara. C'est ainsi que sont apparues les premières palmeraies de Oued Righ et des Ziban par le biais des bédouins nomades arabes, venus d'Orient, pour le commerce.

Le patrimoine phoenicicole national est concentré dans toutes les régions situées sous l'Atlas saharien dans la partie septentrionale est et centre du Sahara Algérien. Concentrées essentiellement dans le sud-est du pays .Parmi ces zones potentielles, à savoir : Souf, Ziban, Oued Righ, Cuvette de Ouargla, M'Zab, El-Goléa, Tamanrasset, Illizi et Tindouf ,Adrar (Absi 2013).

**I.6.3. En région d'Adrar****Tableau I.1:** Statistique de production de palmier dattier en Adrar (DSA-Adrar, 2020).

Compagne	Commune	Superficie (ha)		Nbre existant	Total	
		Existante	Irriguée		Nbre productif	production (qx)
2014-2015	11 / 12	28.326	26.163	3.798.965	2.766.100	910.328
2015-2016	11 / 12	28.327	26.163	3.798.965	2.775.938	913.663
2016-2017	11 / 12	28.327	26.163	3.803.230	2.830.575	937.604
2017-2018	11 / 12	28.320	26.168	3.798.759	2.796.087	935.657
2018-2019	11 / 12	28.320	26.168	3.798.759	2.825.633	934.562
2019-2020		28,320	26,168	3.798.759	2.825.633	935.680

*Chapitre II:*  
*Bioéthanol et*  
*biomasse*  
*lignocellulosique*

## II.1.Généralité sur le biocarburant

### II.1.1.Définition

Les biocarburants représentent aujourd'hui la principale alternative aux carburants d'origine fossile : pétrole, gaz, charbon, la substitution des carburants raréfiés (Machado, 2013). Les biocarburants sont des fluides produits à partir de matériaux organiques non fossiles et issus de la biomasse ou matière première considérée comme étant la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, de la sylviculture et de leurs industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux (Khiari, 2016).

### II.1.2. Différentes biocarburants

Les dix biocarburants cités par la CE (Directive 2003/30/CE) sont : le bioéthanol, le biodiesel (esters d'huile végétale), le biogaz, le bio-méthanol, le bio-diméthyléther (bio-DME), le bio-Ethyle- tertio-butyl-éther (bio-ETBE), le bio-Méthyl-tertio-butyl-ether (bio-MTBE), les biocarburants synthétiques, le bio-hydrogène, et les huiles végétales pures (Poitrat .E, 2005 ; Boulal , 2017). Les deux principaux biocarburants candidats prêts à un développement industriel sont l'éthanol (principalement utilisé en Europe sous forme d'éthyl-tertio-butyl-éther ou ETBE) et l'ester méthylique d'huile végétale (EMHV) ou biodiesel (Colonna, 2006 et Benali et *al.*, 2015 ).

## II.2.Différentes générations de biocarburants

### Les biocarburants de 1<sup>ère</sup> génération

La première génération de biocarburants repose sur l'utilisation des organes de réserve des cultures : les graines des céréales (blé, maïs) ou des oléagineux (colza, tournesol, jatropha), les racines de la betterave ou la canne à sucre, les fruits du palmier à huile, Ces organes de réserves des plantes stockent le sucre (betterave et canne), l'amidon (blé, maïs), ou l'huile (colza, tournesol, palme, jatropha). Ces organes de réserves étant également utilisés pour l'alimentation humaine, la production de biocarburants se fait en concurrence de la production alimentaire (Oucife, 2017).

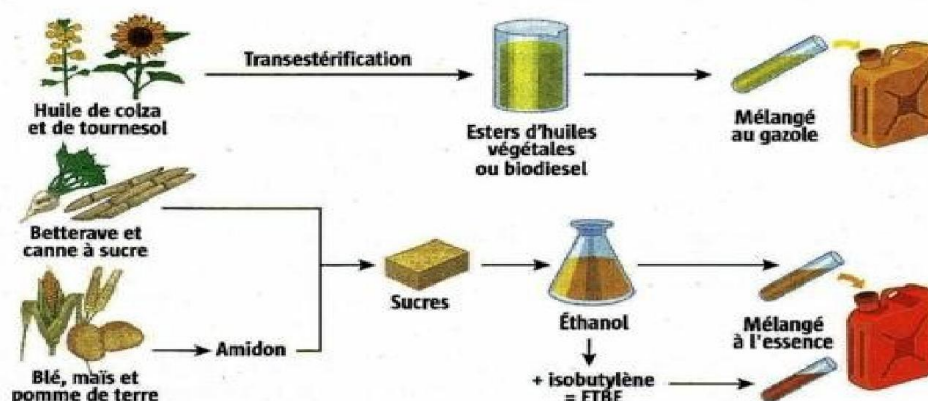
Il existe deux grandes filières de production de biocarburants :

### ✚ Le biodiesel

Cette filière II est obtenu par l'estérification, c'est-à-dire la transformation des corps gras en esters méthyliques d'acides gras (EMAG) par une réaction chimique de transestérification en présence d'un catalyseur (Figure II.1) (Boulal, 2017a).

### ✚ Le bioéthanol

La filière éthanol est un substitut à l'essence ; produit de la fermentation alcoolique (ou éthanolique) des fruits, des céréales, des tubercules et des végétaux riches en sucres (Chniti, 2015) (figure II.1).

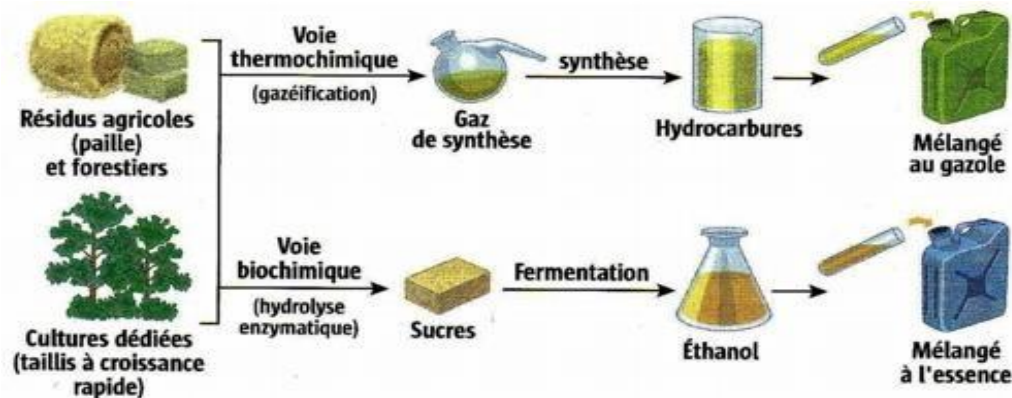


**Figure II.1:** lustration de quelques types et procédés de biocarburants de 1<sup>ère</sup> génération (<http://www.combustibles.fr/biocarburants.html>).

### Les biocarburants de 2<sup>ème</sup> génération

Ces carburants sont issus de la transformation de la lignocellulose contenue dans les résidus agricoles (paille) et forestiers (bois), ou dans des plantes provenant de cultures dédiées (taillis à croissance rapide) (Figure II.2). Les nouveaux procédés cherchent à améliorer le bilan énergétique en utilisant toute la plante. Pour cela les résidus de sylviculture, les déchets organiques, des cultures comme la luzerne ou le miscanthus sont exploités (Boulal, 2017a).

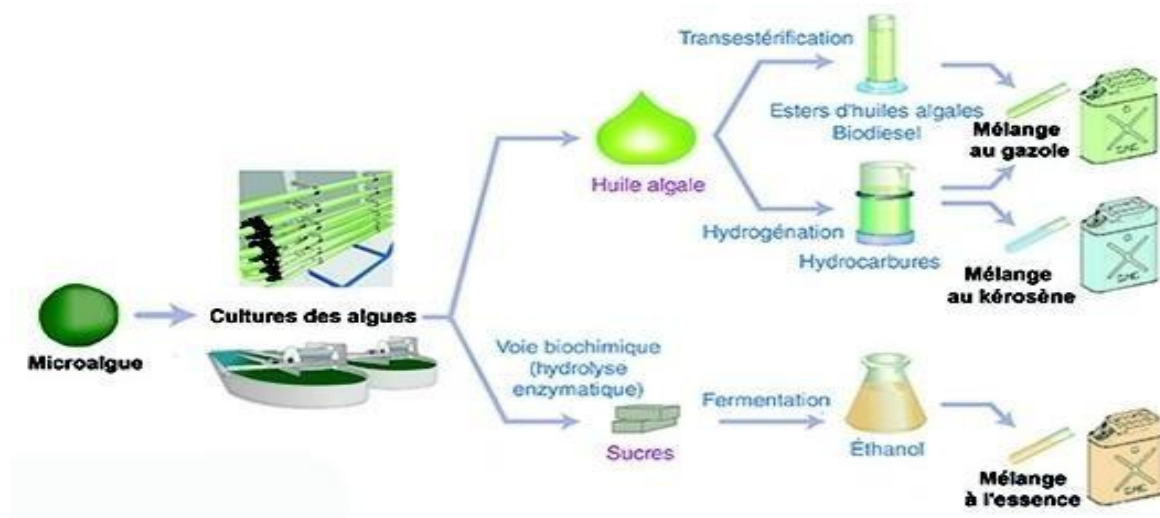




**Figure II.2:** Illustration de quelques types et procédés de biocarburant de 2<sup>ème</sup> génération (<http://www.combustibles.fr/biocarburants.html>)

### Les biocarburants de 3<sup>ème</sup> génération : Les micro-algues

Les biocarburants de troisième génération sont principalement produits par des microalgues (Figure II-3). Les micro-algues peuvent subir différentes transformations pour être valorisées en biocarburants, elles peuvent accumuler des acides gras jusqu'à 80% de leur poids sec (Chaib, 2011). Le soufre est un élément chimique nécessaire au processus de formation des protéines. Lorsque l'algue *Chlamydomonas reinhardtii* est privée de soufre, la photosynthèse diminue et elle met en place une autre voie énergétique : la production d'hydrogène. On peut cultiver les micro-algues avec deux procédés différents : l'utilisation d'un photo-bioréacteur ou de bassins extérieurs. Les rendements prévus sont 3 à 30 fois supérieurs aux espèces oléagineuses (Boulal, 2017a).



**Figure II.3.** Illustrations de quelques types et procédés de Biocarburant de 3<sup>ème</sup> génération (<http://biocarburants-parlons-chimie.e-monsite.com/pages/les-biocarburants/troisieme-generation.html>).

### Les avantages et Les inconvénients des biocarburants

Les différents avantages et inconvénients des biocarburants se résument dans le tableau II.1 :

**Tableau II.1:** Les principaux avantages et inconvénients des biocarburants (Valbium, 2009; Boulal, 2017).

Avantages	Inconvénient
Ressources renouvelables	L'augmentation de la demande en biocarburants a eu pour conséquence le renchérissement des cours mondiaux des céréales et des oléagineux.
Limitent les émissions de gaz à effet de serre (GES) et les consommations d'énergie non renouvelable.	Ils sont gourmands en énergie, coûteux à cultiver, à collecter et à transformer.
Emettent moins de polluants tels que le soufre (à l'origine des pluies acides), les suies, les	Ils instaurent une concurrence redoutable entre cultures énergétiques et cultures alimentaires.

particules fines.	
Permettent de diversifier les sources de production d'énergie et de réduire la dépendance à l'or noir et de valoriser des ressources domestiques.	Le développement des biocarburants issus de cultures énergétiques peuvent être une menace pour les écosystèmes et les puits.

## Le Bioéthanol

### II.2.1- Définition

Le bioéthanol est un alcool éthylique destiné à la carburation automobile. Comme tous les alcools d'origine agricole, il est obtenu par fermentation et distillation du sucre contenu dans la betterave sucrière ou de l'amidon contenu dans les céréales (QTF, 2020).

La production de l'éthanol à partir de la biomasse lignocellulosique (résidus agricoles et forestiers, déchets du bois, ou cultures de taillis à croissance rapide : le peuplier, le saule, l'eucalyptus) (He et Zhang, 2011 ; Luc SY T, 2013). L'éthanol est de formule brute  $C_2H_5OH$  (figure II-4), l'éthanol est un produit à usages multiples (pharmaceutique, parfumerie, alimentaire, combustible, carburant, etc.). Il est produit chimiquement par hydratation catalytique directe de l'éthylène ( $CH_2=CH_2$ ) et biologiquement par fermentation alcoolique. Le bioéthanol a les mêmes caractéristiques que l'éthanol tableau (Oucife, 2017).

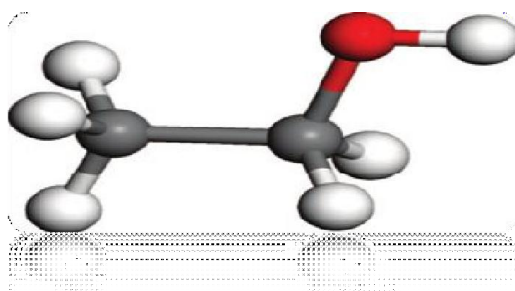


Figure II-4 : Molécule d'éthanol (Mehdi-Kacimi, 2008)

### I.2.2. Les propriétés physico-chimique de bioéthanol

**Tableau II.2:** Caractéristiques physico-chimiques de l'éthanol comme combustible liquide (Walker, 2011 ; Oucife, 2017).

Paramètre	Caractéristique propriétés
Formule moléculaire	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH
Masse moléculaire	46.07 g/mol
Apparence	Liquide incolore
Solubilité dans l'eau	∞ (miscible)
Densité	0.789 Kg/L
Température d'ébullition	78.5°C (173°F)
Point de congélation	-117°C
Point d'éclair	12.8°C
Température d'inflammation	425°C
Limites d'explosion	Moins de 3.5% (v/v) plus de 19% (v/v)
Pression de vapeur à 38 ° C	50 mm Hg
Pouvoir calorifique supérieur (à 20 ° C)	29,800 kJ/kg
Pouvoir calorifique inférieur (à 20 ° C)	21,090 kJ/kg
Chaleur spécifique	Kcal/Kg 60°C
Acidité (pKa)	15.9
Viscosité	1.200 mPa·s (20°C)
Indice de réfraction (nD)	1.36 (25°C)
Indice d'octane	99

### II.2.3. Production de bioéthanol

#### La matière première

Tout les sucres simples ou fermentescibles comme glucose saccharose...etc. ces sucres sont transformés en éthanol par fermentation. Ces sucres se trouvent dans le domaine végétale dans de nombreux produits agricoles comme la betterave à sucre, la canne à sucre, la datte, le blé, le maïs, la pomme de terre, mais également de l'herbe et encore le bois, la matière lignocellulosique ces ressources renouvelables les plus abondantes sur terre. Avant l'étape de

fermentation le substrat est d'abord préparé (pressage, broyage, vapocraquage, hydrolyse chimique ou enzymatique) afin d'en faire ressortir le jus qui pourra être fermenté par les microorganismes (Boulal , 2017a).

#### **II.2.4.Utilisation du bioéthanol**

Le bioéthanol contient 35% d'oxygène, ce qui permet une réduction d'émission de matière indésirable. L'utilisation de bioéthanol réduit de 7% la quantité de CO<sub>2</sub> émise par rapport à l'essence (Sadi M, 2012). Les mélanges d'éthanol et d'essence sont identifiés par l'abréviation « Exx », où « xx » qui indiquent le pourcentage d'éthanol inclus dans le mélange. Un carburant E20 contient donc 20 % d'éthanol et 80 % d'essence, alors qu'un carburant E100 correspond à de l'éthanol pur. Plusieurs types de mélange sont commercialisés dont les plus fréquents sont le E5, le E10, le E85 et le E100 (CRAQ, 2008). Le bioéthanol peut être aussi utilisé sous forme d'ETBE (Ethyl Tertio Butyl Ether), qui est formé par l'éthérification catalytique de l'isobutène avec de l'éthanol. Il contient 45% en masse d'éthanol combiné sous forme chimique. L'ETBE possède les mêmes avantages que l'éthanol en termes d'accroissement d'indice d'octane (Sadi , 2012).

#### **II.2.5.Avantages et inconvénients du bioéthanol**

Le bioéthanol présente de nombreuses dualités comme résumé, de manière non exhaustive dans le tableau II-3 Sa formule chimique étant C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH. Cependant, l'éthanol ayant un fort indice d'octane, il peut améliorer, dans le cas d'un mélange, les performances de l'essence en diminuant les problèmes de combustion à hauts régimes (Easterly et col, 2007; Rissen, 2012). Le tableau II -3 résume les avantages et les inconvénients de l'utilisation du bioéthanol.

Tableau II.3 : Avantages et inconvénients du bioéthanol (Oucife , 2017).

Avantages	Inconvénients
Moins d'émissions de dioxyde de carbone CO <sub>2</sub> fossile que les carburants	Emissions très élevées d'hydrocarbures par évaporation environ 15% pour E10
Haut indice d'octane	Son indice de cétane étant moins élevé que celui du diesel
Moins d'émissions de particule	La pression de vapeur étant basse et la chaleur latente d'évaporation de l'éthanol élevée
Risque moins élevé de formation d'ozone que l'essence et le diesel	Sa combustion entraîne une formation accrue d'acétaldéhyde
Pas de teneur en soufre	Sa combustion entraîne une formation accrue d'acétaldéhyde
Biodégradable	La combustion de l'éthanol pur produit une flamme invisible qui peut provoquer des problèmes de sécurité
Moins toxique que le méthanol ou le bioéthanol	Lorsque l'éthanol non brûlé réagit sur la surface du catalyseur, il peut s'échapper une odeur de vinaigre
Rendement à indice d'octane élevé pour un coût relativement réduit.	Emissions non réglementées plus élevées (éthylène et acétaldéhyde)

### II.2.6.Obtention de la bioéthanol

Après fermentation, l'éthanol est séparé du jus par distillation, rectification et déshydratation pour être utilisé comme biocarburant (Isabelle et *al.*, 2010).

#### II 2.6.1. Distillation

C'est une opération de séparation des constituants d'un mélange liquide a basse de la volatilité ou température d'ébullition (de alcool), et le mélange de départ n'est pas un binaire eau-éthanol, mais un mélange complexe où viennent s'ajouter des produits secondaires issus eux aussi de la fermentation comme des aldéhydes, des esters, du méthanol ou encore des alcools dits supérieurs

possédant plus de deux carbones. La présence de ces produits secondaires est réglementée, pour l'alcool carburant, par la norme NF EN 15376 (Risse; 2012).

Le distilla (éthanol) récupère n est pas pure, obtenus par cette distillation contiennent généralement des quantités d'eau, de produits secondaires et d'ions indésirables.il est donc une étape d` amélioration de l`éthanol.

### II.2.6.2. Rectification

Pour obtenir de l'éthanol pur, dit absolu, deux étapes sont nécessaires après la distillation (rectification et déshydratation). La première étape a pour but de purifier l'alcool contenu dans les bruts en éliminant les impuretés. Ce procédé consiste en une succession de distillations à des températures allant de 78°C à 85°C (Boulal , 2017b).

## II.3.La Biomasse lignocellulosique

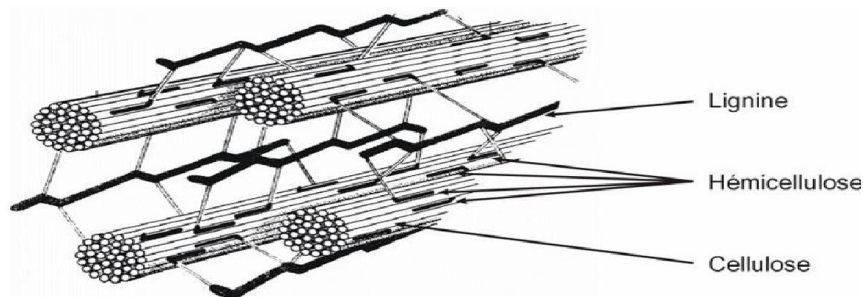
### II.3.1.Définition

La biomasse lignocellulosique représente une des ressources renouvelables les plus abondantes sur terre, et certainement une des moins coûteuses (Ogier *et al.*, 1999). La biomasse lignocellulosique est un composé organique essentiellement constitué de carbone C, d'hydrogène H, d'oxygène O, d'azote N et de matières minérales (Chaib , 2011). Elle est composée essentiellement de trois polymères (la cellulose, l'hémicellulose et la lignine), dont les teneurs sont variables d'une espèce végétale à l'autre (Isabelle , *et al.*, 2010). La biomasse lignocellulosique comprend le bois, la paille, le miscanthus... et peut être issu de l'industrie forestière, du secteur agricole (cultures dédiées ou résidus) ou des déchets ménagers et agroindustriels (Mertens *et al.*, 2010).

### II.3.2.Composition de la biomasse (lignocellulosique)

La biomasse peut être classée en quatre importantes catégories telles que : agricole, forestière, municipale et autres. Durant la production de la biomasse forestière, la réaction de photosynthèse conduit à la formation des produits clés de la biomasse, dont la lignine, la cellulose et les hémicelluloses. La fibre lignocellulosique est constituée approximativement de 40 à 55 % de cellulose, 20 à 35 % d'hémicellulose, de 15 à 35 % de lignine et de quelques autres substances

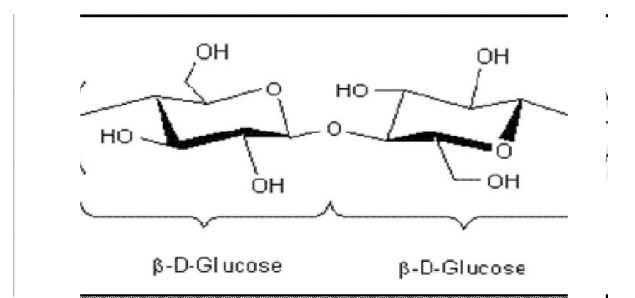
incluant les composés extractibles organiques et les substances minérales, voir la figure II.5 (Aicha, 2012).



**Figure II.5:** Composition de la biomasse (lignocellulosique) (Aicha, 2012).

#### ❖ Cellulose

La cellulose est le polymère dont la concentration est la plus abondante (35 à 50 % de la biomasse) (Ogier *et al*, 1999). La cellulose est une molécule linéaire non ramifiée constituée de milliers de monomères de glucoses liés par des liaisons osidiques. C'est d'ailleurs le composé organique le plus abondant de la biosphère, et dont la formule chimique est  $(C_5H_{10}O_5)_n$  (figure II-6) (Liu, 2015). Environ 80 molécules de cellulose s'associent par des liaisons hydrogènes pour former des microfibrilles. Un grand nombre de microfibrilles entrelacées forme une fibrille de cellulose. Nous avons trouvé que la cellulose est la composante principale de déchets lignocellulosique. Elle est de l'ordre de 48%. L'hydrolyse de la cellulose conduit à la production de sucres monomères fermentescibles (cellobiose, glucose et xylose) (Oucife, 2017).



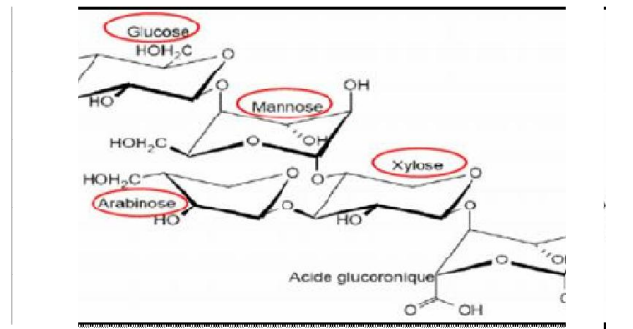
**Figure II.6:** Structure de cellulose (Wertz, 2012).

#### ❖ Hémicelluloses

Les hémicelluloses sont des polysaccharides non cellulosiques se distinguant de la cellulose par le fait qu'ils soient des polymères hétérogènes (hétéropolysaccharides) à chaînes plus courtes et



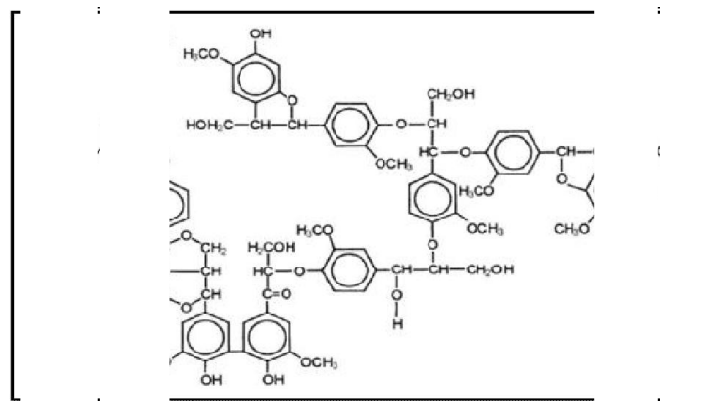
branches (Eloutassi, 2014, Warzywoda, 2011, Godin et *al.*, 2010, 2011). Les hémicelluloses contiennent plusieurs sucres à 5 atomes de carbone (sucres C5) tels que le xylose et l'arabinose (principalement dans la configuration furanose), des sucres C6 tels que le glucose, le mannose, le galactose, l'acide galacturonique et l'acide glucuronique et le sucre C7 l'acide 4-O-méthyl glucuronique figure II-7 (Oucife, 2017).



**Figure II.7:** Structure de hémicelluloses (Wertz , 2012).

#### ❖ Lignine

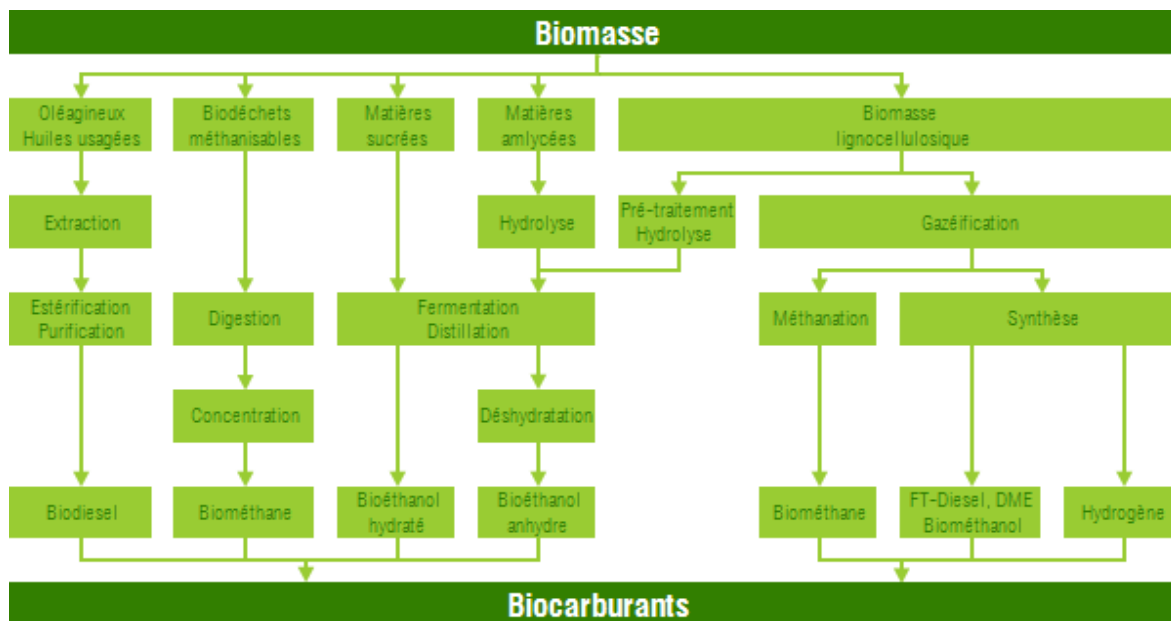
La lignine est un polymère aromatique tridimensionnel totalement amorphe, très complexe, composé d'unités monomériques de phénylpropane contenant entre 0 et 2 groupe (s) méthoxy, reliées entre elles par des liaisons C-C et C-O-C (éther) (Lucélia et De Macedo, 2017), La lignine se présente dans les interstices qui cimentent les chaînes de cellulose et d'hémicelluloses (figure II.8). Elles contiennent des molécules ayant des propriétés pharmaceutiques importantes (Téropénoïds, stéroïdes, composés phénoliques et les composés inorganiques). Elle peut diminuer le rendement de la fermentation alcoolique (Oucife , 2017).



**Figure II.8:** Structure de la lignine (Isabelle et *al.*, 2008)

### II.3.3. Ressources de biomasse utilisées pour la fabrication de biocarburants

La biomasse lignocellulosique représente l'une des ressources renouvelables la plus abondante sur terre, et certainement une des moins coûteuses. Sa conversion en (biodiésel, bioéthanol, biométhane et hydrogène) à usage carburant devrait permettre de subvenir à une partie des besoins énergétiques, couverts jusqu'à présent essentiellement par les produits dérivés du pétrole, tout en générant de nouvelles opportunités pour le monde agricole (Saidi, 2011).



**Figure II.9:** Ressources de biomasse utilisées pour la fabrication de biocarburants

[http://genet.univ-tours.fr/gen002300/DONNEES/biotechs\\_blanches/Plateforme%20Biocarburants%20-%20Les%20biocarburants.htm](http://genet.univ-tours.fr/gen002300/DONNEES/biotechs_blanches/Plateforme%20Biocarburants%20-%20Les%20biocarburants.htm)

*Chapitre III:*

*Fermentation*

### **III.1.Définition**

Le terme fermentation est apparu au 16<sup>ème</sup> siècle, il vient du latin «ferveur=bouillir», qui signifie le dégagement des bulles de CO<sub>2</sub> dans un moût de vinification (Boulal, 2017). La fermentation c'est tout processus métabolique au cours duquel est utilisé un microorganisme spécifique pour la libération de l'énergie contenue dans une molécule organique. Ce processus ne nécessite ni l'oxygène ni une chaîne de transport, et utilise une molécule organique comme accepteur d'électron final, la fermentation peut parfois se poursuivre en présence de l'oxygène (Ouacif, 2017).

### **III.2.Les différents types des fermentations**

#### **III.2.1.Fermentation alcoolique**

Est un processus qui permet de produire de l'alcool à partir de jus de fruits ; sous l'effet des enzymes, le sucre des fruits est transformé en éthanol et en bulles de dioxyde de carbone (Hetatache, 2014).

#### **III.2.1.Fermentation lactique**

Est un mode de fermentation qui intervient dans la fabrication du yaourt, du fromage, mais aussi de la choucroute et du pain au levain (Hetatache, 2014).

#### **III.2.3.Fermentation acétique**

Est une réaction chimique et biologique, des bactéries acétiques (Acétobacter et Acétomonas) oxydent l'alcool pour le transformer en vinaigre (Pierre-André, 2008).

#### **III.2.4. Fermentation malolactique**

La fermentation malolactique (FML) est l'étape suivant la fermentation alcoolique. Elle correspond à la transformation de l'acide L-malique, en acide L-lactique, catabolisée par l'enzyme malolactique . La FML est principalement réalisée par les bactéries lactiques de l'espèce *O. oeni*. Parmi les autres bactéries du vin (Bridier; 2011).

### III.3. Production de bioéthanol à partir de la biomasse lignocellulosique

#### III.3.1. Préparation du substrat de fermentation

##### a. Prétraitement de la biomasse lignocellulosique

Le prétraitement de la biomasse lignocellulosique a pour objectif de rendre la cellulose plus accessible à d'ultérieures réactions chimiques. Pour cela, plusieurs paramètres peuvent rentrer en jeu:

Abaissement de la teneur en lignine et hémicelluloses du substrat solide;

Diminution du taux de cristallinité de la cellulose et/ou augmentation de la surface spécifique de la matrice solide. Ces prétraitements peuvent être de nature physique, thermo physico chimique ou thermo chimique (Tableau III.1). En phase liquide sont retrouvés la lignine solubilisée et les produits d'hydrolyse des hémicelluloses, et dans la phase solide la cellulose avec potentiellement les Hemicelluloses et la lignine non hydrolysées. Un prétraitement efficace de la cellulose doit aussi permettre de réduire la taille des particules (5 $\mu$ m) tout en préservant la matière cellulosique de réactions de dégradation menant à des inhibiteurs potentiels de Transformations chimiques ou biochimique (Chambon, 2011).

**Tableau III.1:** Procèdes de prétraitement de la biomasse lignocellulosique (Chambon, 2011)

Type de procédés	Exemple
Procédés physique	Broyage mécanique intense (fragments <2mm) <b>Thermolyse</b> (chauffage à T<300°C suivi d'une hydrolyse acide).
Procédés physico-chimique	<b>Thermohydrolyse</b> (cuisson sous forte pression à ~200°C pendant 15 à 60 minutes permettant la solubilisation de l'hémicellulose et de la lignine). <b>Explosion à la vapeur</b> (injection de vapeur à haute pression pendant quelques secondes suivi d'une détente brutale à pression atmosphérique). <b>Explosion à la vapeur en conditions acides</b> (identique à la précédente mais en milieu acide). <b>Procédé AFEX</b> (Ammonia Fiber Explosion). <b>Explosion au CO<sub>2</sub></b> .

Procédés chimiques	<p><b>Prétraitement à l'acide dilué à chaud</b></p> <p><b>Prétraitement en milieu alcalin</b> (qui conduit à une solubilisation quasi totale de la lignine et d'une partie des hémicelluloses et à un gonflement des fibres de cellulose ainsi rendues beaucoup plus accessibles aux enzymes).</p> <p><b>Le procédé Organosolv</b> consiste à solubiliser et extraire la lignine et les hémicelluloses dans un solvant organique.</p> <p><b>Procédés d'oxydation chimique</b></p> <p><b>Procédés biologiques</b> mettant en œuvre des enzymes de type peroxydase ou des champignons lignolytiques.</p>
--------------------	--

### b. L'hydrolyse

Le procédé d'hydrolyse est une réaction chimique qui peut être catalysée par un acide dilué, un acide concentré ou des enzymes (cellulase), qui décomposent des chaînes complexes d'hydrate de carbone, proprement dite la cellulose, en des petits sucres (glucose, cellobiose) fermentescibles (Chaib, 2011).

#### 1. Hydrolyse à l'acide dilué

L'hydrolyse avec de l'acide dilué est réalisée avec une concentration modérée d'acide (de 0,5% à 1,5% d'acide sulfurique) à des températures comprises entre 170°C et 240°C, pour des durées d'hydrolyse allant de quelques secondes à quelques minutes]. Le rendement Maximal en glucose obtenu est de l'ordre de 50 60% (Chambon, 2011)

L'hydrolyse à l'acide dilué se fait généralement en deux étapes, la première faisant également office de prétraitement à l'acide dilué, et les conditions de la deuxième étape représentées dans le tableau III.1. L'hydrolyse en 2 étapes évite la dégradation des sucres, augmente le rendement et réduit les temps de réaction. Ainsi, on peut hydrolyser successivement l'hémicellulose et la cellulose. Les sucres sont ensuite fermentés séparément ou ensemble (Chaib, 2011).

**Tableau.III.2 :** Conditions, avantages et inconvénients d'hydrolyse à l'acide dilué (Chaib, 2011).

Conditions	Avantages	Inconvénients
190-215°C 5-10min H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> <10%	Réacteurs simples	Risque de dégradation des sucres

### 2. Hydrolyse à l'acide concentré

L'avantage d'hydrolyse à l'acide concentré par rapport à l'acide dilué est le rendement de la réaction (90%), à des températures moindres. La formation de coproduits nuisibles est aussi réduite. Les inconvénients viennent de la corrosion des réacteurs et de la nécessité de recycler l'acide. L'hydrolyse à l'acide concentré (acide sulfurique) se fait en deux étapes: 40% à 60°C puis 20-30% à 100°C. L'acide est séparé du sucre par chromatographie (sur résines échangeuses d'ions) et recyclé. Les avantages et inconvénients d'hydrolyse à l'acide concentré sont mentionnés dans le tableau III3 (Chaib, 2011).

**Tableau III.3:** Conditions, avantages et inconvénients d'hydrolyse à l'acide concentré (Chaib, 2011).

Conditions	Avantages	Inconvénients
50-100°C Quelque min à 4h avec H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (20-40%)	Rapide, conditions faciles peu d'inhibiteurs formés	Corrosion des matériaux recyclage de l'acide procédés complexe

### 3. Hydrolyse enzymatique

L'hydrolyse enzymatique constitue une méthode spécifique, réalisée dans des conditions relativement douces (50°C), permettant d'atteindre des rendements d'hydrolyse supérieurs à ceux obtenus à partir des procédés chimiques. C'est la raison pour laquelle l'hydrolyse enzymatique a fait l'objet de nombreux travaux de recherches durant ces 10 dernières années, afin d'optimiser la production des enzymes et leurs efficacités, et d'améliorer les étapes de prétraitements ( El Abdi, 2009).

Un substrat aussi complexe que la biomasse lignocellulosique peut être hydrolysé totalement par une seule enzyme. L'hydrolyse enzymatique de la cellulose résulte de l'action synergique de

trois types d'enzymes : les cellulases (endo 1,4  $\beta$ -glucanases et exo 1,4  $\beta$ -glucanases) qui hydrolysent les celluloses en cellobiose et les  $\beta$ -glucosidases qui hydrolysent le cellobiose en glucose (Ogier *et al.*, 1999).

### III.3.2. procédés de fermentation alcoolique

Au cours de la fermentation alcoolique, les sucres fermentescibles contenus dans le grain sont convertis en éthanol (alcool éthylique) et en gaz carbonique par l'action des microorganismes, principalement des levures (Chniti, 2015).

La fermentation alcoolique consiste en une biotransformation des jus de fruits ou toute solution sucrée en vin et fait intervenir des phénomènes physiques, biochimiques et biologiques complexes. Elle consiste en la transformation par les levures, principalement *Saccharomyces cerevisiae* des sucres du moût, principalement le glucose et le fructose en éthanol et en dioxyde de carbone avec dégagement de calories selon la réaction suivante (Mounir *et al.*, 2016).



La fermentation dure de 40 à 72 heures et la température est fixée entre 28°C et 32°C, elle se fait principalement par trois grands types : en batch, en Fed-batch (ou semi-continu) ou en continu. Les procédés batch et continu sont les plus utilisés à l'échelle industrielle (Boulal, 2017a).

### III.3.3. Les microorganismes utilisés

Une grande variété de microorganismes produit de l'éthanol à partir des sucres. Les bactéries produisent en plus d'autres alcools, des acides organiques, des polyols, des cétones, ou des gaz (méthane, dioxyde de carbone, hydrogène, ... etc.). On cite quelques souches de *Clostridium* qui peuvent avoir de bons rendements en éthanol. Cependant, seule *Zymomonas mobilis* qui présente l'avantage d'être anaérobie stricte, est considérée comme un strict producteur d'éthanol avec très peu de biomasse ; mais les levures sont les microorganismes qui possèdent les meilleurs atouts et les meilleurs potentiels pour cette production. Les plus utilisées sont *Saccharomyces cerevisiae*, *Saccharomyces uvarum*, *Schizosaccharomyces pombe*, *Kluyveromyces sp* présentant chacune des avantages et des désavantages, notamment en fonction de la composition du substrat et du procédé employé. Cependant *Saccharomyces cerevisiae* reste la préférée car elle offre une efficacité en terme de production et de croissance à bas pH (jusqu'à 4), un facteur important qui évite les contaminations. En plus, cette levure représente un modèle expérimental avec de



nombreux avantages (la petite taille et le séquençage de son génome, la facilité à sa manipulation génétique, et la disponibilité de la littérature). Toutefois peu de microorganismes sont réellement compétitifs en termes de rendement en éthanol par rapport au substrat consommé, de capacité fermentaire, de tolérance élevée à l'éthanol et d'adaptation aux conditions de fermentation (Rezki-bekki, 2014).

### III.3.3.1. Définition de la levure boulangère type (*Saccharomyces cerevisiae*)

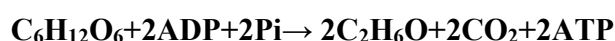
La levure est utilisée depuis des siècles pour la transformation du sucre en alcool, pour l'élaboration de pain, de vin, de bière ... Elle a été découverte, isolée et identifiée au milieu du XIXème Siècle. Ce champignon (mycète d'où -myces), capable de métaboliser des sucres, (saccharo-) responsable de la fermentation fut appelé *Saccharomyces cerevisiae* par Meyen en 1837 (Thuriaux 2004). *Saccharomyces cerevisiae* est un organisme eucaryote unicellulaire de forme ronde à ovoïde (5 à 10 µm) se reproduisant par bourgeonnement.

La levure *Saccharomyces cerevisiae* est très utilisée comme organisme modèle en biologie cellulaire et en génétique (Amillastre, 2012).

### III.3.3.2. Le métabolisme de *Saccharomyces cerevisiae*

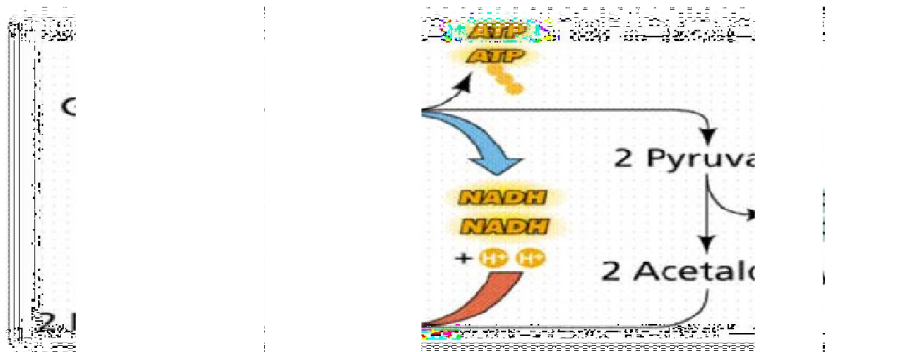
#### Le métabolisme fermentaire

En absence totale d'oxygène, *Saccharomyces cerevisiae* présente un métabolisme fermentaire. L'oxygène n'est plus l'accepteur final d'électrons, ce rôle est joué par des molécules organiques comme l'acétaldéhyde. Comme pour le métabolisme oxydatif, le glucose est dégradé par la voie de la glycolyse jusqu'au pyruvate. A ce niveau là, le pyruvate n'est plus dirigé vers le cycle de Krebs mais est converti en éthanol et CO<sub>2</sub>. La première étape est la décarboxylation du pyruvate en acétaldéhyde par la pyruvate décarboxylase, puis la réduction finale de l'acétaldéhyde en éthanol est catalysée par l'alcool déshydrogénase utilisant le NADH, H<sup>+</sup> comme coenzyme (Amillastre, 2012). Le bilan de la dégradation du glucose en éthanol par fermentation est le suivant :



Le métabolisme fermentaire produit beaucoup moins d'énergie que le catabolisme aérobie et le cycle de Krebs n'a qu'un rôle anabolique (synthèse de précurseurs), seule la synthèse d'éthanol permet la production d'énergie nécessaire aux besoins de la cellule et la réoxydation du NADH

produit lors de la glycolyse (Amillastre, 2012).



**Figure III.1** : Fermentation de glucose à éthanol par levure (Andrew, 2013)

### III.4.Paramètres de fermentation

La température et le pH sont des paramètres importants. La température optimale pour *S. cerevisiae* est de 30—35°C. Au-delà de 38°C et en dessous de 30°C, les rendements diminuent. De plus, la fermentation étant exothermique (1,2 MJ/kg d'éthanol produit), la température peut devenir problématique pour les grandes installations. Par ailleurs, une température élevée augmente le caractère inhibiteur de l'éthanol ; *S. cerevisiae* peut fermenter à un minimum pH de 3,5. Cependant, un pH supérieur à 5 est optimal, diminuant la durée de la phase de latence et permettant un développement optimal de la levure. Ceci est d'autant plus vrai quand le milieu de fermentation contient des espèces inhibitrices. Cette situation se rencontrant pour la fabrication d'éthanol de deuxième génération, il est primordial d'utiliser des gammes de températures et de pH optimales (Boucher, 2014).

### III.3.5.Influence des paramètres environnementaux sur la croissance des micros organisme

#### III.3.5. 1. Effet de la température(T°)

La température agit sur les vitesses de croissances et de production de métabolites. Plus la température est élevée plus la croissance sera rapide et ce jusqu'à atteindre la température optimale, au-delà de laquelle la vitesse de croissance diminuera. Le choix de la température est donc primordial. La température optimale de croissance pour *Saccharomyces cerevisiae* est

comprise entre de 30 et 33°C. Cela dépend néanmoins des souches, du milieu ainsi que des conditions de culture.

L'augmentation de la température, jusqu'à la température optimale, permet de diminuer le temps de fermentation. Cependant, des températures supérieures à 30°C peuvent avoir pour effets de diminuer la concentration finale en éthanol dans le milieu (Riess, 2012).

### **III.3.5. 2. Effet du pH**

Les différents produits sucriers utilisés dans la fermentation ont un pH et des concentrations en non sucres (différence entre matières sèches et sucre) très variables. Ces derniers déterminent les qualités nutritives du moût mais ont aussi un pouvoir tampon très important. L'acidité se mesure en gramme équivalent d'acide sulfurique par litre de milieu. Plus l'acidité augmente, plus la vitesse de croissance diminue pour devenir nulle à une concentration de 5 g/L exprimée en équivalent acide sulfurique. Les limites de pH reportées dans la littérature pour maintenir une croissance de la levure *Saccharomyces cerevisiae* se situent entre 2,4 et 8,6, avec un pH optimal entre 4 et 4,5 (Riess, 2012).

### **III.3.5. 3. Rôle d'O<sub>2</sub>**

La concentration en oxygène dissous dans le milieu de culture est un paramètre important qui va orienter (en fonction de la souche utilisée, du mode de conduite, ...) le métabolisme du microorganisme considéré. Quelques auteurs ont démontré que la tolérance à l'éthanol peut augmenter notablement lorsqu'on maintient un apport de faibles quantités d'oxygène dans le système (Chniti, 2015).

*Partie*

*Expérimentale*

*Chapitre : IV*

*Matériels et*

*Méthodes*

## IV. Matériels et Méthodes

### IV.1.Introduction

Dans un but de mettre en œuvre des manipulations en vue de produire du bioéthanol à partir de sous-produit du palmier dattier ; des méthodes expérimentales inspirées de travaux antérieurs ont été sélectionnées. Ces méthodes essentielles sont résumées ci-dessous:

- Présentation de l'INRAA la source de la matière utilisée dans ce travail ;
- Les analyses de substrat utilisé;
- Les étapes de production de bioéthanol à partir de la biomasse lignocellulosique;
- L'élaboration du procédé de fermentation et de la méthode d'analyse mettant en évidence ce procédé;
- Distillation alcoolique du produit fermenté à l'objet de récupérer le bioéthanol.

### IV.2.Présentation de la station d'expérimentation agricole d'Adrar (INRAA)

Elle est créée à Adrar en 1951. L'objectif principal était de développer des méthodes d'exploitations des sols salins dans les zones désertiques tout en concevant de meilleures méthodes pour pomper l'eau en grande quantité et à moindre coût. A cet effet, le moteur pneumatique a été installé en 1953 et est considéré comme l'un des trois présents dans le monde. En 1955, des études agricoles ont commencé (plantation de palmeraies et cultures agricoles). La station est dirigée par l'Institut national de la recherche agronomique (INRA) d'Alger depuis 1968. Et c'est devenu une station pilote sous sa tutelle selon le décret n ° 7045 d'avril 1970.

### IV.3.Matériels utilisé

#### IV.3.1.Appareillage

Spectrophotomètre UV visible ;	Balance de précision ;
Spectrophotomètre IR;	Bain marie ;
Bioréacteur en verre ;	Agitateur magnétique RS-1,
Dispositif de distillation ;	Centrifugeuse ;
Broyeur ;	Autoclave (ancien);
Mixeur ;	Pompe à vide;
Etuve type de Memmert ;	Microscope
Four à moufle ;	Pycnomètre ;

### IV.3.2. Produits chimiques et réactifs

Tableau IV.1: Propriétés et caractéristique des produits utilisé

N°	Désignation	Formule chimiques	Etat physique
01	Acide sulfurique 95%	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Liquide
02	Acide acétique	CH <sub>3</sub> COOH	Liquide
03	chlorite de sodium	NaClO <sub>2</sub>	Solide
04	Ethanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	Liquide
05	Glucose	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	Solide
06	Hydroxyde de sodium	NaOH	Liquide
07	Phénol	O <sub>6</sub> H <sub>6</sub> C	Solide
08	Acide chlorhydrique (2N et 1N)	HCl	Liquide

### IV.3.3. Matériel végétal (substrat de la fermentation)

#### 1. Choix du substrat

Ce choix est orienté par leur disponibilité, leur abondance et leur appréciation pour la production de bioéthanol, selon les données de la DSA d'Adrar et l'enquête perspective réalisée sur terrain. Les sous-produits du palmier dattier utilisés, à savoir, palmes sèche, sont récoltés en début de Février 2020, au niveau de l'exploitation agricole de l'INRAA d'Adrar.



Photo IV.1: Palmier dattier  
(INRA- Adrar, 2020)



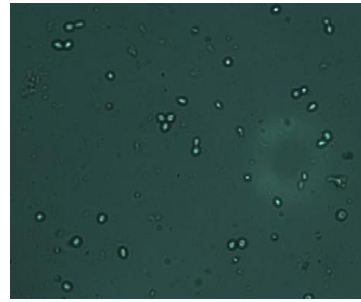
Photo IV.2 : Palmes sèches

#### IV.3.4. Matériel biologique

La levure de boulangerie sèche, *Saccharomyces cerevisiae* est utilisée et conservée dans un endroit frais et sec. Cette souche sert à produire de l'éthanol ( Boulal et *al.*, 2010)



Levure sèche Commerciale)



*Saccharomyces cerevisiae*

**Photo IV.3:** Observation de la cellule de levure (s c) au microscope optique à X400.

#### IV.4. Méthodes :

##### IV.4.1. Le processus de production de bioéthanol

La production du bioéthanol à partir de la biomasse lignocellulosique passe par plusieurs étapes:

1- Broyage ;

2- Dilution ;

3- Le prétraitement est nécessaire pour libérer de la cellulose et l'hémicellulose avant l'hydrolyse ;

4- L'hydrolyse de la cellulose et de l'hémicellulose est réalisée afin de produire des sucres

fermentescibles tels que le glucose, xylose, arabinose, galactose et mannose ;

5. La fermentation des sucres réducteurs ;

##### IV.4.1.1. Préparation du substrat avant la fermentation

###### Broyage

- Les palmes ainsi obtenues, ont été broyées à l'aide d'un moulin à palmier jusqu'à l'obtention d'une poudre en suite elle est broyée par mixeur et cette dernière a été tamisée à l'aide d'un tamis de mailles 0.2mm.





**Figure IV.4:** Broyage des palmes sèches (INRA, Adrar)

#### ✚ Tamisage



**Figure IV.5:** Farine des palmes sèches (0.2mm) (INRA, Adrar)

#### ✚ Préparation des dilutions

La dilution a pour objet la création d'un milieu favorable pour la croissance des microorganismes.

On a préparé quatre flacons en verre, ensuite on a ajouté à chaque flacon, un volume d'eau différent comme suit (400 ml, 500 ml, 600ml et 700ml), puis on a ajouté à chaque flacon 10 g de farine de palme sèche.

**Tableau IV.2:** Diverses dilutions préparées (FPS/eau)

Les dilutions	Dilution (D1)	Dilution (D2)	Dilution (D3)	Dilution (D4)
Préparation (g/mL)	10/400	10/500	10 /600	10/700



**Figure IV.6:** Les quatre (04) dilutions

#### Hydrolyse acide

Le résidu est traité par l'acide sulfurique dans un extracteur à reflux. La concentration de l'acide sulfurique et le temps de traitement ont été optimisés par la méthode de planification des expériences. Les conditions optimales utilisées pour rompre les liaisons osidiques et produire des monomères sont 0.5 % d'acide sulfurique pendant 6h à 100°C ( Eloutassi et *al.*, 2014).



**Photo IV.7:** Hydrolyse acide

#### ✚ Ajustement de pH du moût de chaque dilution

Le pH du moût est ajusté entre 4,5 et 4,7 par l'acide acétique ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ , 1N). Ce pH acide préjudiciable au développement des bactéries s'avère propice à la prolifération des levures.



**Photo IV.8:** Ajustement pH du moût

#### IV.4.1.2. Préparation de l'inoculum

L'inoculum a été obtenu selon le protocole décrit par ( Massengo *et al.*, 2016). La levure est pré-cultivée par l'introduction de 1 g la souche de levure sèche *Saccharomyces cerevisiae* dans 100 ml d'eau distillée, contenant d'une solution de saccharose à 12 % (g), sous agitation continue pendant 90 minutes et à une température de  $30^\circ\text{C} \pm 2$  ( Sabba . *et al.*, 2018).



**Photo IV.9:** Réactivation de la levure

#### IV.4.1.3.Fermentation alcoolique

Après ensemencement du milieu par la levure de boulanger *Saccharomyces cerevisiae* (1 g/L), le bioréacteur est plongé dans un bain-marie où la température est maintenue à  $30 \pm 2$  °C. La fermentation est conduite en anaérobiose pendant 72 heures. Toutefois, la fermentation est favorisée par une agitation due au mouvement des bulles du CO<sub>2</sub> dégagé (Boulal *et al.*, 2010); Afin d'effectuer le suivi de l'évolution de la fermentation, on procède chaque 24h à des prélèvements pour réaliser les analyses physicochimiques . A la fin de chaque temps, le mout est filtré puis distillé afin d'extraire l'éthanol. La température de distillation est de l'ordre de 78°C. (Boulal *et al.*, 2019)

Au cours de la fermentation, nous avons suivi:

- Le pH à l'aide d'un pH mètre;
- Le taux des sucres
- Le degré alcoolique;
- La densité du milieu réactionnel.
- Le taux solides-solubles
- Dénombrement de la levure



**Photo IV.10:** Dispositif expérimental de la fermentation alcoolique

#### IV.4.1.4.Distillation alcoolique

A la fin de la fermentation, le vin de palme obtenu est distillé afin d'extraire le bioéthanol, la température de distillation est de l'ordre de 78°C.



Photo IV.11: distillation.

#### IV.4.1.5.Rectification

La rectification de bioéthanol brut nécessite une deuxième distillation dans les mêmes conditions.

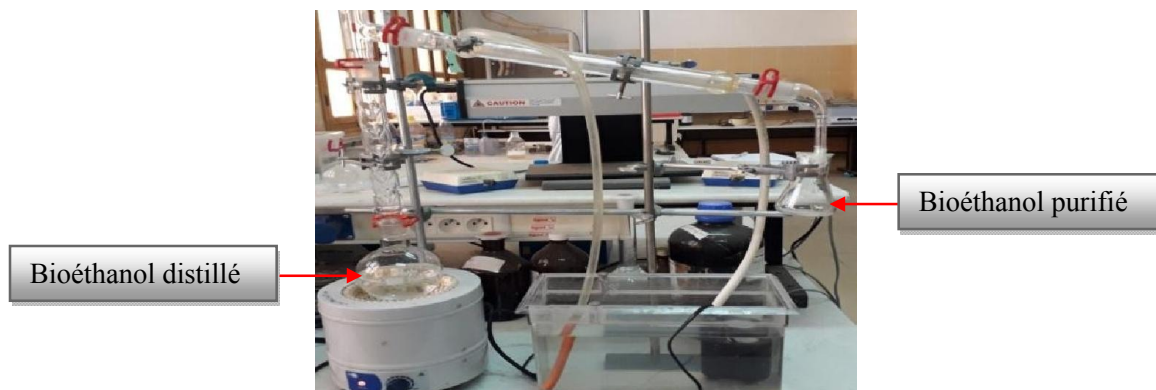


Photo IV.12: Rectification

### IV. 5. Les analyses effectuées

#### IV.5.1.Dosage de la cellulose (WEENDE, NF-V03-040)

Pesée d'un échantillon de 3g.

Ajouter 200ml d'une solution de  $H_2SO_4$  de normalité 0.255N.

Ebullition du mélange à 30 min, avec agitation.

Filtration sous vide.

Le résidu a été placé dans 200 ml de solution NaOH (0.313N).

Ebullition 30 min puis Filtration.

Après la filtration séchez le résidu dans une étuve pendant 2h à 105°C

Peser ( $P_1$ ) à l'aide d'une balance de précision.

Calcinée le résidu à 550 °C dans un four à moufle pendant 5 et 6h.

Repeser ( $P_2$ ).

$$\text{Cellulose (\%)} = \frac{P_1 - P_2}{3} \times 100$$

Montage :



Photo IV.13: Ebullition de l'échantillon



Photo IV.14 : Résidu après calcination

#### IV.5.2. Indice de la lignine (Norme Tappi 222)

Mise à l'étuve d'un creuset n°3 que l'on pèsera très précisément une fois refroidi.

Pesé d'un échantillon de 0.1g de nos échantillons dans un tube à vis.

Ajouter 1.5 ml d'une solution de  $H_2SO_4$  à 72% et laisser agir 2h à 20°C.

Diluer le mélange par l'ajout de 56.2ml d'eau dans le but d'obtenir une solution à 3% massique d'acide sulfurique.

Mettre la solution dans une bouteille résistante aux faibles pressions, veiller à bien récupérer toutes les particules. Pour ce faire, rincer à l'aide de l'eau de la dilution.

Filtrer le mélange sous vide en utilisant le creuset préalablement pesé, laver à l'eau distillée et sécher à l'étuve ventilée.

### Résultat

$$\% \text{lignine} = \frac{\text{Masse du résidu}}{\text{Masse de la prise d'essai}} \times 100 \quad \dots\dots(\text{IV5})$$

Avec :

Masse du résidu = masse du creuset avec résidu – masse du creuset anhydre



Photo IV.15: Suivie de la réaction de la lignine

### IV.5.3. Dosage de l'holocellulose (WEENDE, NF-V03-040)

Le dosage de l'hémicellulose est effectué comme suit :

#### Mode opératoire

- 1-Pesé d'un échantillon de 1g dans un tube à vis en plastique (tube pouvant être fermé).
- 2-Ajouter 32ml d'eau distillée dans le tube à vis.
- 3-Introduire 0.4g de chlorure de sodium ( $\text{NaClO}_2$ ) puis à la pipette 0.2ml d'acide acétique.
- 4-Placer le mélange dans un bain marie à 75°C pendant 1h puis toutes les heures (Figure IV.16) rajouté 0.4g de  $\text{NaClO}_2$  et 0.2 ml d'acide acétique.
- 4-Le solide doit avoir une couleur blanchâtre (Figure IV.18), si ce n'est pas le cas, continuez le traitement.
- 5-Séchez un creuset filtrant n°4 et le peser une fois refroidi.

6-Filtrer le mélange sous vide à l'aide du creuset, une fiole et une pompe à vide (Figure IV.18)

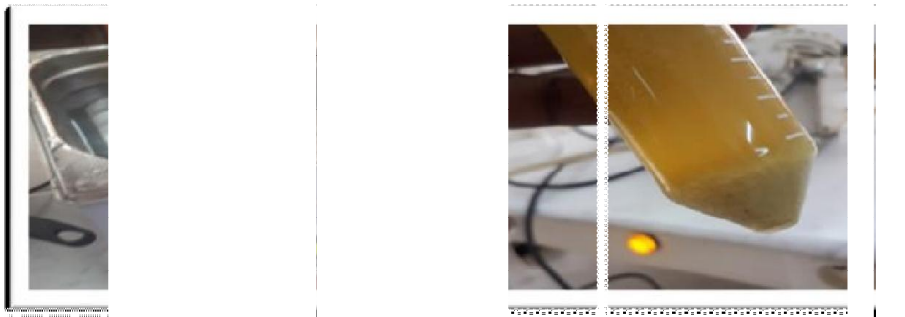
Laver le précipité à l'eau distillée chaude puis sécher le creuset contenant le précipité à l'étuve.

### Résultat

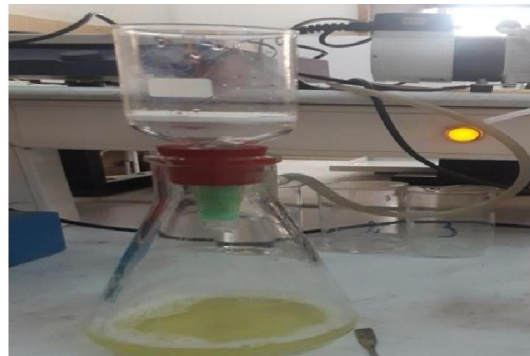
Le résultat s'exprime en pourcentage

$$\%_{\text{holocellulose}} = \frac{\text{masse du précipité sec}}{\text{matériau initial sec}} \dots\dots\dots(6)$$

$$\%_{\text{hémicellulose}} = \%_{\text{holocellulose}} - \%_{\text{cellulose}} \dots\dots\dots(7)$$



**Photo IV.16 :** Suivre de la réaction d'hémicellulose



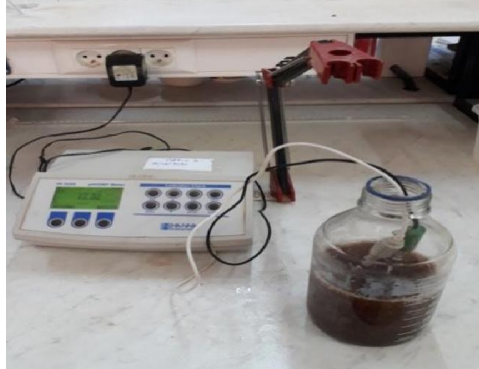
**Photo IV.17:** Filtration du résidu

### IV.5.4.Détermination du pH

La détermination du pH, est essentielle pour le contrôle du goût, avant et au cours de la fermentation. Sa variation nous renseigne sur l'activité métabolique de la levure au cours la



transformation des sucres en alcool. La détermination du pH s'effectue par une lecture directe à l'aide d'un pH-mètre (Marque Hanna) (Boulal, *et al.*, 2010).



**Photo IV.18:** Mesure du pH à l'aide de pH mètre

#### IV.5.5.Détermination de la densité

On appelle densité le rapport du poids d'un certain volume d'un corps déterminé à celui du même volume d'eau pure dans les mêmes conditions de température, on a déterminé la densité de notre prise d'essai à l'aide un pycnomètre (5.556mL) (Boulal, *et al.*, 2019).

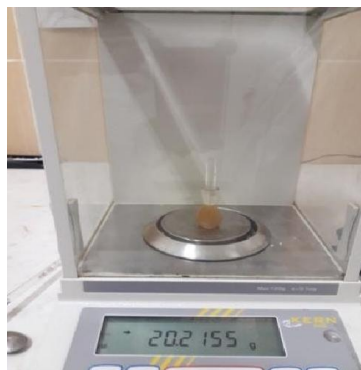
Nous avons pris 10 ml de jus et nous l'avons pesé à l'aide d'une balance électronique de précision. Pour prendre son poids, nous avons répété l'opération plusieurs fois, le rapport masse / volume (m/v) est noté, la moyenne est pris comme résultat final;

$$D=m/v$$

D : La densité en g/mL ;

m : La masse d'échantillon en g ;

v : Le volume du pycnomètre (5.556mL).



**Photo IV.19:** Mesure de la densité à l'aide d'un pycnomètre

**IV.5.6. Dosage des sucres réducteur (Dubois *et al.* 1956)****Principe**

Le dosage des sucres réducteurs est effectué par la méthode de phénol / acide sulfurique introduite par Dubois *et al.* A ce moment là, se forment des chromophores de couleur jaune-orange. Leur apparition est suivie en mesurant l'augmentation de la densité optique à 490 nm. La teneur des sucres est exprimée en µg/ml (converti en grammes/litre) de D (+) glucose à partir d'une courbe d'étalonnage (Boulal *et al.*, 2013)

$$DO=f(C)$$

$$DO=\epsilon * c$$

Avec:

C : Concentration de glycose en g/l.

: Représente la pente de la droite.

DO : Absorbance à 490nm.

**Mode opératoire****Préparation de l'échantillon.**

On a mélangé 1grs de produit (fractionné) avec 300 ml d'eau distillée et 3 grs de bicarbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>), puis le mélange subit un chauffage pendant 30 mn jusqu'à ébullition avec le maintien d'agitation.

Après le refroidissement du mélange, on ajoute l'eau distillée jusqu'à un litre de solution de notre produit et une quantité d'acétate de plomb (défécation).

**1<sup>ère</sup> filtration.**

La première filtration a pour but d'éliminer les protéines par l'acétate de plomb, après cette opération on a ajouté une petite quantité d'oxalate de potassium.

**2<sup>ème</sup> filtration.**

Le but est d'éliminer le plomb précipité par l'oxalate de potassium.

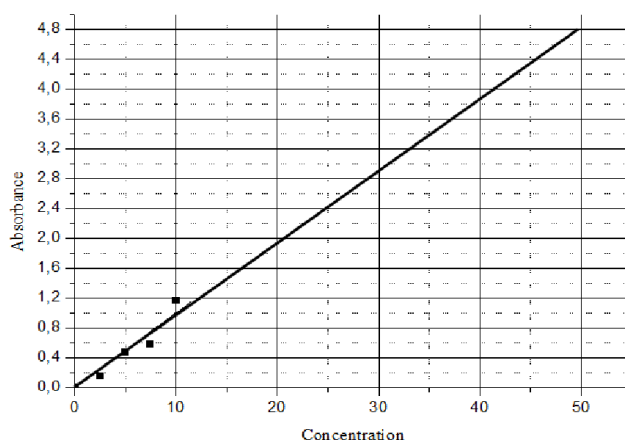
**Parallèlement nous avons effectué une préparation très exacte d'une gamme de dilution**

**Tableau IV.3:** Préparation de la gamme étalons

Numéro de fiole	Témoin	1	2	3	4
Solution étalon de glucose 1 g/l	0 ml	2.5 ml	5 ml	7.5 ml	10 ml
Eau permutée (ml) qsp	100 ml	100 ml	100 ml	100 ml	100 ml
Concentration en glucose mg/l	0 mg/l	25 mg/l	50 mg/l	75 mg/l	100 mg/l

***Dosage.***

Après la filtration on obtient un extrait filtré à partir duquel on a pris 1 ml qu'on mélange à 1ml de phénol (5%) est 5 ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentré avec le maintien de l'agitation rapide, les tube sont maintenus pendant 5 min à 100°C après un séjour de 30 min à l'obscurité puis on a effectué la lecture de la densité optique à 492 nm spectromètre UV-VIS , tenant compte de la valeur lue pour témoin. Se reporter à la courbe d'étalonnage.

**Photo IV.20:** Gamme d'échantillons étalon.**Courbe d'étalonnage****Figure IV.1:** Courbe d'étalonnage de glucose



**Photo IV.21:** Spectromètre UV-Visible

#### **IV.5.7. Détermination du taux de solide soluble (°Brix) (AOAC., 2005).**

##### **Principe**

L'extrait sec soluble est déterminé par réfractomètre. Il mesure la concentration en saccharose d'une solution aqueuse ayant le même indice de réfraction que le produit à analyser. Il est exprimé en pourcentage de masse ou en degré Brix (Boulal *et al.*, 2013).

##### **Mode opératoire**

- Après réglage par l'eau distillée, on place une goutte de moût de la fermentation sur la surface du prisme.
- Abatte le deuxième prisme sur le premier, ce qui permet d'obtenir une couche uniforme de liquide.
- Lecture directe des résultats sur le réfractomètre (type Abbé), l'échelle supérieure sert pour la lecture de l'indice de réfraction et l'échelle inférieure pour la lecture du pourcentage Brix.



**Photo IV.22:** Détermination du taux de solide soluble à l'aide d'un réfractomètre

#### **IV.5.8. Dénombrements cellulaires (Comptage avec des cellules de Malassez (Jeulin - Support Technique, Notice- 713 4041-FR))**

##### **Méthode**

- Passé la culture au vortex pour dissocier les amas cellulaires ;
  - Repérer à l'œil nu le quadrillage sur le centre de la lame ;
  - Recouvrir avec la lamelle; appuyer sur cette lamelle en effectuant des mouvements de va et vient jusqu'à perception d'une résistance et apparition de franges irisées.
  - Remplir le quadrillage par capillarité :
  - Déposer la culture à l'aide d'une pipette pasteur (une goutte) ou une micropipette.
  - Appliquer l'extrémité de la pipette légèrement inclinée sur la plate-forme centrale près de la lamelle. Le liquide s'étend par capillarité et l'exacte quantité vient remplir le quadrillage. Le remplissage doit être rapide et réalisé en une fois, sans débordement dans les rigoles et sans bulles d'air.
  - Laisser les cellules sédimenter 1 à 2 min avant observation ;
  - Observer au microscope :
  - Objectif  $\times 10$  ou  $\times 20$  pour avoir une vue d'ensemble du quadrillage ;
- Vérifier la répartition homogène (si elle est hétérogène, recommencer la mise en cellule);
- Objectif  $\times 40$  repérer un rectangle de Malassez (RM), compter les levures présentes dans ce RM (lui-même subdivisé en 20 petits carrés élémentaires) en déplaçant éventuellement la platine.

Pour chaque rectangle, compter toutes les cellules présentes, carré après carré :

### Remarque

- Choisir une convention pour compter celles qui sont présentes sur les bords (ex. compter celles présentes sur le bord supérieur et sur le bord gauche) pour éviter de les compter 2 fois. Compter les cellules dans 4 rectangles RM au minimum et faire la moyenne de ce résultat.
- Le volume du rectangle RM est de  $1/100 \text{ mm}^3$

### Calcul

Dans un rectangle : si Y est le nombre de cellule comptée (moyenne sur 4 numérations)  
 $Y \times 100 = \text{nombre de cellule /mm}^3$  (à multiplier par le coefficient de dilution)



**Photo IV.23. :** Microscope optique

### IV.5.9 Dosage de degré d'alcool (Boulal, 2017b)

Le dosage de l'alcool au cours de la fermentation est effectué par aérométrie. En général, la méthode consiste à distiller le jus alcoolisé puis à mesurer le degré du distillat à l'aide d'un alcoomètre (gradué de 0 à 100°) à la température ambiante mais dans ce travail nous avons mesuré le degré d'alcool par la méthode de courbe d'étalonnage  $f(^{\circ}) = D$

- 1-Préparer les solutions différents du degré d'alcool par la relation  $C_1 V_1 = C_2 V_2$  ;

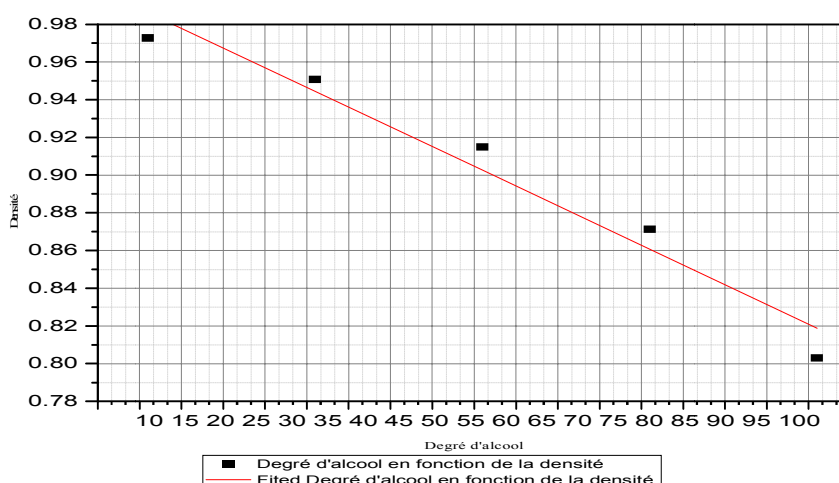
**Tableau IV.4:** Préparation de la gamme étalon (degré alcoolique)

Concentration de l'éthanol (%)	96	86	76	56	36	16
V de l'alcool (96°)	0	22.40	19.79	14.59	9.38	4.17

2- Messer la densité des solutions par le Pycnomètre.

3- Trace la courbe d'étalonnage  $f(^{\circ}) = D$ .

### Courbe d'étalonnage

**Figure IV.2:** Courbe d'étalonnage de degré d'alcool

### IV.5.10. Analyse spectroscopie infrarouge (IR) (Spectromètre FTIR cary660)

#### 1. Principe

La spectroscopie IR est une analyse spectrale qui permet la détermination de type de liaison chimique dans un échantillon donnée.

Le principe du FTIR repose sur l'absorption du rayonnement infrarouge lorsque la longueur d'onde (l'énergie) du faisceau est égale à l'énergie de vibration de la molécule; Le domaine infrarouge entre  $400\text{ cm}^{-1}$  et  $4000\text{ cm}^{-1}$  ( $2,5 - 25\text{ }\mu\text{m}$ ) correspond au domaine d'énergie de vibration de la plupart des molécules (infrarouge moyen) (Gueye, 2016).

*Chapitre : V*

*Résultats et*

*Discussion*



## V. Résultats et Discussion

### V.1. Estimation du tonnage des palmes sèches

En se basant sur le fait que :

- une foliole pèse en moyenne 5 g
- une palme comporte en moyenne 180 folioles
- un palmier dattier donne moyennement 15 palmes par an
  - ⇒ On dénombre vers **3.798,000** de palmiers dattiers dans la région d'Adrar (DSA-Adrar, 2020).
  - ⇒ On peut estimer le tonnage de la partie consommable des palmes sèches de la façon suivante:

$$05 \times 180 = 900\text{g}; \text{ soit } 0.9 \text{ kg / Palme}$$

$$0.9 \times 15 = 13.5 \text{ kg / palmier / an}$$

$$13.5 \times 3, 798,000 = 51, 273,000 \text{ kg.}$$

Soit : 51,273 tonnes de palmes sèches / an.

L'estimation du tonnage annuel de ces sous-produits (palmes sèches) dans la région d'Adrar s'élève donc à **51,273** tonnes/an, quantité tout à fait exploitable quant à la production de bioéthanol. La cellulose est le constituant le plus important (30 à 60 % de la matière sèche) (UIC.2015).

### V. 2. Résultats chimiques et biochimiques des palmes sèches

Les résultats détaillés concernant les caractéristiques chimiques et biochimiques de la poudre sèche des palmes sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau V.1:** Composition biochimique des palmes sèches en (%).

	<b>Lignine</b>	<b>Cellulose brute</b>	<b>Hémicellulose</b>
Avant traitement	20	27,66	23.84
Après traitement	<b>00</b>	0,87	<b>00</b>

Le taux de la cellulose est 27,66 %, la valeur peut être comparée à celle trouvée par (Boulal , et *al.*, 2018) qui est 27,21 et cependant, ce taux est relativement un peu faible comparé à celui rapporté par Chehema , et *al.*, 2001 qui est 30,70, cette valeur est acceptable comparée avec les travaux effectués précédemment.

Le taux de la hémicellulose est 23.84 %, cette valeur peut être comparée à celle trouvée par Chehema et *al.*, 2001 qui est 23,98±2,81.

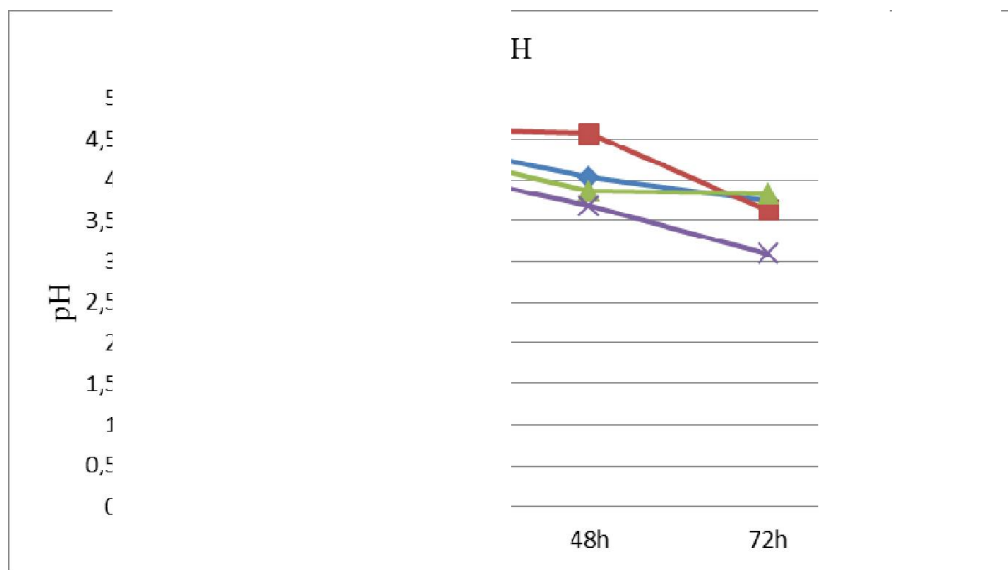
L'indice de la lignine est 20 %, cette valeur peut être comparée à celle trouvée par Chehema et *al.*, 2001 qui est 20,45% .

Ce résultat obtenue peut être comparé à celui rapporté par Boulal ,et *al.*, 2018 qui est 28,59 ,4.09%.

### **V.3. Résultats des analyses au cours de la fermentation alcoolique**

#### **V. 3. 1 Le pH**

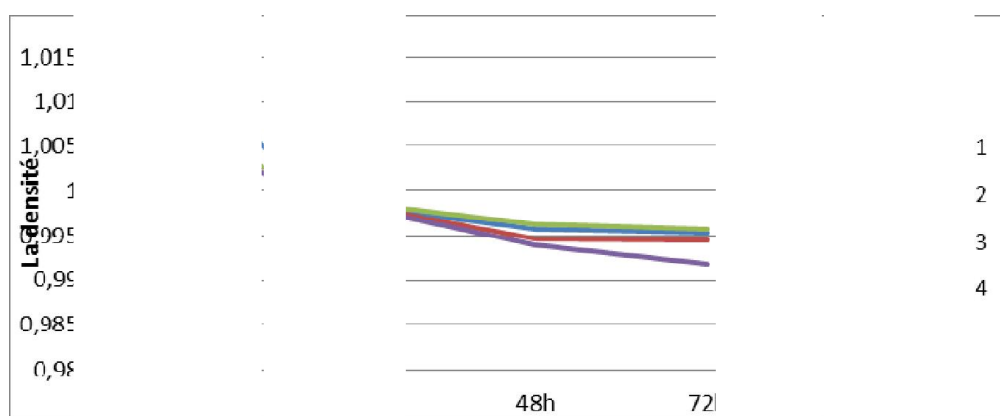
La détermination du pH est essentielle pour le contrôle de l'activité biologique. Le pH du milieu de production est initialement ajusté entre 4,5 et 4,7. Au cours de la fermentation alcoolique, le métabolisme de la levure induit un changement perpétuel du milieu. Ainsi la consommation des substrats carbonés et azotés s'accompagne de la production de métabolites acide ou alcool. La figureV.1 montre une diminution du pH pour les quatre dilutions pendant la fermentation alcoolique; le pH varie de 3.74 à 4.5 pour la D1, 3.62 à 4.69 pour la D2, 3.83 à 4.67 pour la D3 et 3.09 à 4.66 pour la D4. Cet abaissement est probablement dû dans un premier lieu à la diffusion des acides organiques contenus dans le mout de palmes sèches dont les principaux sont l'acide tartrique, l'acide malique et l'acide citrique. Ensuite vient le rôle des acides et alcools métabolisés par la levure présente dans le mout; mais aussi au CO<sub>2</sub> produit qui se dissout dans le milieu et qui contribue à l'acidification du milieu. Nous avons enregistré une diminution de pH pour les deux dilutions D3 et D4 un peu plus que D1 et D2, nous enregistrons une diminution de pH des dilutions D3 et D4 plus que les deux dilutions D1 et D2. Ceci est tout à fait attendu car l'activité métabolique des levures fait abaisser le pH et rend le milieu plus acide (la libération des acides organiques dû à la dégradation des sucres (Boulal, 2020).



**Figure V.1:** Evolution du pH au cours de la fermentation

**V.3.2.La densité**

La figure V.2, représente une diminution remarquable de la densité de moût de palmes sèches pendant la fermentation, pour les quatre dilutions étudiées elle varie de 1.0099 à 0.99954 pour la D1, et de 1.0059 à 0.9945 pour la D2 et de 1.0057 à 0.9957 pour la D3 et de 1.0047 à 0.9918 pour la D4, qui peut être expliquée par la transformation du glucose en alcool et la perte de masse sous forme de CO<sub>2</sub> (Boulal et *al.*, 2016, 2017a).



**Figure V.2:** Evolution de la densité au cours de la fermentation

### V.3.3. Le taux solides solubles (TSS)

La figure V.5 montre la diminution des taux solidos-solubles (TSS) au cours de la fermentation cela est expliqué par la biodégradation des solides solubles (sucre, protéines,...) dans les différentes concentrations préparées et transformées sous forme de molécules simple (éthanol, acide aminé,...). Nous enregistrons une diminution de pH des dilutions D3 et D4 plus que les deux dilutions D1 et D2.

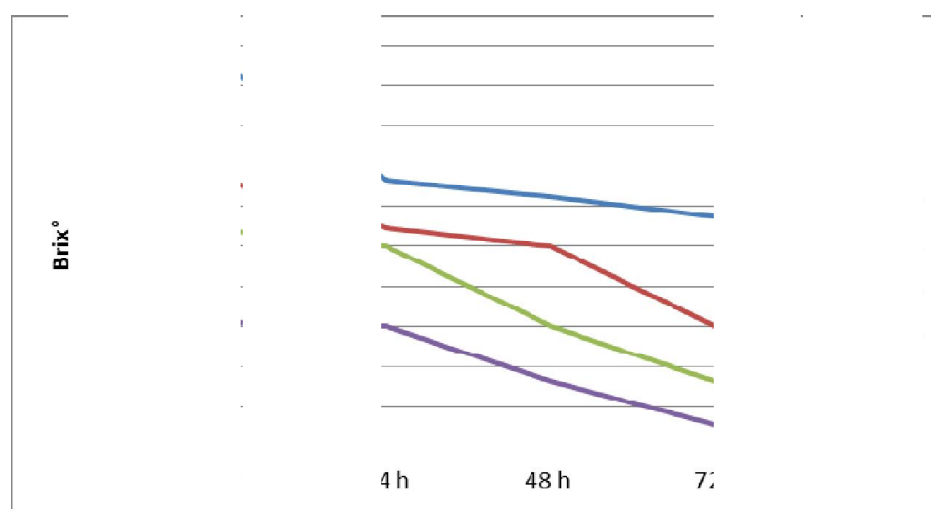


Figure. V.3: Evolution du degré de Brix au cours de la fermentation.

### V.3.4 Sucres réducteurs

En se référant à la courbe d'étalonnage précédemment présentée, les teneurs en sucres réducteurs sont présentées ci-dessous.

Les sucres complexes sont les constituants les plus importants de la matière lignocellulosique, et après l'hydrolyse de l'acide transformé sous forme de sucres simples, et sont également responsables de la douceur de l'aliment. Pour notre cas d'étude, les résultats de la teneur en sucre obtenus sont élevés et sont de l'ordre de 26 %, l'analyse des résultats obtenus montre que le moût des palmiers sèches renferme une quantité très appréciable de sucres, il représente un taux élevé de sucres fermentescibles (Glucose, xylose, ...) directement assimilable par la levure *Saccharomyces cerevisiae*. Enfin, ces analyses de moût des palmiers sèches après le traitement acide (hydrolyse) nous permettent de constater que ce dernier est un milieu de fermentation acceptable.

Nous observons une baisse de teneur en sucres réducteur, passablement importante durant la première 24 heures, et la figure V.6 montre la dégradation remarquable des sucres pour tous les dilutions, et elle est observée surtout à la dilution D4 (16% à 1%) par rapport aux autres dilutions, telle que la teneur en sucres réducteurs qui chute en D1 (26% à 11%), D2 (19% à 12%) et pour D3 (18% à 6%).

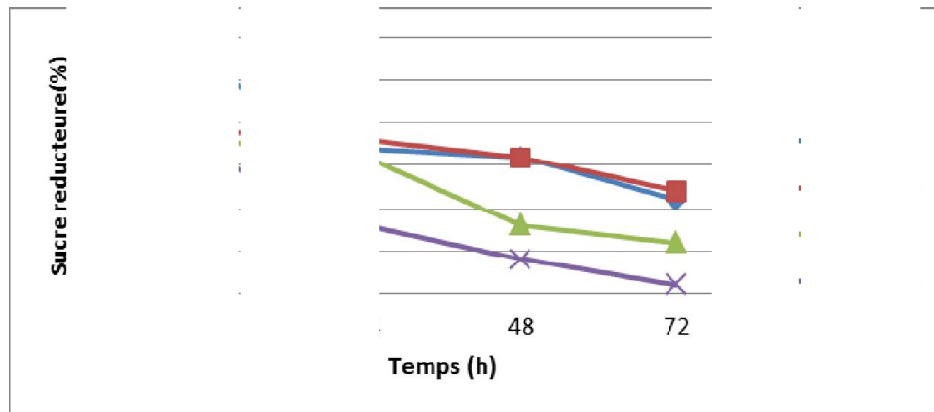


Figure .V.4. Evolution des sucres réducteurs au cours de la fermentation.

### V. 3.5 Dénombrement cellulaire

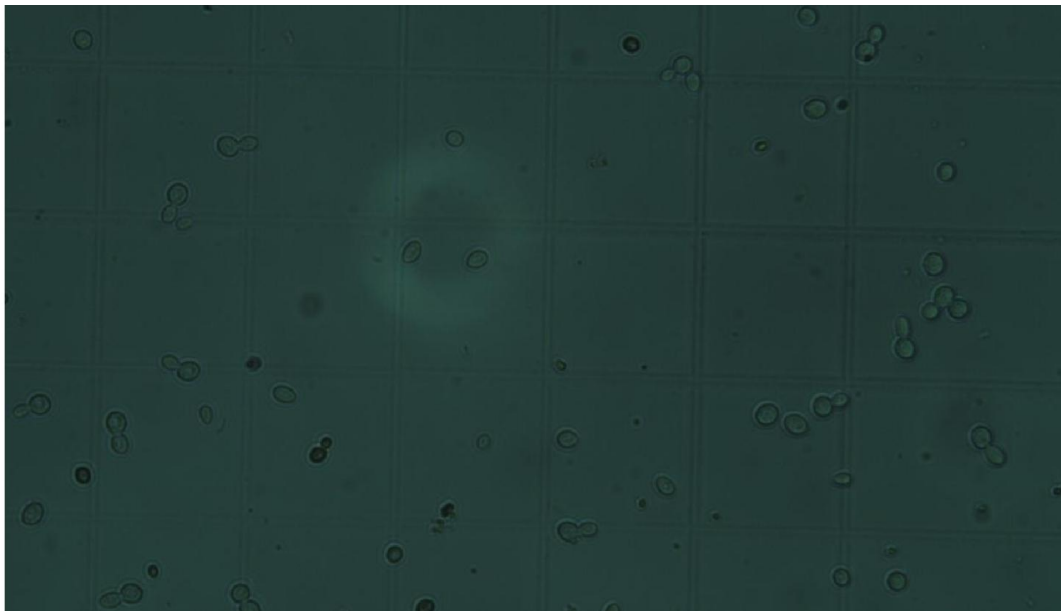
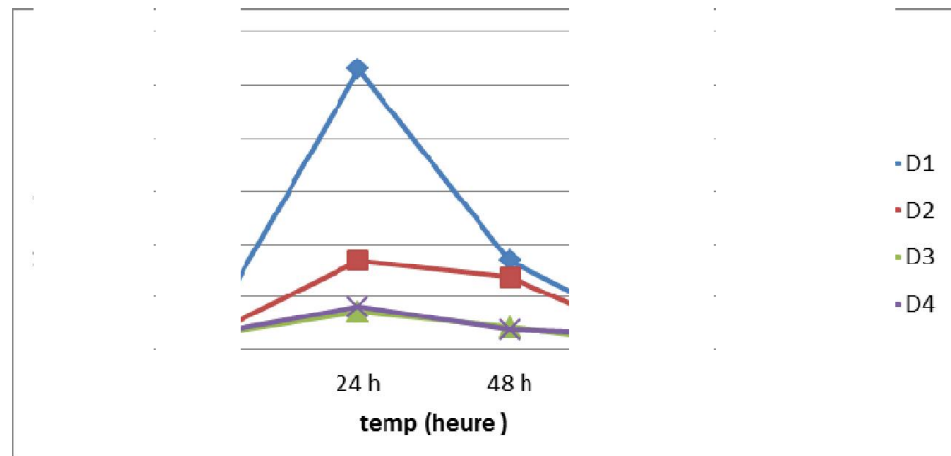


Figure V.5: Aspect morphologique de la souche *S. cerevisiae* au microscope 400X.

Nous avons suivi au microscope l'état d'avancement du dénombrement cellulaire au cours des 72 heures de fermentation, le résultat est présenté par le tableau ci-dessous :

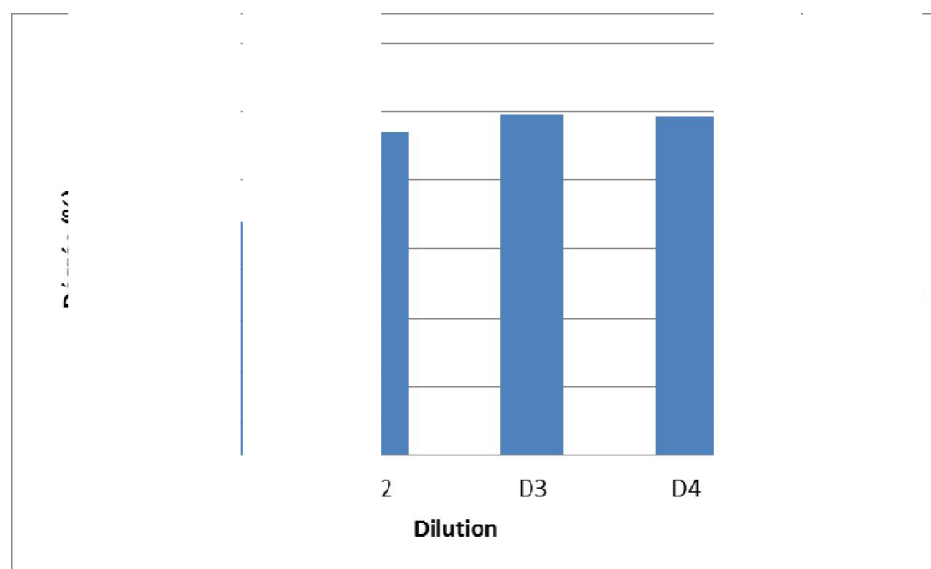


**Figure V. 6 :** Concentration cellulaire en fonction du temps de fermentation

Le processus microbien fait intervenir la consommation de substrat et la formation de biomasse et du produit ainsi qu'un dégagement de chaleur sous forme ATP. Les résultats en nombres cellulaires sont présentés par la figure V.6. La présence des sels nutritifs et protéines dans le milieu de fermentation favorise la bonne multiplication des levures *Saccharomyces cerevisiae*. Nous avons noté une augmentation rapide des nombres des levures pendant les premières 24h et en fin de la fermentation il y a un déclin remarquable expliqué par la pauvreté du milieu de fermentation en éléments nutritifs et sa cumulation des déchets (effet de concentration de l'éthanol produit). Le bon déroulement de la fermentation noté dans les dilutions D3 et D4 par contre les dilutions D1 et D2 donne une bonne augmentation de cellules durant les premières 24h et une forte diminution pendant les dernières 24h.

### V.3.6. Degré alcoolique des dilutions étudiées

La figure suivante présente le degré alcoolique obtenu par la 1<sup>ère</sup> distillation pour les quatre (04) dilutions étudiées (volume de distillat 20 ml).



**Figure V.7:** Degré alcoolique des dilutions étudiées (pour 20ml de distillat)

Le degré alcoolique de bioéthanol obtenu par la fermentation des différentes dilutions en volume constant est D1 : 6.98% ; D2 : 23.49% ; D3 : 24.81% et D4 : 24.57%. Donc la meilleure dilution est la dilution D3.

## V.4. Résultats d'analyse de produit fini

### V.4.1. Caractérisation physico-chimique

Les résultats sont très acceptables. Ils sont présentés dans le Tableau suivant. D'après les comparaisons effectuées, nous pouvons dire que le bioéthanol est un carburant très proche de l'éthanol absolu, au niveau des caractéristiques physicochimique qu'au degré de pureté. De plus, il possède la même odeur.

**Tableau V.2 :** Caractérisation physico-chimique du produit fini.

Paramètres	Bioéthanol	Ethanol commercial 96°
pH	6.4	Neutre
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	0.8435	0.789
Indice de Réfraction (20°C)	1.3615	1.361
Degré de pureté (%)	85	96
Rendement (%)	55	-

#### V.4.2. Spectre Infra Rouge du produit final

L'analyse spectroscopique par infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) est basée sur l'absorption d'énergie dans le domaine spectral infrarouge qui s'étend de 400 à 4000 cm<sup>-1</sup>. Chaque bande d'absorption est associée à un type de groupement fonctionnel (Figure V.8). Les résultats obtenus indiquent que la surface d'éthanol présente de nombreux pics d'absorption correspondant à divers groupements fonctionnels, qui sont souvent responsables des liaisons adsorbant-adsorbat.

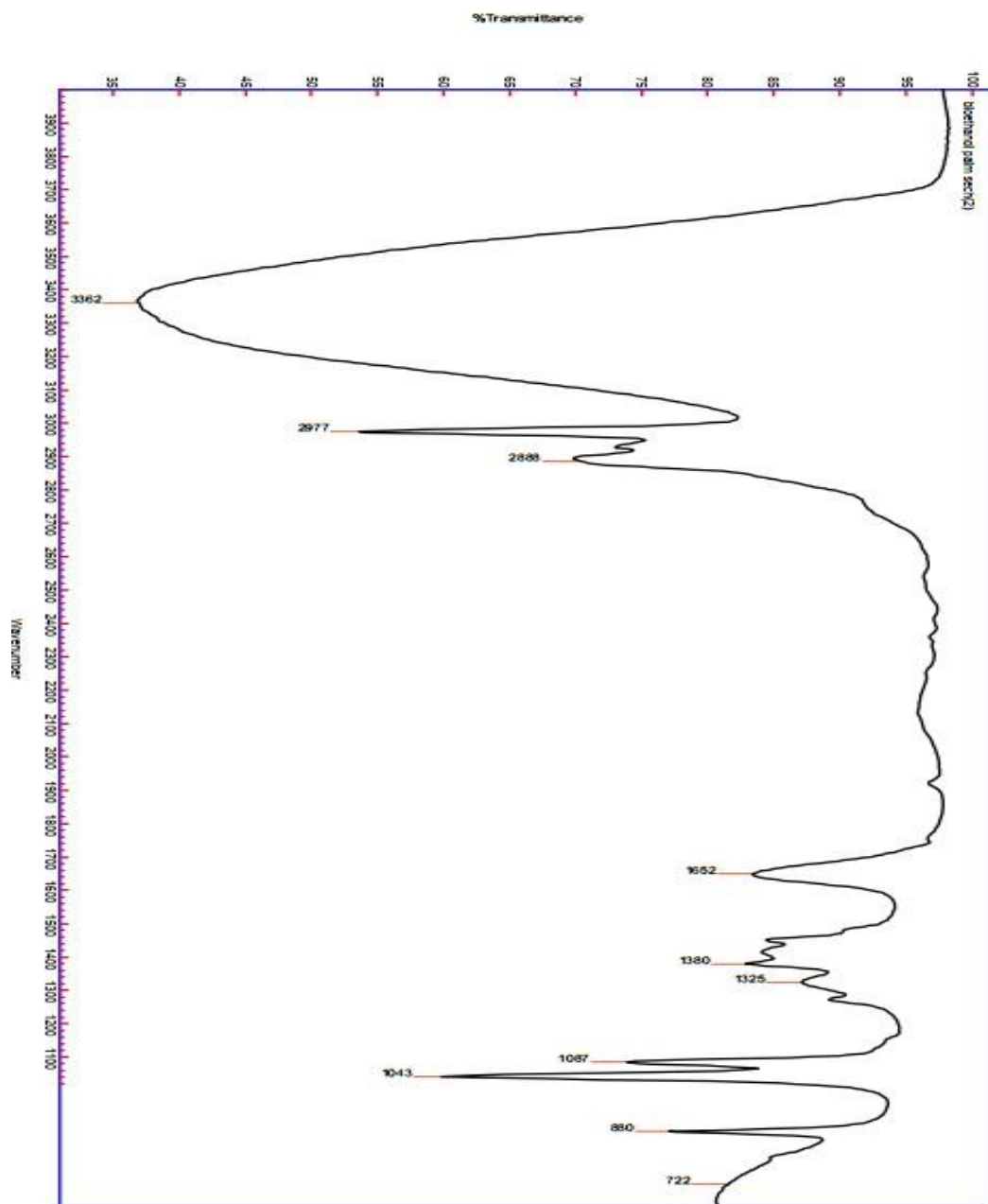
Les vibrations des bandes sont présentées par le Tableau V.3:

**Tableau V.3:** Groupement correspondant à la vibration de valence.

Vibrations des bandes	Composé	Groupement
3362	Alcool	C-OH
2977	Alcane	C-H
2888	Alcane	C-H
1652	Alcool	C-OH
1380	Alcane	C-H
1325	Alcool	C-OH
1087	Alcool	C-OH
1047	Alcool	C-OH
880	Alcool	C-OH

Ces spectres confirment la qualité et la nature du bioéthanol obtenu qui est l'alcool éthylique C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH.





**FigureV.8:** Spectre Infra Rouge du bioéthanol obtenu

### V.5. Caractéristiques générales de bioéthanol obtenu

L'éthanol produit au niveau du laboratoire a les caractéristiques suivantes:

Volatile, inflammable, limpide et possédant une odeur piquante. L'alcoomètre confirme la présence d'éthanol dans la solution.

Ces caractéristiques sont tout à fait semblables à un éthanol commercial.



**Photo V.1 :** L'inflammabilité du bioéthanol

### V.6. Le rendement

Le rendement du bioéthanol est le rapport entre la masse de substrat introduite dans le réacteur de fermentation par le volume de bioéthanol produit. Pour cette étude le rendement de bioéthanol en alcool est de 55 % de (90°). Celui des diverses dilutions D1, D2, D3, D4 est respectivement 37.7%, 52.2%, 55%, 54.4 %.

**Tableau V.4 :** Le rendement des quatre dilutions

Les dilutions	Degré d'alcool (%)	Rendement (%)
D1	3.40	37.7
D2	4.70	52.2
<b>D3</b>	4.96	<b>55</b>
D4	4.91	54.4

Selon le tableau ci-dessus nous concluons que la meilleur dilution est D3: 1g de FPS/60mL d'eau qui donne un rendement de 55% d'alcool, un peu élevé de la D4 et D2 et très élevé de la D1.

*Conclusion*

*et*

*Perspectives*

### Conclusion

Actuellement, on donne un grand intérêt aux biocarburants en raison des coûts élevés des énergies conventionnelles et aux problèmes environnementaux. La biomasse lignocellulosique, considérant sa grande disponibilité et son faible coût, est la plus prometteuse pour la production du bioéthanol.

L'objectif de notre travail est l'optimisation de production de bioéthanol à partir de sous- produit de palmier dattier à savoir : palmes sèches en utilisant le procédé de fermentation en présence de la levure *S. cerevisiae*. Les résultats montrent que la meilleur dilution est la D3 (600ml), elle présente un degré alcoolique de 24,81°, par contre les dilutions suivantes D1 (400ml) et D2 (500 ml) et D4 (700ml) présentent respectivement les degrés alcooliques suivant (16.98%, 23.49%, 24.57%), et après la rectification de bioéthanol obtenu le degré alcoolique a passé à 85°, Les propriétés physiques et chimiques de bioéthanol de palmes sèches sont intéressantes. Ce résultat donne une importance positif parce que le problème posé jusqu'à maintenant pour la production de bioéthanol est la valeur du degré d'alcool très élevé. Ces résultats sont supérieure à ceux obtenues par (Boulal et al. 2018). Les caractéristiques physico- chimiques des produits obtenus sont conformes aux normes internationales, en plus ils présentent l'avantage d'être des produits 100 % bio, respecte l'environnement et ne porte pas atteinte à l'écologie. Pendant la fermentation alcoolique nous avons suivi les paramètres suivants :( la densité de mout ; le pH, la teneur de sucre réducteur et le dénombrement cellulaire) ;

Les palmes séchés sont un substrat très riche en sucre complexe; Il est également considéré comme un matériau essentiel dans le processus de fermentation alcoolique afin d'obtenir un bioéthanol de grande valeur, et l'industrie doit également être développée afin de préserver les régions sahariennes.

### **Perspectives**

Il y a des paramètres et des analyses qui peuvent donner plus d'informations sur ce bioéthanol produit, Par conséquent, des recherches supplémentaires devraient être menées dans ce domaine et sur ces matériaux locaux qui ne sont pas utilisés pour la consommation humaine d'une part et d'autre part d'agrandir ce projet a l'échelle industrielle.

Dans notre travail, nous avons utilisé de l'acide pour l'hydrolyse de sucre complexe en sucre simple. Il existe d'autres méthodes utilisées tel que l'utilisation des microorganismes et des procédés physiques. Des recherches supplémentaires devraient être menées sur ces méthodes, il existe aussi d'autres matériaux locaux qui doivent être utilisés comme matière première pour la production d'éthanol, comme les pédicelles, folioles et pétioles.

*Références*

*Bibliographiques*

### Références bibliographiques

**Absi, R., (2013):** Analyse de la diversité variétale du Palmier Dattier (*Phoenix dactylifera* L.): Cas des Ziban (Région de Sidi Okba). Mémoire de l'obtention du diplôme de magister Université Mohamed Kadir Biskra Alger.

**Achoura, A., (2013):** Contribution à la connaissance des effets des paramètres écologiques oasiens sur les fluctuations des effectifs chez les populations de la cochenille blanche du palmier dattier *Parlatoria blanchardi* Targ.1868, (*Homoptera, Diaspididae*) dans la région de Biskra. Thèse de Doctorat université Mohamad kheider Biskra: Pp, 1-154.

**Aicha, D., (2012):** Hydrolyse enzymatique de la biomasse lignocellulosique. Mémoire présenté à l'Université du Québec à Trois-rivières. université du Québec: Pp, 1-55.

**Amillastre, E., (2012):** Amélioration de la robustesse de souches de levures aux stress technologiques par une stratégie de génie microbiologique. Application à la production industrielle de bioéthanol à partir de matières premières agricoles. Thèse de Doctorat Université de Toulouse : Pp, 271.

**ANFA (2009):** La filière bioéthanol. Dossier créé avec la collaboration du Groupement National pour la Formation Automobile (GNFA). 3ANFA / Édition 2009: Pp, 1-42.  
<http://data0.eclablog.net/ocan/perso/cours%20et%20tp%20en%20ligne/bioethanol.pdf>

**Anuja S., Neeraj K. A. (2020):** Water Hyacinth: A Potential Lignocellulosic Biomass for Bioethanol. Springer Nature Switzerland AG 2020: Pp, 1-106.

**A.O.A.C., 2005.** Official Methods of Analysis of Association Official Analytical. Chemists. 18th.Ed. Washington. D.C USA.  
<http://m.sanitaryindustry.cn/upload/201609/08/201609081049157371.pdf>

**Alexander V. G., Carl E. B., Vladimir I. G. (2012):** Ethanol adsorption on the Si (111) surface: First principles study. The Journal of Chemical Physics .Vol 136. Pp, 114703-1-007411

**Benali B., Djaber A. (2015).** Production du biodiesel à partir d'une plante spontanée (*Ricinus communis* L). Thèse de Master. Université Ahmed Dria-Adrar. date de soutenance: 08 juin 2015 Pp, 60.

**Belaroussi, M., (2019):** Etude de la production du palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) variété Deglet Nour : cas des régions de Oued Mya et Oued Righ. Thèse de doctorat Université Kasdi Merbah Ouargla: 02 / 05 / 2019 : Pp1-137p.

## Références bibliographiques

---

- Benouamane, O., (2015):** Valorisation de quelques dokkars par l'étude de la diversité génétique moyennant les marqueurs morphologiques de l'IPGRI. Mémoire magister Université El hadj Lakdar Batna.
- Boulal, A., Benbrahim Z., Benali B., Ladjel S., (2013):** Etude comparative de rendement de la production d'éthanol de deux variétés de dattes communes de faible valeur commerciale (Tinaceur et Aghmou) de Sud – Ouest de l'Algérie, Revue des Energies Renouvelables Vol. 16 (3): Pp, 539 – 550.
- Boulal, A. Benali B., Moulai M., Touzi A., (2010):** Transformation des déchets de dattes de la région d'Adrar en bioéthanol. Revue des Energies Renouvelables Vol. 13(3):Pp, 455 – 463.
- Boulal, A, Khelafi M., Messaadi A. H., (2019):** Production du bioéthanol à partir des déchets de dattes d'Adrar et Tolga (Biskra) : Etude comparative, Inter. J. Nat. Resour. Env.: Vol. 1(1): Pp, 20-27.
- Boulal A., (2017a):** Contribution à l'étude de la microflore des dattes conservées par des méthodes traditionnelles (Btana), et valorisation des dattes de faible valeur marchande soutenue : Thèse de doctorat. Université d'Oran 1 Ahmed Ben Bella. Soutenue le 28 Juin 2017: Pp, 1-106
- Boulal A., Kihal M., Khelifi Ch., Benali B. (2016):** Bioethanol production from date palm fruit waste fermentation using solar energy. Afr. J. Biotechnol. Vol. 15(30): Pp, 1621-1627.
- Boulal A., Kihal M., Khelifi C. et Karkachi-Gharbi S. (2015).** Improvement of the Physicochemical and Microbiological Quality of the Date's Fruit Product in South Algeria by Adding Rosemary Herb. International Journal of Basic & Applied Sciences IJBAS-IJENS. 15(02): Pp, 41-46.
- Boulal A., Khelafi M., Kaid. K., (2018):** Procèdes expérimentales sur la production de bioéthanol de deuxième génération à partir des sous-produits des palmiers dattiers. The 5th International Seminar on New and Renewable Energies. The 5th International Seminar on New and Renewable Energies. Proceeding 2018.
- Boulal A., 2020: Polycopie de cours:** Microbiologie alimentaire. Université Ahmed Draïa - Adrar. Pp,



## Références bibliographiques

---

**Boulal A., Kihal M. et Khelifi CH. (2017b):** Bioethanol and yeast strain production from common dates. LAMBERT Academic Publishing (LAP). Juin 2017. ISBN 978-3-330-32696-5. [www.get-morebooks.com](http://www.get-morebooks.com).

**Bridier, J., (2011):** Etude de la diversité intraspécifique de l'espèce *Oenococcus oeni* Relation entre variabilité phénotypique et diversité génétique. Thèse de doctorat Université Bordeaux Segalen, thèse n°1881. Soutenue le 12 Décembre 2011: Pp, 1-137.

**CACI; (2017):** Chambre Algérienne de Commerce et d'Industrie. Dattes: plus d'un million de tonnes en Algérie en 2017 dont 3% destinée à l'exportation. Algérie Presse Service (APS). <http://www.aps.dz/economie/64795-datte-plus-d-un-million-de-tonnes-en-algerie-en-2017-dont-3-destinee-a-l-exportation>

**CHAIB H., (2011):** Etudes et conception d'une bioraffinerie pour la production des biocarburants de seconde génération. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Magister. Université Kasdi Merbah Ouargla. Soutenu le : 04/07/2011. Pp, 177.

**Chambon, F.(2011):** Transformation de la cellulose par catalyse hétérogène. These de doctorat université de Lyon: Pp 109.

**Chehma A. et Longo HF., (2001):** Valorisation des Sous-Produits du Palmier Dattier en Vue de leur Utilisation en Alimentation du Bétail. Rev. Energ. Ren. : Production et Valorisation – Biomasse: Pp, 59-64.

**Chehma A., Longo H.F et Boukeur A., (2000):** Estimation du tonnage et valeur alimentaire des sous-produits du palmier dattier chez les ovins. Recherche Agronomique (INRAA), Vol 7: Pp, 7-15.

**CRAAQ (2008):** La production d'éthanol à partir de matière lignocellulosique. Document électronique: Pp, 22. [https://www.craaq.qc.ca/Publications-du-CRAAQ/la-production-d\\_ethanol-a-partir-de-matiere-lignocellulosique/p/PAUT0029](https://www.craaq.qc.ca/Publications-du-CRAAQ/la-production-d_ethanol-a-partir-de-matiere-lignocellulosique/p/PAUT0029).

**Chniti S., (2015):** Optimisation de la bioproduction d'éthanol par valorisation des refus de l'industrie de conditionnement des dattes. Thèse de doctorat. Université Rennes 1, Soutenue le 09-07-2015: Pp 174.

**Daddi bouhoun, M., (2010):** Contribution a l'étude de l'impact de la nappe phréatique et des accumulations gypso-salines sur l'enracinement et la nutrition du palmier dattier dans la

## Références bibliographiques

---

cuvette d'Ouargla (sud est Algérien). Thèse de doctorat Université Badji Mokhtar- Annaba: Pp 223.

**DSA-statistique, (2020):** Direction des Servies Agricoles-Adrar.

**Eloutassi N., Louaste B., Boudine L., Remmal A. (2014):** Valorisation de la biomasse lignocellulosique pour la production de bioéthanol de deuxième génération. Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 (4): Pp, 600 – 609,

**FAO Statistics (2015):** Food, and Agriculture Organization of the United Nations. <http://faostat3.fao.org/home/index.html>.

**Ghobrini , D.J., (2010):** Action des radiations bleues sur le développement des embryons zygotiques du Palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) Cv. Takerboucht cultivés in-vitro. Mémoire magister Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Soutenue en 2010: Pp,1-115.

**Gueye M., (2016):** Caractérisation par infrarouge à transformée de Fourier des réactions chimiques entre post-décharges et précurseurs organosiliciés: cas du 3-aminopropyltriéthoxysilane (APTES). Thèse de doctorat. Université de Lorraine. Soutenue le 04/04/2016: Pp, 1-195.

**Hahn-Hagerdal B., Galbe M., Gorwa-Grauslund M.F., Liden G., Zacchi G., (2006):** Bio-ethanol-the fuel of tomorrow from the residues of today. Trends Biotechnol. Vol 24(12): Pp, 549–556.

**Hetatache, A., (2014):** Modélisation floue de type takagi-sugeno appliquée un bioprocédé. Mémoire magister Université Ferhat Abass- Setife Algerie. Soutenue le: 31/12/2014: Pp,1-56.

**IEA Eisentraut A., (2010):** Sustainable production of second-generation biofuels. Potential and perspectives in major economies and developing countries. International Energy Agency IEA: Pp, 7-202.

([http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/biofuels\\_exec\\_summary.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/biofuels_exec_summary.pdf))

**Isabelle D., Jacqueline D., Philippe T., (2008):** Le bioéthanol de seconde génération: La production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique. Les Presses Agronomiques de Gembloux, A.S.B.L.: Pp11-126. <http://www.pressesagro.be>

- Isabelle D., Jacqueline D., Philippe T., (2010):** La production de bioéthanol à partir de biomasse lignocellulosique. Forêt Wallonne n° 104 – janvier/février 2010: Pp, 39-45. <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/92429/1/didderen%20foret%202010.pdf>
- Jeulin - Support Technique, Notice- 713 441-FR:** Pp, 1-4. [www.jeulin.fr](http://www.jeulin.fr) .
- Kechkar M., Aziza M., (2012):** Le bioéthanol. Revue des Energies Renouvelables SIENR'12 Ghardaïa : Pp, 276 – 279.
- Khiari K., (2016):** Contribution à l'étude des propriétés thermo-physiques des biocarburants de seconde génération et leur influence sur le comportement des moteurs . Thèse de doctorat N° : 2016EMNA0314. Ecole Militaire Polytechnique (EMP). Soutenue le 13 décembre 2016: Pp, 1-131.
- Lara M., Julie R., (2010):** Les biocarburants non conventionnels : quelles opportunités pour la Belgique en 2020. Valorisation de la biomasse ABL (ValBiom): Pp1-36. <https://docplayer.fr/391122-Les-biocarburants-non-conventionnels.html>
- Lucelia A, De Macedo, (2017).** Torréfaction de biomasse lignocellulosique : effet catalytique du potassium sur les espèces condensables. Matériaux. Université de Lorraine, 2017. soutenue publiquement le 15 Décembre 2017: Pp, 1-161
- Luc S. T., (2013).** Etude de la formation de polluants lors de la combustion de carburants oxygénés. Thèse de doctorat. Université de Lorraine. Soutenue le 10/12/2013: Pp, 1-182.
- Liu X., (2015):** Valorisation énergétique de la biomasse lignocellulosique par digestion anaérobie : Prétraitement fongique aérobie. Thèse de doctorat. École doctorale de Chimie de Lyon, Soutenance le 18 décembre 2015: Pp, 1-231.
- Manier M., Vanywaede N., (2010):** Le bioéthanol : une alternative au pétrole?. Etude bibliographique: Ecole des Mines de Douai. Promotion 2010: Pp, 9-53.
- Mehdi-Kacimi M. (2008).** Analyse du secteur de l'éthanol selon les principes du développement durable. M. Env. Centre Universitaire de Formation en Environnement. Université de Sherbrooke. p3.
- Mounir M., Belgri M., Lahnaoui S., Hamouda A., Thonart P., Delvigne F., Ismaili Alaoui M. (2016):** Maîtrise de la fermentation alcoolique sous stress éthanolique, thermique et osmotique de la souche *Saccharomyces cerevisiae* YSDNI en vue de la préparation du vinaigre de fruits. Rev. Mar. Sci. Agron. Vét. Vol 4 (2): Pp, 86-95.

## Références bibliographiques

---

- Ogier J.-C., Leygue J. P., Ballerini D., Pourquoi J., Rigal L., (1999):** Production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique. Revue de l'IFP. Vol. 54 (1): Pp, 67-94.
- Oucif K., Mohammed T. (2017).** Mise en valeur des dérivés de dattes de la région d'Oued Souf pour la production de bioéthanol. Thèse de doctorat. Université Kasdi Merbah Ouargla. Soutenu le: 16/05/2017 :1-81p
- Pierre-André , D (2008):** La fermentation alcoolique et ses filières Brasserie artisanale la Choulette à Hordain, France .Maître Brasseur, Président d'honneur [www.Lachoulette.com](http://www.Lachoulette.com)
- QTF, 2020 :**Quantum Tuning France 2020.\_  
<https://www.quantumtuning.fr/reprogrammation/conversion-bio-ethanol-e85>
- Retima, L. (2015):** Caractérisation morphologique et biochimique de quelque Cultivars du palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) dans la région de Foughala (Wilaya du Biskra). Mémoire magiste. Université el Hadj Lakdar Batna. Soutenu le : 05/12/2015: Pp, 1-102.
- Rezki-bekki, M., (2014):** Production de métabolites par les levures : caractérisation et identification des arômes et des alcools. Thèse de doctorat. Université d'Oran. Soutenu le14/04/2014: Pp, 114.
- Riess j., (2012):** Intensification de la brique « fermentation alcoolique » de substrats betteraviers pour la production d'éthanol: Optimization of ethanol production in high gravity fermentation of sugar beet substrate. Thèse de doctorat . Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse). Université de Toulouse . Soutenance le 09 Novembre 2012: Pp, 1- 154.
- Sabba G.,** Aboubakar , Njintang Y.N., Mbofung C.M.F.(2018): Production du bioéthanol à base de pulpe des fruits de neem (*Azadirachta indica*), Revue des Energies Renouvelables. Vol. 21 (1): Pp, 1 – 10.
- Sadi M., (2012).** Le bioéthanol : une véritable alternative pour une énergie propre. Bulletin de Centre de Développement des Energies Renouvelable (CDER). N° 25
- Saidi A. (2011).** La biomasse lignocellulosique et la bioénergie.Bulletin de Centre de Développement des Energies Renouvelable (CDER). N° 21: Pp, 4-5.
- Sourisse C., (2018):** Biomasse et énergie : Des ressources primaires aux produits énergétiques finaux. Encyclopédie de l'énergie.

## Références bibliographiques

---

<https://www.encyclopedie-energie.org/biomasse-et-energie-des-ressources-primaires-aux-produits-energetiques-finaux/>

**Sanchez O.J., Cardona C.A., (2008):** Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. *Bioresour Technol.* Vol 99: Pp, 5270–5295.

**Sun Y., Cheng J., (2002):** Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresour Technol.* Vol 83(1): Pp, 1–11.

**Wertz J. (2012):** Obtention de lignine et/ou de composés aromatiques dans les bioraffinerieslignocellulosiques, Document ValBiom – Gembloux Agro- Bio Tech.

**Zango O., (2016):** Agro biodiversité et élaboration d'un modèle architectural du palmier dattier au sahel : cas du Niger. Thèse de doctorat. Université de Montpellier et l'Université Abdou Moumouni. Soutenue le 16 Décembre 2016: Pp, 1-146.

### Site Internet

(<https://www.researchg.com>)

[ps://sites.google.com](https://sites.google.com)

[www.alamyimages.fr](http://www.alamyimages.fr)

<https://fr.pinterest.com>

Source: Les biocarburants.\_

<http://genet.univ->

[tours.fr/gen002300/DONNEES/biotechs\\_blanches/Plateforme%20Biocarburants%20-%20Les%20biocarburants.htm](http://tours.fr/gen002300/DONNEES/biotechs_blanches/Plateforme%20Biocarburants%20-%20Les%20biocarburants.htm)

<http://www.thermo-color-bois.fr/process-bois-tht.html>

<http://www.combustibles.fr/biocarburants.html>

<http://biocarburants-parlons-chimie.e-monsite.com/pages/les-biocarburants/troisieme-generation.html>.