

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة محمد خيضر - بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الكيمياء الصناعية

بسكرة في:

إذن بإيداع مذكرة الماستر بعد التصحيحات

أنا الممضي أسفله الأستاذ: بارة عائشة

MCB

الرتبة:

أستاذ مشرف على مذكرة ماستر - للطالب (ة): صالح إيمان

.....

الشعبة: هندسة الطرائق

التخصص: هندسة طرائق وبيئة

..... بعنوان: Production de bioéthanol à partir des déchets de dattes Deglet Nour

.....

.....

أرخص بإيداع المذكرة المذكورة.

رئيس لجنة المناقشة

الأستاذ المشرف



ملحق القرار رقم: 933 المؤرخ في: 20 جويلية 2016

الذي يحدد القواعد المتعلقة بالوقاية من السرقة العلمية ومكافحتها

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

مؤسسة التعليم العالي:

نموذج التصريح الشرفي

خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد: جمال كجي، المعلم، الصفة: طالب، أستاذ باحث، باحث دائم:
الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم: 11538.865 والصادرة بتاريخ: 19-05-2016
المسجل بكلية العلوم والتكنولوجيا قسم الكيمياء الصناعية
و المكلف بإنجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج ، مذكرة ماستر ، مذكرة ماجستير ، أطروحة
دكتوراه)، عنوانها: Production de bioethanol à partir des
déchets de betteraves sucrières

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية ومعايير الأخلاقيات
المهنية والنزاهة الأكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2025/6/25

إمضاء المعني





Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de chimie industrielle

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies

Génie des Procédés

Génie des procédés de l'environnement

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :

SALHI Imene

Le : 03 juin 2025

Production de bioéthanol à partir des déchets de dattes Deglet Nour

Jury :

Dr. ALMI Zineb	MCB	Université de Biskra	Président
Dr. BARA Aicha	MCB	Université de Blida	Encadreur
Dr. SLIMANI Assia	MCB	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2024-2025

Dédicaces

Et dis : Seigneur, accrois mes connaissances

(Coran, 20 :114)

C'est par la grâce d'Allah, le Tout-Puissant, le Dispensateur de savoir, que ce travail a pu être mené à son terme.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mes parents, qu'Allah les préserve et les récompense abondamment pour leurs sacrifices et leur soutien indéfectible. Leur éducation éclair fait de la quête du savoir bien plus qu'une simple obligation académique, mais une véritable voie d'épanouissement personnel et spirituel.

Ma reconnaissance s'étend également :

- À ma famille élargie, pour leur encouragement constant
- À mes amis proches, compagnons d'étude et de réflexion
- tous les mentors qui ont guidé mes pas sur ce chemin

Cette réalisation est autant la leur que la mienne. Puisse le Très-Haut les en rétribuer au centuple.

Quiconque agit avec gratitude, c'est pour son propre bien

(Coran, 31 :12)

Remerciements

"Celui qui ne remercie pas les gens ne remercie pas Allah."

Le Prophète Mohammed (paix et bénédictions sur lui) a dit : « Celui à qui l'on fait un bienfait, qu'il le récompense ; s'il ne trouve rien avec quoi le récompenser, qu'il invoque pour lui jusqu'à ce qu'il pense l'avoir suffisamment récompensé. »

À la fin de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à ma directrice de mémoire, Madame Bara Aïcha, pour son accompagnement tout au long de la réalisation de ce travail, pour ses conseils précieux, ainsi que pour sa patience et les efforts qu'elle a déployés à mon égard. Qu'Allah la récompense pleinement.

J'adresse également mes sincères remerciements aux membres du jury, en particulier Madame ALMI Zineb, présidente du jury, et Madame SLIMANI Assia, examinatrice, pour l'honneur qu'elles me font en acceptant d'évaluer ce mémoire et pour l'intérêt qu'elles portent à mon travail.

Je n'oublie pas de remercier les ingénieurs du laboratoire pour leur soutien technique et leur assistance lors de la phase expérimentale. Mes remerciements s'adressent aussi à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à mon parcours universitaire depuis la première année : le personnel administratif, les enseignants, en particulier ceux qui ont toujours partagé avec générosité leur savoir et leur expertise.

Louange à Allah, Seigneur de l'univers

Résumé

Cette étude vise à produire du bioéthanol à partir de déchets de dattes de la variété *Deglet Nour*, en optimisant les conditions de préparation et de fermentation afin d'amorer le rendement et la pureté du produit. Deux étapes principales ont été menées : l'extraction du jus sucré et la fermentation microbienne. Lors de la première phase, six méthodes d'extraction ont été comparées. Le meilleur rendement a été obtenu en broyant 1 kg de dattes avec 2 L d'eau, suivi d'un chauffage à 65°C sous agitation continue, permettant une extraction maximale des sucres.

Dans la phase de fermentation, l'effet de deux paramètres clés a été évalué : le pH et la concentration du jus. Les résultats ont montré que le pH optimal est de 5,5, avec une production maximale de 55,19 mL de bioéthanol pour 333,33 g de dattes. Par ailleurs, une concentration de 1 kg de dattes dans 3 L d'eau a permis d'obtenir un rendement élevé de 54,13 mL pour la même masse.

La distillation fractionnée a permis d'atteindre une pureté d'environ 90 % après une seule opération, surpassant ainsi la distillation simple. Pour évaluer la qualité du bioéthanol obtenu, des analyses spectroscopiques UV-Visible et infrarouge (FTIR) ont été réalisées, en plus de la mesure de la densité et de l'indice de réfraction. Ces résultats ont révélé une correspondance satisfaisante avec l'éthanol commercial titrant à 96 %.

Mots-clés : bioéthanol, dattes de la variété *Deglet Nour*, fermentation, distillation fractionnée, analyse spectroscopique.

Abstract

This study aims to produce bioethanol from waste dates of the *Deglet Nour* variety by optimizing preparation and fermentation conditions to improve both yield and purity. The experimental work was divided into two main phases : extraction of the date juice and microbial fermentation. In the first phase, six extraction methods were evaluated. The highest sugar yield was achieved by grinding 1 kg of dates with 2 L of water, followed by heating at 65 °C under continuous stirring, which enabled efficient sugar extraction. During fermentation, the effects of two critical parameters were studied : pH and juice concentration. The optimal pH was found to be 5.5, resulting in a maximum ethanol yield of 55.19 mL per 333.33 g of dates. Additionally, using 1 kg of dates in 3 L of water gave a yield of 54.13 mL, confirming the influence of concentration. The bioethanol was then purified using fractional distillation, achieving a purity level of around 90 % after a single distillation, outperforming simple distillation. To verify product quality, UV-Visible and FTIR spectroscopic analyses were carried out, along with density and refractive index measurements. The results showed good agreement with commercial ethanol of 96 % purity.

keywords :bioethanol, dates of *Deglet Nour*, fermentation, fractional distillation, spectroscopic analysis. lds.

ملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى إنتاج الإيثانول الحيوي انطلاقاً من نفايات تمر «دقلة نور»، وذلك من خلال تحسين ظروف التحضير والتخمير بهدف رفع كفاءة الإنتاج. شملت المنهجية مرحلتين أساسيتين: استخلاص العصير السكري من التمر، ثم إجراء التخمير الميكروبي باستخدام الخميرة. خلال مرحلة الاستخلاص، تم تقييم ست طرق مختلفة، وتبين أن أفضل مردود سُجِّل عند طحن 1 كغ من التمر مع 2 لتر من الماء، مع تسخين المزيج إلى 65°م والتحرك المستمر، ما سمح باستخلاص أعلى كمية من السكريات. أما في مرحلة التخمير، فقد تمت دراسة تأثير كل من درجة الحموضة وتركيز العصير، حيث أظهرت النتائج أن الأس الهيدروجيني الأمثل هو 5.5، محققاً إنتاجية بلغت 55.19 مل من الإيثانول لكل 333.33 غ من التمر، في حين سجلت أفضل نتيجة من حيث التركيز عند تخمير 1 كغ من التمر في 3 لترات ماء، بمردود قدره 54.13 مل. تم بعد ذلك تنقية الإيثانول المستخلص بالتقطير التجزيئي، مما أتاح الوصول إلى درجة نقاوة تقارب 90% بعد عملية تقطير واحدة، متفوقة بذلك على نتائج التقطير البسيط. ولتقييم جودة الإيثانول المنتج، تم إجراء تحاليل باستخدام تقنيتي UV-Vis و FTIR، إلى جانب قياسات الكثافة ومعامل الانكسار، وأظهرت النتائج تطابقاً مقبولاً مع خصائص الإيثانول التجاري بنسبة نقاوة 96%.

الكلمات المفتاحية:

الإيثانول الحيوي، تمر دقلة نور، التخمير، التقطير التجزيئي، التحليل الطيفي.

Table des Matières

Table des Matières	I
Liste des Figures	IV
Liste des Tableaux	VI
Nomenclature	VII
Introduction générale	1
I Généralité sur les dattes	4
I.1 Introduction	5
I.2 Les dattes	5
I.2.1 Définition des dattes	5
I.2.2 Production des dattes en Algérie	5
I.2.3 Principales variétés de dattes en Algérie	6
I.2.4 Classification des dattes	7
I.2.5 Utilisations des dattes	8
I.3 Technologie de la datte	8
I.4 Datte <i>Deglet Nour</i>	9
I.4.1 Définition de la datte <i>Deglet Nour</i>	9
I.4.2 Répartition de la production de la <i>Deglet Nour</i>	10
I.4.3 Composition de la <i>Deglet Nour</i>	10
I.5 Déchets de dattes	11
I.5.1 Définition	11
I.5.2 Valorisation des déchets de dattes	11
I.5.2.1 Vinaigre de dattes :	11
I.5.2.2 Biomasse et protéines d'organismes unicellulaires :	12
I.5.2.3 Alimentation animale :	12
I.5.2.4 Production de bioéthanol :	12
I.6 Conclusion	12

II	Procédé de production de bioéthanol	13
II.1	Introduction	14
II.2	Bioéthanol	14
II.2.1	Généralités sur le bioéthanol	14
II.2.2	Propriétés physico-chimiques du bioéthanol	14
II.2.3	Différentes générations de bioéthanol.....	15
II.2.3.1	Bioéthanol de première génération	15
II.2.3.2	Bioéthanol de deuxième génération.....	16
II.2.3.3	Bioéthanol de troisième génération	17
II.2.4	Production de bioéthanol.....	19
II.2.4.1	Production de bioéthanol à l'échelle mondiale	19
II.2.5	Avantages et inconvénients du bioéthanol	20
II.2.6	Applications du bioéthanol	21
II.2.7	Diagramme de fabrication du bioéthanol.....	22
II.3	Fermentation alcoolique	23
II.3.1	Procédés de fermentation alcoolique	23
II.3.1.1	Fermentation en mode batch	24
II.3.1.2	Fermentation en mode fed-batch.....	24
II.3.1.3	Fermentation en mode continu	24
II.3.2	La levure <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	25
II.3.2.1	Définition	25
II.3.2.2	Taxonomie.....	25
II.3.2.3	Morphologie cellulaire de la levure	25
II.3.2.4	Pourquoi utiliser <i>S. cerevisiae</i> ?	25
II.4	Distillation fractionnée	26
II.4.1	Généralités sur la distillation fractionnée	26
II.4.2	Colonne de Vigreux	27
II.4.3	Étapes de la distillation fractionnée	27
II.4.4	Avantages et inconvénients	27
II.4.4.1	Les avantages	27
II.4.4.2	Les inconvénients.....	28
II.5	Conclusion	28
III	Matériel et méthodes	29
III.1	Introduction	30
III.2	Matériels expérimentaux	30
III.2.1	Matières biologiques utilisées.....	30
III.2.2	Produits chimiques utilisés	31

III.2.3 Équipements et instruments	31
III.3 Méthodologie de production expérimentale de bioéthanol	34
III.3.1 L'extraction des sucres à partir des dattes	35
III.3.1.1 Effet du broyage	35
III.3.1.2 Effet de la température	35
III.3.1.3 Effet du mode d'agitation.....	35
III.3.1.4 Effet du volume d'eau	35
III.3.2 Fermentation alcoolique.....	36
III.3.3 Montage des bioréacteurs	37
III.3.4 Suivi de la fermentation	38
III.3.5 Distillation fractionnée	38
IV Résultats et discussion	39
IV.1 Introduction	40
IV.2 L'extraction des sucres à partir des dattes	40
IV.2.1 Effet du broyage.....	40
IV.2.2 Effet de la température.....	42
IV.2.3 Effet du mode d'agitation	43
IV.2.4 Effet du volume d'eau	44
IV.3 Étude des conditions de fermentation alcoolique	45
IV.3.1 Effet du pH du milieu	45
IV.3.2 Effet de la concentration du jus.....	46
IV.4 Caractérisation du bioéthanol obtenu.....	47
IV.4.1 Analyse infrarouge FTIR.....	47
IV.4.2 Analyse spectrale UV-Visible	49
IV.4.3 Mesure de la densité et comparaison avec l'éthanol commercial	50
IV.4.4 Indice de réfraction	50
IV.5 Conclusion	51
Conclusion générale et perspectives	52
Références Bibliographiques	54

Liste des Figures

I.1	Schéma des différentes parties de la datte	6
I.2	Dattes de variété Deglet Nour	9
I.3	Répartition de la production de la Deglet Nour dans les wilayas (2010-2019) ..	10
II.1	Molécule de l'éthanol.....	15
II.2	Étapes de préparation du bioéthanol à partir des ressources amylacées.	16
II.3	Schéma de la provenance des fibres ligno-hémicellulosiques.	17
II.4	Procédé de production de bioéthanol à partir de la biomasse.	18
II.5	Volume de production de bioéthanol dans le monde en 2023, selon les pays (en millions de gallons).	19
II.6	Schéma illustrant le cycle fermé du carbone dans la production et l'utilisation du bioéthanol.	20
II.7	Diagramme de fabrication du bioéthanol.	23
II.8	Réaction de conversion du sucre en bioéthanol	24
II.9	La levure <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	26
II.10	a) Montage de distillation fractionnée, b) Gros plan sur la colonne de fraction- nement pendant la distillation, montrant la condensation s'égouttant depuis les indentations en verre.	26
III.1	Variétés de dattes utilisées	30
III.2	Levure boulangère <i>Saccharomyces cerevisiae</i> utilisée dans l'expérience.....	31
III.3	Réfractomètre utilisé pour la mesure de la concentration en sucres dans les jus de dattes.	32
III.4	Étuve utilisée pour incuber les échantillons à température constante.	33
III.5	Spectrophotomètre UV-Vis utilisé pour analyser le spectre du bioéthanol.	33
III.6	pH-mètre utilisé pour contrôler l'acidité du milieu de fermentation.	34
III.7	Spectrophotomètre FTIR utilisé pour analyser la structure moléculaire du produit final.	34
III.8	Étapes de préparation du jus de dattes : (a) broyage des fruits et (b) résidus après filtration.	36
III.9	Vin de dattes obtenu après fermentation	36

III.10	Résidus solides (lie) issus de la fermentation	37
III.11	Montage des bioréacteurs de fermentation	38
III.12	Montage de distillation fractionnée pour la récupération de l'éthanol.....	38
IV.1	Évolution de la concentration en sucres selon le mode de découpe.	41
IV.2	Influence de la température sur l'extraction des sucres.....	42
IV.3	Effet du mode d'agitation sur la concentration en sucres.	43
IV.4	Influence du volume d'eau sur l'extraction des sucres.	44
IV.5	Quantité d'éthanol produite selon le pH du milieu de fermentation	46
IV.6	Influence de la concentration du jus sur la production d'éthanol	46
IV.7	Spectre FTIR de l'échantillon (pH = 4 ; 1kg dattes / 3L eau).	47
IV.8	Spectre FTIR de l'échantillon 3 (pH = 5.5 ; 1kg dattes / 3L eau).	48
IV.9	Spectre FTIR de l'éthanol commercial (pureté 96 %).	48
IV.10	Spectres UV-Visible comparatifs des échantillons de bioéthanol à différents pH et de l'éthanol commercial (96 %).....	49

Liste des Tableaux

I.1	Production des dattes en Algérie (2010–2019).....	6
I.2	Principales variétés de dattes en Algérie et leurs propriétés.....	7
I.3	Classification des dattes selon leur consistance.	8
I.4	Composition biochimique de la datte Deglet Nour.	11
I.5	Teneur en sels minéraux dans les dattes Deglet Nour (pour 100 g).	11
II.1	Propriétés physico-chimiques du bioéthanol.....	15
II.2	Avantages et inconvénients du bioéthanol.	21
III.1	Produits chimiques utilisés lors de la production du bioéthanol.	31
III.2	Appareils utilisés pour le procédé de production du bioéthanol.....	32
IV.1	Évolution de l'indice de réfraction avec broyage	40
IV.2	Évolution de l'indice de réfraction sans broyage	41
IV.3	Paramètres d'extraction à T=65 °C.....	42
IV.4	Paramètres d'extraction à température ambiante	42
IV.5	Résultats avec agitation continue	43
IV.6	Résultats sans agitation	43
IV.7	Variation de l'indice de réfraction du jus de dattes (1kg de dattes dans 2L d'eau)	44
IV.8	Variation de l'indice de réfraction du jus de dattes (1kg de dattes dans 4L d'eau)	44
IV.9	Comparaison des densités mesurées à 34 °C, corrigées à 20 °C et estimation de la teneur en éthanol.....	50
IV.10	Mesures de l'indice de réfraction des différentes solutions analysées	50

Liste des abréviations

DN	Deglet Nour
Gh	Ghars
DB	Degla Beida
MADR	Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural
EtOH	Éthanol (alcool éthylique)
C₂H₅OH	Formule chimique de l'éthanol
RON	(Research Octane Number)
MON	(Motor Octane Number)
E5, E10, E15,E95 ,E100	Carburant contenant x % d'éthanol et (100 - x)% d'essence
E85G, E10G	85 % éthanol + 15 % essence
E95D	E95D : 95 % d'éthanol + 5 % d'additifs pour moteurs Diesel
FTIR	Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier
UV-VIS	ultraviolet-visible
µm	Micromètre
CO₂	Dioxyde de carbone
NaCl	Chlorure de sodium
KOH	Hydroxyde de potassium
H₃PO₄	Acide phosphorique
K₂SO₄	Sulfate de potassium
MgSO₄·7H₂O	Sulfate de magnésium heptahydraté
CaCl₂·2H₂O	Chlorure de calcium dihydraté
NaOH	Hydroxyde de sodium
HCl	Acide chlorhydrique

Introduction générale

Introduction générale

L'Algérie figure parmi les plus grands producteurs de dattes au monde, occupant le quatrième rang selon les statistiques de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), avec une production annuelle dépassant 1,19 million de tonnes. La variété « Deglet Nour » domine les exportations nationales avec plus de 615 000 tonnes par an, représentant un produit agricole stratégique pour l'économie nationale. En 2022, les exportations algériennes de dattes ont atteint environ 54 000 tonnes, pour une valeur avoisinant les 49 millions de dollars, à destination de 64 pays [1]

Cependant, cette croissance de la production s'accompagne de la génération de grandes quantités de déchets, notamment les dattes impropres à la consommation, telles que celles tombées au sol, déformées ou de qualité inférieure, non commercialisables. Ces rebuts représentent un enjeu environnemental important, faute de mécanismes efficaces de valorisation.

Dans ce contexte, la « technologie des dattes » a émergé comme une approche prometteuse. Elle regroupe un ensemble de procédés biologiques et industriels visant à transformer ces déchets en produits à forte valeur ajoutée tels que le sucre de dattes, le vinaigre, les aliments pour animaux ou encore le bioéthanol. Ce dernier suscite un intérêt croissant en raison de ses applications variées dans les industries pharmaceutique, cosmétique, agroalimentaire et énergétique.

Il est à noter que l'Algérie importe chaque année plus de 15 millions de litres d'éthanol [2], ce qui constitue un fardeau économique important pouvant être allégé par une production locale basée sur la valorisation des déchets agricoles, notamment ceux issus de la filière phoenicicole.

La fermentation alcoolique représente l'étape clé dans la production du bioéthanol, reposant sur la transformation des sucres en alcool par l'action de levures, en milieu anaérobie. La levure *Saccharomyces cerevisiae* est considérée comme l'un des micro-organismes les plus efficaces en raison de sa haute tolérance aux concentrations sucrées et de sa capacité de production d'éthanol, tout en étant disponible à faible coût.

La distillation fractionnée permet ensuite d'isoler l'éthanol obtenu, avec un meilleur rendement que la distillation simple, grâce à l'usage d'une colonne à fractionnement, garantissant une séparation plus efficace et une pureté élevée du produit final [3].

Ce mémoire vise la production de bioéthanol à partir de déchets de dattes de la variété *Deglet Nour*. Il se compose de quatre chapitres :

- Chapitre 1 : Présentation générale de la datte, ses variétés, sa production et sa composition chimique.
- Chapitre 2 : Étude du processus de production du bioéthanol, incluant :
 - Les propriétés physico-chimiques du bioéthanol ;

- La fermentation alcoolique et ses types ;
- La distillation fractionnée : définitions, étapes, avantages et inconvénients.
- Chapitre 3 : Matériels et méthodes (préparation du jus, fermentation, distillation).
- Chapitre 4 : Discussion des résultats expérimentaux (fermentation, spectres UV et IR, densité, indice de réfraction, etc.).

Généralité sur les dattes

Sommaire

I.1	Introduction	5
I.2	Les dattes	5
I.2.1	Définition des dattes	5
I.2.2	Production des dattes en Algérie	5
I.2.3	Principales variétés de dattes en Algérie	6
I.2.4	Classification des dattes	7
I.2.5	Utilisations des dattes	8
I.3	Technologie de la datte	8
I.4	Datte <i>Deglet Nour</i>	9
I.4.1	Définition de la datte <i>Deglet Nour</i>	9
I.4.2	Répartition de la production de la <i>Deglet Nour</i>	10
I.4.3	Composition de la <i>Deglet Nour</i>	10
I.5	Déchets de dattes	11
I.5.1	Définition	11
I.5.2	Valorisation des déchets de dattes	11
I.6	Conclusion	12

I.1 Introduction

Les dattes, fruits emblématiques du palmier dattier (*Phoenix dactylifera*), occupent une place centrale dans l'agriculture et l'alimentation des régions arides et semi-arides du monde. En Algérie, elles représentent bien plus qu'un simple produit agricole : elles sont un pilier de l'économie saharienne, un héritage culturel, et un aliment aux multiples vertus nutritionnelles et médicinales.

Le présent chapitre s'attache à explorer l'univers riche et varié des dattes, en abordant leur définition, leur production nationale, les principales variétés existantes, ainsi que leur classification selon la consistance. Il met également en lumière les différentes utilisations possibles de ce fruit, notamment dans l'agroalimentaire, la pharmacopée traditionnelle, et les valorisations industrielles de ses sous-produits.

Une attention particulière est portée à la variété prestigieuse Deglet Nour, fierté nationale à la renommée internationale. Ce chapitre vise ainsi à offrir une compréhension globale des dattes, de leur culture à leur transformation, soulignant leur potentiel économique, environnemental et social.

I.2 Les dattes

I.2.1 Définition des dattes

Les dattes sont les fruits du palmier dattier, originaire du Moyen-Orient, bien qu'elles soient également cultivées dans les régions méditerranéennes, en Asie, aux États-Unis et au Mexique. À maturité, la peau des dattes devient brune et se ride à mesure que l'humidité s'évapore [4]. La datte est une baie, généralement de forme ovale ou ronde. Chaque fruit contient un noyau solide entouré de pulpe, partie comestible du fruit, savoureuse et nutritive. Les dimensions des dattes varient de 2 à 8 cm de longueur, et leur poids oscille entre 2 et 8 grammes selon les variétés. Leur couleur peut aller du blanc jaunâtre au noir, en passant par des teintes ambrées, rouges ou brunes, plus ou moins foncées [5].

Le fruit du palmier dattier est généralement composé de parties fixes, indépendantes de la variété. Ces différentes parties sont détaillées dans la figure I.1.

I.2.2 Production des dattes en Algérie

L'Algérie se classe au quatrième rang mondial en matière de production de dattes, avec un volume annuel dépassant un million de tonnes. Ce chiffre représente plus de 10 % de la production mondiale, estimée à environ 10 millions de tonnes. Il est à noter que la production

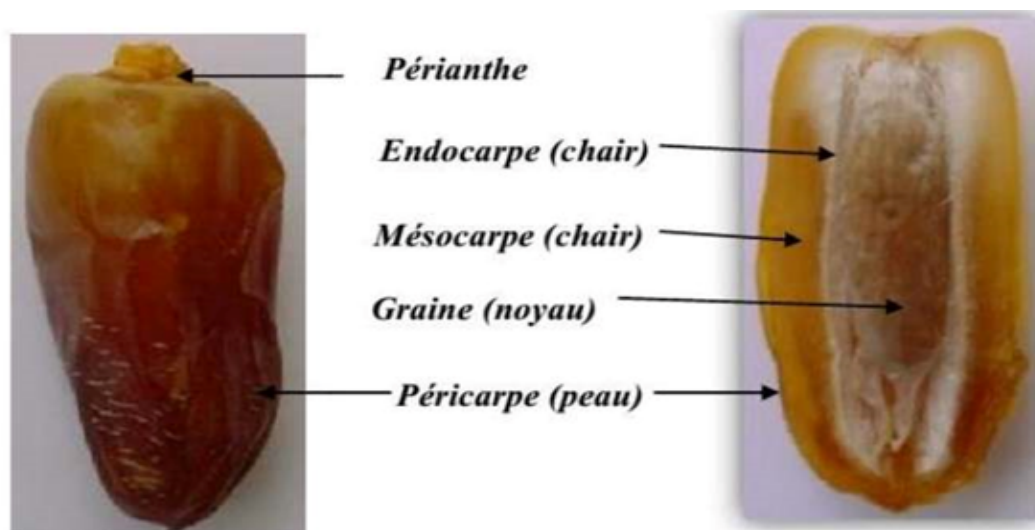


FIGURE I.1 – Schéma des différentes parties de la datte

nationale a doublé au cours des dix dernières années, témoignant d'un développement soutenu du secteur.

Le pays compte près de 20 millions de palmiers dattiers répartis sur une superficie de 170 000 hectares, principalement dans les régions sahariennes. Parmi les wilayas les plus productrices figurent Biskra – avec à elle seule 4,5 millions de palmiers –, ainsi qu'El Oued, El Meghaier, Touggourt, Ghardaïa, El Meniaa, Adrar, Béchar et Timimoun. Au total, 17 wilayas sont recensées comme zones majeures de production par les spécialistes.

Sur le plan des exportations, l'Algérie s'est hissée en 2021 au septième rang mondial, avec environ 77 000 tonnes de dattes exportées, générant un chiffre d'affaires d'environ 80 millions de dollars [6].

L'Algérie est l'un des principaux pays producteurs de différentes variétés de dattes, notamment la Deglet Nour, le Ghars et la Degla Baïdha. Le tableau I.1 présente les proportions de production de ces variétés en Algérie [7].

TABLE I.1 – Production des dattes en Algérie (2010–2019). [7]

	Production (qx)	%
DN	4 816 640,60	52,07
Gh et variétés à dattes molles	1 759 050,00	19,02
DB et autres variétés à dattes sèches	2 675 133,90	28,92
Total Algérie	9 250 824,50	100 %

I.2.3 Principales variétés de dattes en Algérie

Le ministère de l'Agriculture a indiqué que l'Algérie compte plus de 800 variétés de dattes, ce qui la positionne parmi les premiers pays au monde en termes de diversité

et de qualité. Cette richesse variétale inclut notamment la célèbre Deglet Nour, reconnue internationalement pour sa qualité exceptionnelle.

Parmi les principales variétés cultivées en Algérie, on peut citer : *Deglet Nour*, *Ghars*, *Mech Degla* et *Degla Beida*. [8, 9]

Le tableau I.2 présente une description de certaines variétés de dattes parmi les plus connues en Algérie.

TABLE I.2 – Principales variétés de dattes en Algérie et leurs propriétés. [9]

Variété	Propriétés
<i>Deglet Nour</i>	Variété emblématique originaire d’Algérie, cultivée principalement dans le Bas-Sahara. Très riche en énergie (70 % d’eau, 38 % de saccharose, vitamine C, minéraux). Extra-moelleuse, charnue, à peau fine et translucide, couleur dorée. Se conserve 6 à 12 mois. Utilisable fraîche, en pâtisserie ou fourrée au beurre. [10]
<i>Ghars</i>	Très répandue dans les zones désertiques basses. Bonne résistance au sel, maturité précoce. Le rendement moyen par palmier est d’environ 30 kg. [11]
<i>Mech Degla</i>	Dattes sèches de couleur jaune. Taille moyenne : 3,1 cm ; poids : 3,5 g ; teneur en eau : 15 %. [12]
<i>Degla Beida</i>	Dattes blanches et sèches. Longueur moyenne : 3,79 cm ; poids : 7,13 g ; teneur en eau : 14,75 %. [12]

I.2.4 Classification des dattes

La diversité variétale du palmier dattier est particulièrement importante, offrant une grande variété de formes et de caractéristiques souvent à l’origine de leur appellation. Toutefois, cette richesse génétique demeure sous-exploitée en Algérie.

Certaines variétés présentent une forte valeur marchande et sont qualifiées de « variétés commerciales ». Parmi celles-ci figurent la *Deglet Nour* (Algérie), le *Mejhoul* (Mauritanie) et le *Zahidi* (Arabie Saoudite). [13]

Les dattes sont classées en fonction du taux d’humidité et de la teneur en sucres. Le tableau I.3 présente les classifications des dattes ainsi que les variétés correspondant à ces classifications. [13]

TABLE I.3 – Classification des dattes selon leur consistance.

Type de consistance	Caractéristiques	Variétés et pays producteurs
Molle	- Humidité ≥ 30 % - Riches en sucres réducteurs (glucose et fructose)	Ghars (Algérie), Ahmer (Mauritanie), Kashram et Miskhrani (Égypte, Arabie saoudite)
Demi-molle	- Humidité entre 20 % et 30 % - Ratio 50 % saccharose et 50 % glucose/fructose	Deglet Nour (Algérie), Mejhoul (Maroc), Sifri et Zahidi (Arabie saoudite)
Sèche	- Humidité < 20 % - Riches en saccharose	Degla Beida, Mech Degla (Algérie, Tunisie), Amsrie (Mauritanie)

I.2.5 Utilisations des dattes

Au-delà de leur consommation directe, les dattes constituent une matière première de choix pour l'élaboration de nombreux produits à haute valeur ajoutée, facilement commercialisables. Parmi ces dérivés, on peut citer [14] :

- Le sucre liquide
- Les pâtes de dattes
- Les jus et sirops
- Les boissons gazeuses
- Les produits de confiserie
- L'alcool et le vinaigre

Utilisation dans la pharmacopée traditionnelle :

Les dattes occupent une place privilégiée dans la pharmacopée traditionnelle. Réputées depuis l'Antiquité pour leurs vertus thérapeutiques et cosmétiques, elles demeurent largement utilisées par les populations des régions phéniciques.

Historiquement, les décoctions de dattes étaient employées comme :

- Sédatif pour certains troubles nerveux
- Traitement contre la diarrhée infantile

De plus, leur consommation est toujours recommandée en pratique traditionnelle :

- Pour les femmes allaitantes, en raison de ses propriétés galactogènes
- Comme tonique général et source d'énergie rapide [13]

I.3 Technologie de la datte

La technologie de la datte englobe l'ensemble des opérations réalisées depuis la récolte jusqu'à la commercialisation, visant à préserver toutes les qualités organoleptiques et nutri-

tionnelles du fruit. Elle comprend également la transformation des dattes non consommées ou non consommables à l'état brut en divers produits, qu'ils soient finis ou semi-finis, destinés à la consommation humaine, animale ou à l'usage industriel.[5]

I.4 Datte *Deglet Nour*

I.4.1 Définition de la datte *Deglet Nour*

La *Deglet Nour* (littéralement « doigt de lumière ») est le cultivar de datte le plus emblématique des palmeraies du Sud-Est algérien. Comme illustré sur la Figure I.2, ce cultivar se reconnaît à sa forme fuselée caractéristique.

Reconnue pour sa qualité exceptionnelle, cette variété présente :

- Une consistance demi-molle idéale
- Un goût raffiné et subtilement sucré
- Une forme ovoïde allongée typique

Principales caractéristiques :

- Poids moyen : 10 g (90% chair, 10% noyau)
- Teneur en sucres : jusqu'à 95% du poids frais
- Maturation tardive et échelonnée (sur plusieurs semaines)

Commercialisation :

- Prix élevé sur les marchés internationaux
- Production principalement destinée à l'exportation
- Conditionnement soigné pour préserver sa qualité premium[5]



FIGURE I.2 – Dattes de variété Deglet Nour

I.4.2 Répartition de la production de la *Deglet Nour*

Selon les données du Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural (MADR, 2020), la production de la *Deglet Nour* en Algérie présente une concentration géographique marquée dans la région du Bas-Sahara, avec une répartition régionale significative :

- **Répartition globale :**
 - Bas-Sahara : 94,67% de la production nationale
- **Répartition par wilaya :**
 - Biskra : 47,74% (principal bassin de production)
 - El Oued : 31,93%
 - Ouargla : 15,01%

Cette distribution géographique est illustrée par la Figure I.3, qui met en évidence la prédominance de ces trois wilayas dans la production nationale de ce cultivar d'exception.[7]

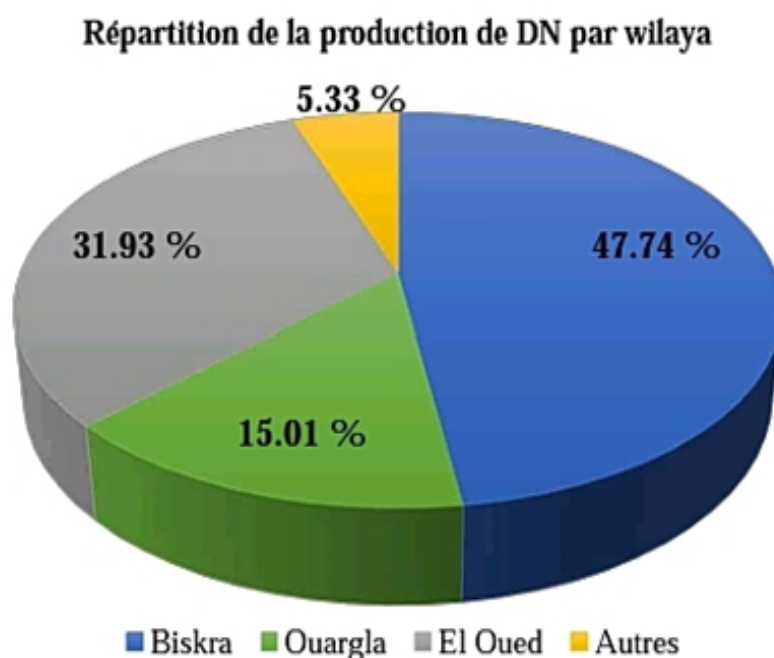


FIGURE I.3 – Répartition de la production de la *Deglet Nour* dans les wilayas (2010-2019). [7]

I.4.3 Composition de la *Deglet Nour*

La dattes *Deglet Nour* présente une composition biochimique riche, ce qui lui confère des propriétés nutritionnelles intéressantes. Le tableau I.4 résume les principaux constituants de sa chair :

La variété de dattes *Deglet Nour* se caractérise par sa richesse en sels minéraux, comme indiqué dans le tableau I.5 [16].

TABLE I.4 – Composition biochimique de la dattes Deglet Nour. [15]

Composés	Proportion (%)
Eau	7,14
Graisses	8,00
Protéines	5,93
Fibres	61,66
Cendres	1,11

TABLE I.5 – Teneur en sels minéraux dans les dattes Deglet Nour (pour 100 g).

Minéral	Quantité (mg)	Apport journalier (%)
Calcium	39	3,9
Potassium	656	14
Zinc	0,29	2,6
Magnésium	43	10,8
Sodium	2	0,2
Phosphore	62	8,9

I.5 Déchets de dattes

I.5.1 Définition

Les déchets de dattes représentent l'ensemble des résidus issus des fruits qui ne sont pas utilisés pour la consommation humaine directe. Il s'agit principalement des noyaux, des dattes tombées prématurément durant la maturation, des dattes pourries, incomplètes, non classables ou encore des résidus issus des processus de transformation. [15]

I.5.2 Valorisation des déchets de dattes

Chaque année, des milliers de tonnes de dattes restent inutilisées, représentant parfois plus de 30 % de la production nationale. Ces quantités peuvent toutefois être valorisées par des procédés de récupération et de transformation. Plusieurs pistes de valorisation ont été explorées :

I.5.2.1 Vinaigre de dattes :

Produit artisanal obtenu par double fermentation : d'abord alcoolique (grâce à la levure *Saccharomyces cerevisiae*), puis acétique (par la bactérie *Acetobacter aceti*). Ce vinaigre est traditionnellement utilisé à des fins alimentaires et médicinales.[10]

I.5.2.2 Biomasse et protéines d'organismes unicellulaires :

Des recherches ont permis la culture de levures unicellulaires sur des milieux à base de dattes, afin de produire des protéines. Cette alternative représente une solution prometteuse pour répondre aux besoins croissants en protéines à l'échelle mondiale.[10]

I.5.2.3 Alimentation animale :

Les noyaux et rebuts de dattes peuvent être transformés en aliments pour le bétail. Par exemple, la farine de noyaux de dattes peut être incorporée jusqu'à 10 % dans l'alimentation des poulets sans effet négatif sur leurs performances de croissance.[17]

I.5.2.4 Production de bioéthanol :

Les dattes constituent un substrat riche en sucres, idéal pour la fermentation alcoolique. Des expériences de laboratoire ont permis d'obtenir de l'éthanol à un degré de pureté avoisinant 90 %, démontrant ainsi leur potentiel dans la production de bioéthanol à usage énergétique ou industriel.[17]

I.6 Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons mis en lumière l'importance majeure des dattes dans l'agriculture, l'économie et la culture algériennes. L'Algérie, riche de plus de 800 variétés, dont la prestigieuse *Deglet Nour*, se distingue tant par la quantité que par la qualité de sa production dattière.

Nous avons également exploré les différentes classifications, les propriétés biochimiques et nutritionnelles, ainsi que les nombreuses formes de valorisation, qu'elles soient alimentaires, médicinales ou industrielles. En particulier, la gestion des déchets de dattes constitue un levier prometteur pour une économie circulaire durable, avec des applications allant de la production de bioéthanol à l'alimentation animale.

Ce panorama général sur la filière dattière constitue une base nécessaire pour aborder les aspects technologiques plus approfondis et les perspectives d'optimisation dans les chapitres suivants.

Procédé de production de bioéthanol

Sommaire

II.1 Introduction	14
II.2 Bioéthanol	14
II.2.1 Généralités sur le bioéthanol	14
II.2.2 Propriétés physico-chimiques du bioéthanol	14
II.2.3 Différentes générations de bioéthanol.....	15
II.2.4 Production de bioéthanol.....	19
II.2.5 Avantages et inconvénients du bioéthanol	20
II.2.6 Applications du bioéthanol	21
II.2.7 Diagramme de fabrication du bioéthanol.....	22
II.3 Fermentation alcoolique	23
II.3.1 Procédés de fermentation alcoolique	23
II.3.2 La levure <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	25
II.4 Distillation fractionnée	26
II.4.1 Généralités sur la distillation fractionnée	26
II.4.2 Colonne de Vigreux	27
II.4.3 Étapes de la distillation fractionnée	27
II.4.4 Avantages et inconvénients	27
II.5 Conclusion	28

II.1 Introduction

Face à l'épuisement progressif des ressources fossiles et à l'urgence climatique, le développement de carburants alternatifs renouvelables est devenu une priorité mondiale. Parmi ces solutions, le bioéthanol occupe une place centrale en tant que biocarburant liquide produit à partir de biomasse végétale. Grâce à ses propriétés physico-chimiques avantageuses et son potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre, il constitue une alternative crédible aux carburants classiques.

Ce chapitre s'intéresse au bioéthanol sous tous ses aspects fondamentaux. Il présente les différentes générations de production selon la nature de la biomasse utilisée (amylacée, lignocellulosique, algale), les procédés de fermentation associés, ainsi que le rôle essentiel des levures telles que *Saccharomyces cerevisiae*. L'accent sera également mis sur les procédés de distillation nécessaires à la purification de l'éthanol, ainsi que sur les avantages et les limites de cette filière énergétique.

Ce panorama vise à offrir une compréhension globale du procédé de production de bioéthanol, depuis les matières premières jusqu'à l'obtention d'un carburant purifié, prêt à l'usage industriel ou énergétique.

II.2 Bioéthanol

II.2.1 Généralités sur le bioéthanol

Le bioéthanol est le seul carburant liquide pour moteurs essence qui soit renouvelable et immédiatement disponible, puisque'il est produit à partir de matières premières végétales, aussi appelées biomasse. D'où l'appellation bioéthanol, faisant référence à l'origine vivante, végétale et non fossile de ce carburant. [18]

Le bioéthanol est simplement de l'éthanol issu de la fermentation de biomasse riche en sucres. Il s'agit du même éthanol que celui produit par l'hydratation de l'éthylène. Ce dernier est un alcool d'origine fossile, tandis que le premier provient de sources renouvelables.[19]

L'éthanol, de formule brute C_2H_5OH (Figure II.1), est communément désigné par l'abréviation EtOH. Il s'agit d'un composé à usages multiples, utilisé notamment dans les domaines pharmaceutique, de la parfumerie, de l'agroalimentaire, ainsi que comme combustible ou carburant.[20]

II.2.2 Propriétés physico-chimiques du bioéthanol

Le bioéthanol possède des caractéristiques physico-chimiques particulières qui lui confèrent son efficacité comme carburant alternatif. Le tableau ci-dessous résume ses princi-

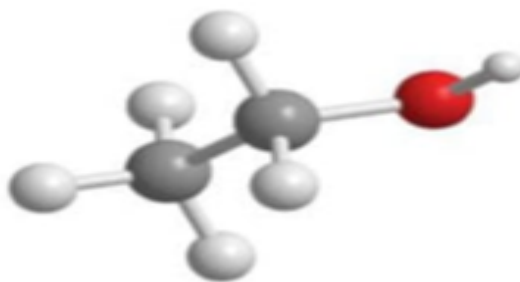


FIGURE II.1 – Molécule de l'éthanol.

pales propriétés.[21]

TABLE II.1 – Propriétés physico-chimiques du bioéthanol.

Paramètre	Unité	Valeur
Formule chimique	/	C ₂ H ₆ O
Masse moléculaire	g/mol	46,069
Apparence	/	Liquide incolore
Densité	kg/L	0,79
Indice d'octane (RON)	/	102–103
Indice d'octane (MON)	/	89–96
Chaleur latente de vaporisation	kJ/kg	842–930
Pression de vapeur	kPa	15–17
Température d'allumage	°C	420
Température de fusion	°C	-144
Température de vaporisation	°C	78,4
Point d'éclair	°C	12,8
Solubilité dans l'eau	% en volume	100

II.2.3 Différentes générations de bioéthanol

II.2.3.1 Bioéthanol de première génération

Le bioéthanol de première génération est obtenu par fermentation alcoolique de sucres fermentescibles tels que le glucose, le saccharose, etc. [21] Il est principalement produit à partir de céréales ou de grains de maïs. Toutefois, l'amidon présent dans ces matières premières ne peut être utilisé directement par les levures. Il doit d'abord être hydrolysé en sucres solubles et fermentescibles selon le schéma présenté à la Figure II.2. [22]

Cependant, le principal inconvénient du bioéthanol de première génération réside dans le risque de compromettre la sécurité alimentaire mondiale, les matières premières utilisées étant issues de ressources alimentaires destinées à la consommation humaine. Cette situation

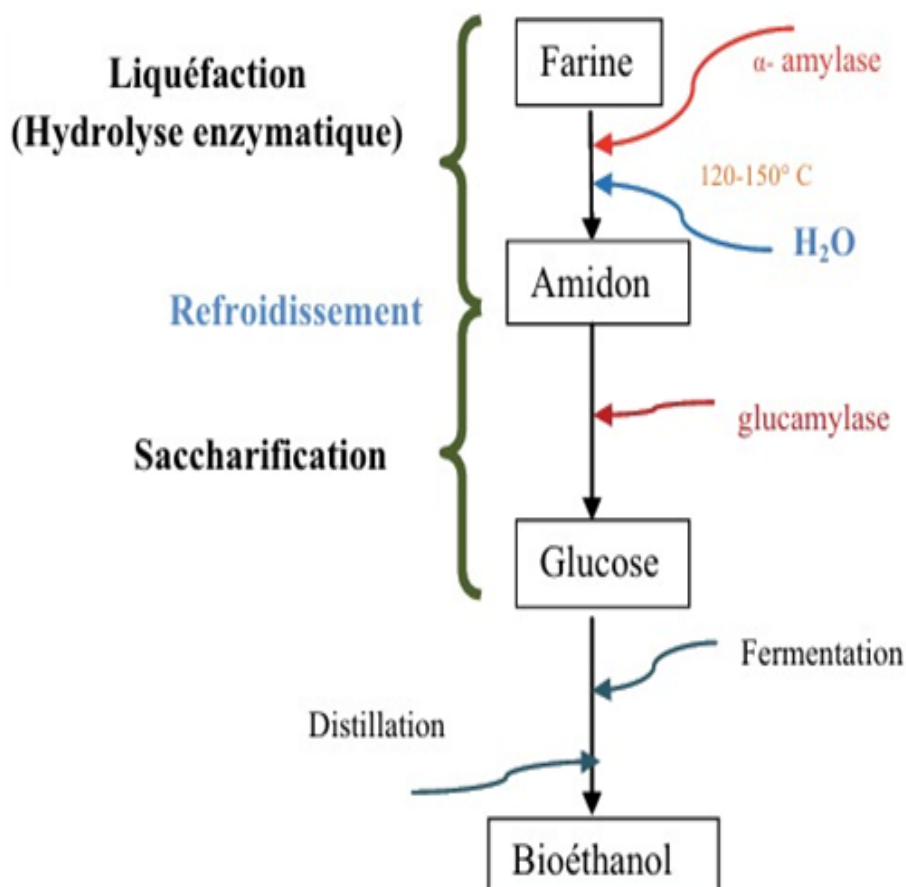


FIGURE II.2 – Étapes de préparation du bioéthanol à partir des ressources amylacées.

peut entraîner une augmentation des prix des denrées alimentaires. Par ailleurs, il convient de souligner que la production de bioéthanol de première génération demeure économiquement peu viable, en raison de la forte teneur en carbone des intrants agricoles nécessaires. [21]

II.2.3.2 Bioéthanol de deuxième génération

Le bioéthanol issu de ressources lignocellulosiques est qualifié de bioéthanol de deuxième génération. La cellulose, principal constituant de cette biomasse, est intégrée dans une matrice complexe comprenant l'hémicellulose et la lignine (Figure II.3), auxquelles elle est liée par divers types de liaisons chimiques : liaisons hydrogène, forces de Van der Waals ou liaisons covalentes. [22]

La biomasse lignocellulosique est principalement composée de trois polymères : la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Elle contient également, en quantités moindres, des protéines, des pectines, des cendres et divers extraits. La proportion de ces composants varie selon l'espèce végétale, le stade de développement, l'environnement de croissance ou les conditions de récolte. Par exemple, les feuillus sont généralement plus riches en cellulose, tandis que les feuilles et les pailles de céréales contiennent davantage d'hémicellulose. [23]

La préparation du moût issu de cette biomasse se déroule en deux étapes successives :

- **Prétraitement** : Cette phase vise à solubiliser partiellement ou totalement les composants incrustants de la cellulose. Les hémicelluloses, solubles entre 100 et 150 °C sous acide dilué, et la lignine, fusible à partir de 140 °C sont ainsi désorganisées pour libérer l'accès à la cellulose.[22]
- **Hydrolyse enzymatique** : Elle consiste à convertir la cellulose en sucres fermentescibles (glucose, cellobiose), à l'aide d'enzymes spécifiques : les exo-glucanases, les endo-glucanases, les β -cellobiohydrolases et les β -glucosidases.[22]

Ainsi, la paroi cellulaire des végétaux, constituée essentiellement de cellulose et d'hémicellulose, peut être valorisée pour la production de bioéthanol, à condition d'être dégradée efficacement par des traitements appropriés (physiques, chimiques ou enzymatiques) permettant de rompre la structure rigide et libérer les sucres fermentescibles. [24]

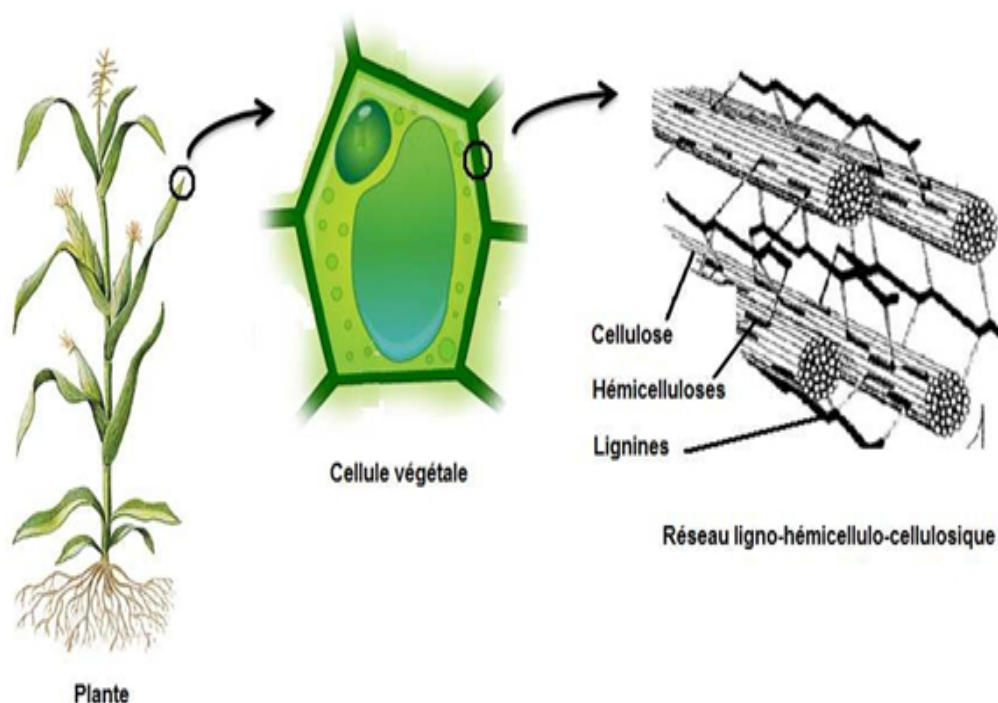


FIGURE II.3 – Schéma de la provenance des fibres ligno-hémicellulosiques.

II.2.3.3 Bioéthanol de troisième génération

Le bioéthanol de troisième génération (3G) est produit à partir de biomasses algales, cultivées dans divers milieux aquatiques tels que l'eau douce, les eaux usées ou l'eau de mer. Ce type de production présente l'avantage majeur de ne pas concurrencer les terres agricoles destinées à l'alimentation, et ne nécessite pas d'apport nutritif externe.

Actuellement, la recherche se focalise sur le développement du bioéthanol issu de ressources de troisième génération en raison de plusieurs avantages notables : une efficacité photosynthétique élevée (6 à 8 %), une productivité pouvant atteindre environ 13,1 kg de

matière sèche par mètre carré sur sept mois, une culture peu exigeante en engrais, une forte capacité de fixation du CO₂ (jusqu'à 10 tonnes/hectare), ainsi qu'un potentiel de valorisation en produits à haute valeur ajoutée (pigments, cosmétiques, additifs alimentaires, etc.). [25]

En outre, les microalgues présentent un fort potentiel pour la production de composés à haute valeur ajoutée, tels que des pigments naturels, des additifs alimentaires, ou encore des ingrédients cosmétiques.

Parmi les espèces les plus étudiées figurent les genres *Chlorella*, *Dunaliella*, *Chlamydomonas*, *Scenedesmus* et *Spirulina*, connus pour leur teneur élevée en amidon et en glycogène, qui peuvent représenter plus de 50 % de leur poids sec total.[22]

Il convient de noter que les générations de bioéthanol se distinguent selon la nature de la matière première utilisée. Certaines de ces matières, notamment les lignocellulosiques et algales, ne contiennent pas de sucres directement fermentescibles et nécessitent donc des étapes de traitement préalables, comme illustré dans la Figure II.4. [25]

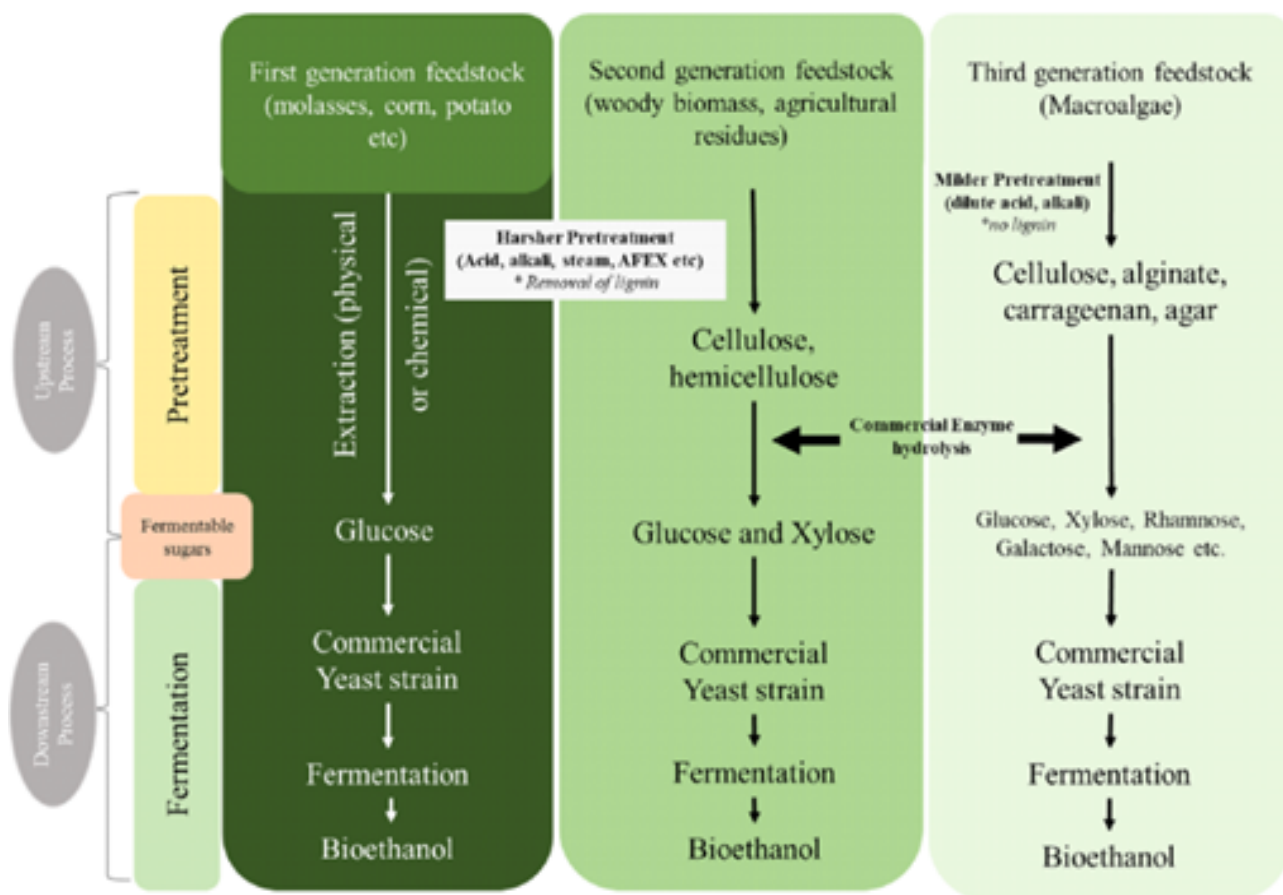


FIGURE II.4 – Procédé de production de bioéthanol à partir de la biomasse.

II.2.4 Production de bioéthanol

II.2.4.1 Production de bioéthanol à l'échelle mondiale

Face à la raréfaction des ressources fossiles et à l'aggravation du réchauffement climatique, la transition énergétique s'impose comme une nécessité. Parmi les alternatives émergentes, les biocarburants, et en particulier le bioéthanol, suscitent un intérêt croissant en raison de leur origine renouvelable.

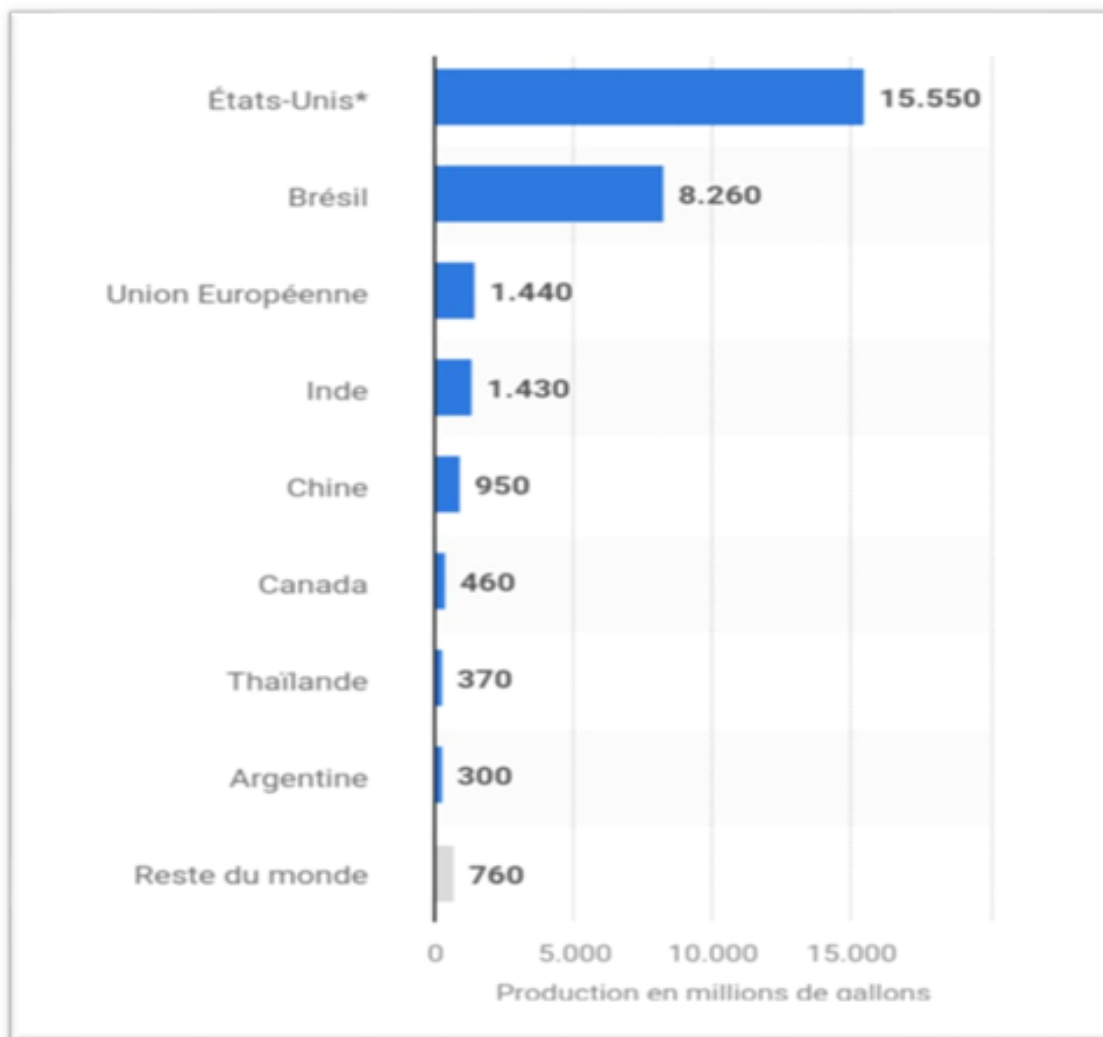


FIGURE II.5 – Volume de production de bioéthanol dans le monde en 2023, selon les pays (en millions de gallons).[26]

Issus de la biomasse, c'est-à-dire de matières organiques non fossiles, les biocarburants connaissent une expansion rapide. À titre d'exemple, la production mondiale d'agrocarburants est passée de 175 000 barils équivalent pétrole par jour en 2001 à près de 1,75 million en 2021.

La France, quant à elle, a vu sa production de biocarburants progresser significativement, passant de moins de 500 000 tonnes équivalent pétrole en 2005 à plus de six fois ce volume

en 2018.

En 2023, les États-Unis demeurent le premier producteur mondial de bioéthanol destiné aux carburants, avec une production estimée à 15,6 milliards de gallons. Cette domination s'explique par la disponibilité massive de matières premières (comme le maïs) et une politique de soutien active.[26]

II.2.5 Avantages et inconvénients du bioéthanol

Le bioéthanol est considéré comme un carburant respectueux de l'environnement en raison de sa contribution à un cycle fermé du carbone (Figure II.6). En effet, lors de sa combustion dans les moteurs de transport, du dioxyde de carbone (CO_2) est émis dans l'atmosphère. Toutefois, ce CO_2 ne s'ajoute pas au bilan global des gaz à effet de serre, car il est compensé par celui absorbé par les plantes utilisées comme matière première au cours de la photosynthèse. Ainsi, les émissions issues de la combustion sont équilibrées, réduisant considérablement l'impact environnemental par rapport aux carburants fossiles. [27]

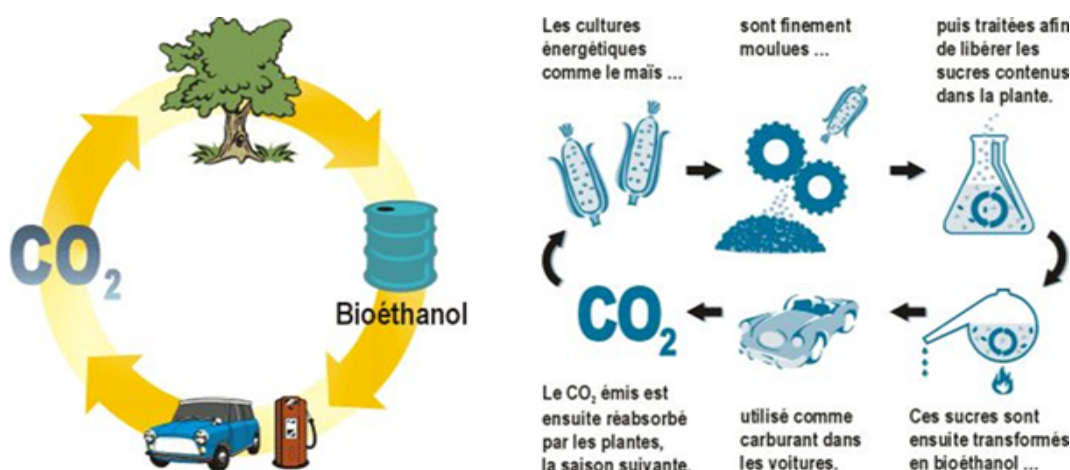


FIGURE II.6 – Schéma illustrant le cycle fermé du carbone dans la production et l'utilisation du bioéthanol.

Le CO_2 émis lors de la combustion est réabsorbé par les plantes au cours de la photosynthèse, contribuant ainsi à limiter l'empreinte carbone globale.

Malgré ses nombreux atouts environnementaux, l'utilisation et la production du bioéthanol présentent également certains inconvénients. Le tableau II.2 ci-dessous synthétise les principaux avantages et limites associés au bioéthanol. [28]

Le tableau suivant présente une synthèse des principaux avantages et inconvénients du bioéthanol en tant que biocarburant.[28]

TABLE II.2 – Avantages et inconvénients du bioéthanol.

Avantages	Inconvénients
Moins d'émissions de CO ₂ fossile que les carburants conventionnels.	Ne convient pas aux moteurs diesel classiques sans additif, en raison d'un faible indice de cétane.
Haut indice d'octane, efficacité accrue des moteurs à allumage par étincelle.	Émissions élevées d'hydrocarbures par évaporation (jusqu'à 15 % pour l'E10G).
Moins d'émissions de particules.	Démarrage difficile par temps froid en raison de la basse pression de vapeur et de la chaleur latente élevée.
Moins d'émissions non réglementées de benzène et de butadiène.	Formation accrue d'acétaldéhyde à la combustion.
Moins de risque de formation d'ozone.	Faible pouvoir lubrifiant, risque de corrosion du moteur.
Sans soufre.	Problèmes de stabilité en présence d'eau dans les mélanges essence-éthanol.
Biodégradable.	Flamme invisible de l'éthanol pur, posant un risque de sécurité.
Moins toxique que le biométhanol.	Émissions non réglementées plus élevées pour les véhicules E85G (éthylène, acétaldéhyde).
Rendement énergétique supérieur pour les véhicules à allumage par étincelle.	Odeur de vinaigre possible due à l'éthanol non brûlé sur les anciens catalyseurs.
Rendement élevé pour un coût relativement bas.	—

II.2.6 Applications du bioéthanol

L'éthanol peut remplacer partiellement ou totalement l'essence dans les moteurs à allumage par étincelle. Il existe plusieurs types de carburants éthanolés, dont la désignation est faite par la lettre "E" suivie du pourcentage d'éthanol contenu dans le mélange. Par exemple, E85 correspond à un carburant contenant 85 % d'éthanol et 15 % d'essence. Parmi les mélanges courants figurent E5, E10, E15, E85, E95 et E100, selon les pays et les usages.[20]

Sur le plan industriel, l'éthanol est largement utilisé, notamment dans le secteur cosmétique. Il entre dans la composition de nombreux produits comme les parfums, déodorants, lotions capillaires ou fonds de teint. Sa volatilité, son pouvoir solubilisant, et sa capacité à favoriser la pénétration des principes actifs dans la peau en font un ingrédient de choix. Afin de prévenir toute utilisation abusive, l'éthanol destiné à l'usage cosmétique est généralement dénaturé.

En tant qu'agent antiseptique, l'éthanol est présent dans de nombreux désinfectants pour les mains grâce à son efficacité contre les bactéries et champignons. Il agit principalement en dénaturant les protéines et en dissolvant les membranes lipidiques.

Enfin, l'éthanol est également utilisé en médecine comme solvant pour la préparation de solutions pharmaceutiques. Il est notamment employé en phytothérapie comme solvant

d'extraction des composés bioactifs. Des concentrations variant de 50 % à 96 % permettent l'extraction d'antioxydants à partir de feuilles médicinales comme celles de Katuk.[19]

II.2.7 Diagramme de fabrication du bioéthanol

La production de bioéthanol implique une succession d'étapes technologiques essentielles, allant de la préparation de la matière première jusqu'à la purification finale du produit. Ces différentes phases sont synthétisées dans la Figure II.7. [27]

Comme illustré dans la Figure II.7, intitulée « Schéma de fabrication du bioéthanol à partir des dattes », le processus débute par le traitement des dattes (1 kg), visant à extraire le moût fermentescible. Les résidus solides, tels que les noyaux et la pulpe épuisée, sont éliminés.

Le moût est ensuite soumis à une dilution et une acidification contrôlée, avant l'ensemencement avec des levures sèches actives (*Saccharomyces cerevisiae*) à raison de 4 g/L.

La fermentation alcoolique s'effectue à température constante (30 °C), permettant la conversion des sucres en éthanol et en dioxyde de carbone (CO₂). Le vin de dattes ainsi obtenu est finalement distillé pour séparer et purifier l'éthanol final.

Ce procédé met en valeur une biomasse locale à fort potentiel énergétique, tout en respectant les principes de valorisation durable des déchets agroalimentaires.

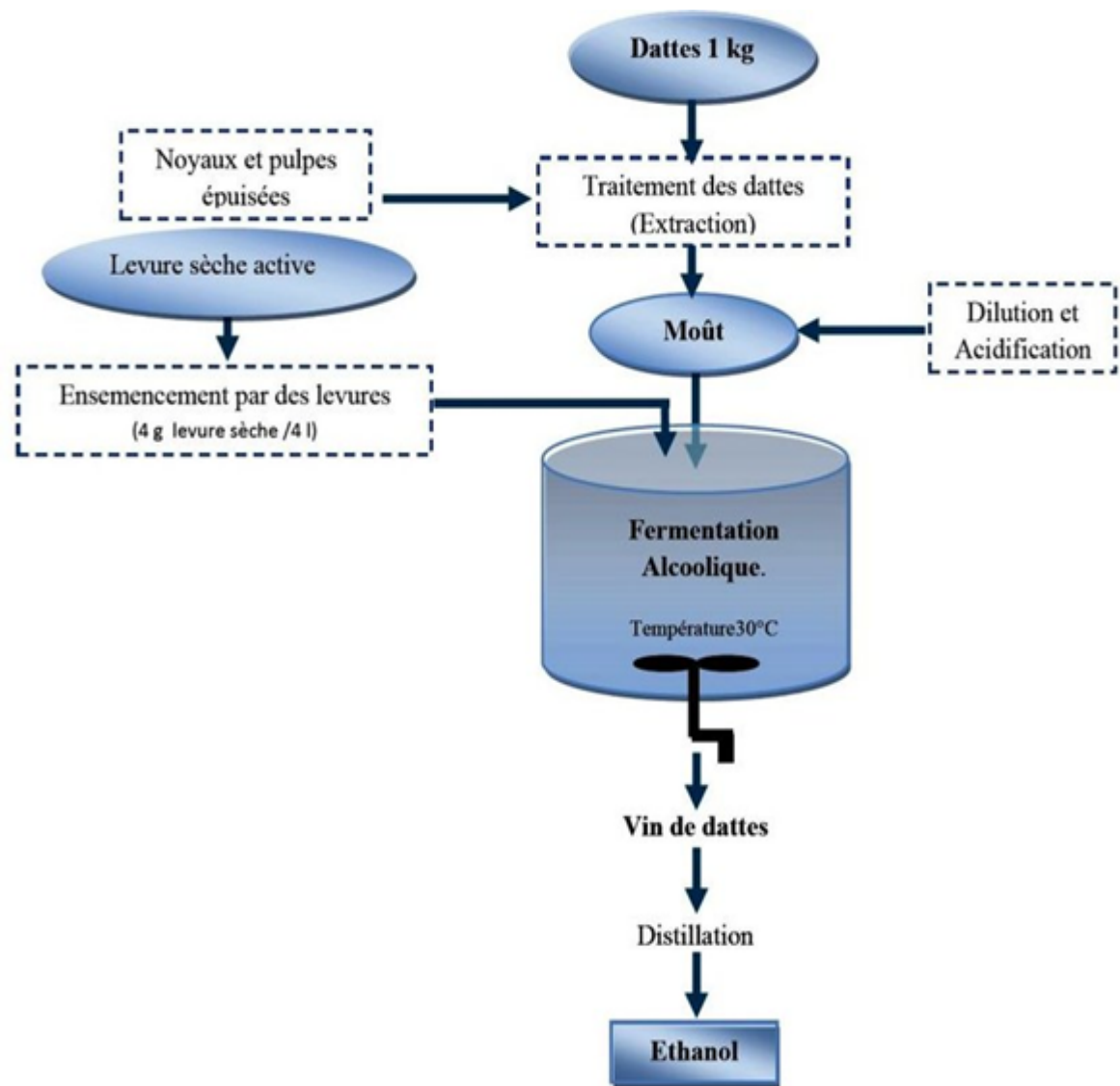


FIGURE II.7 – Diagramme de fabrication du bioéthanol. [29]

II.3 Fermentation alcoolique

II.3.1 Procédés de fermentation alcoolique

La fermentation alcoolique constitue l'étape centrale du processus de production de l'éthanol. Il s'agit d'un processus biochimique au cours duquel les sucres présents dans le moût sont transformés en alcool et en dioxyde de carbone (CO_2), en milieu liquide et en absence d'oxygène [30]

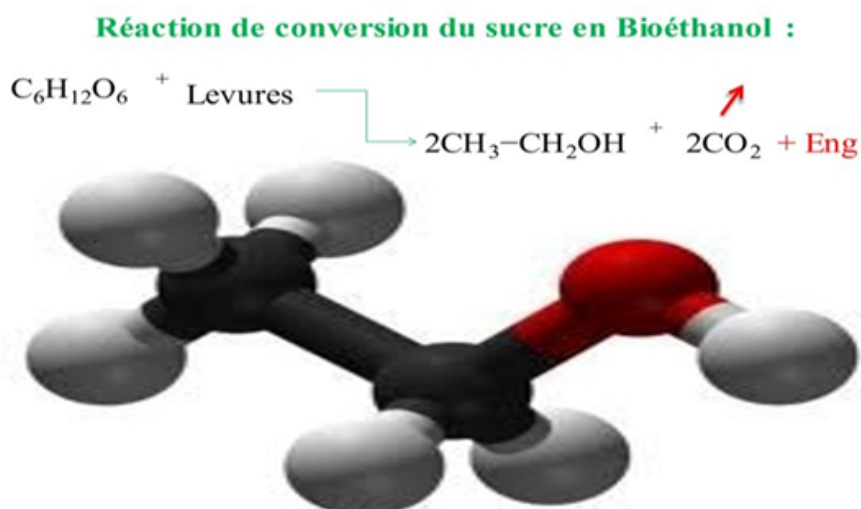


FIGURE II.8 – Réaction de conversion du sucre en bioéthanol[11]

II.3.1.1 Fermentation en mode batch

La production d'éthanol peut être réalisée via un procédé discontinu appelé "batch", utilisant des bioréacteurs de grands volumes. Ces cultures sont considérées comme des systèmes fermés pour la phase liquide. En principe, aucun apport supplémentaire n'est effectué durant la fermentation, sauf pour contrôler certains paramètres comme le pH ou la formation de mousse. Le processus se poursuit jusqu'à épuisement d'un nutriment essentiel ou apparition de conditions environnementales défavorables. [31]

Ce type de fermentation n'offre pas de rendement constant, car la composition du milieu varie. De plus, des temps d'arrêt sont requis pour le remplissage, la vidange et la stérilisation des cuves entre chaque cycle. [31]

II.3.1.2 Fermentation en mode fed-batch

Le mode semi-continu, dit "Fed-Batch", consiste à ajouter les substrats de manière aseptique au cours de la fermentation. Ce procédé permet d'augmenter progressivement le volume du milieu de culture et est très utilisé dans l'industrie grâce à ses rendements élevés. La récolte se fait en fin de cycle, soit intégralement, soit partiellement (une fraction pouvant servir d'inoculum) [10].

II.3.1.3 Fermentation en mode continu

Les systèmes continus maintiennent la culture dans un état de croissance stable en remplaçant continuellement une partie du milieu par du milieu frais. Deux variantes existent : le **chémostat**, avec apport limité de nutriment à débit constant, et le **turbidostat**, où la densité cellulaire est contrôlée par turbidité. Bien que ce mode offre de hauts rendements et une bonne

maîtrise du procédé, il présente des risques comme le lessivage du réacteur et l'accumulation de produits inhibiteurs [31].

II.3.2 La levure *Saccharomyces cerevisiae*

II.3.2.1 Définition

Saccharomyces cerevisiae est une levure eucaryote unicellulaire se multipliant par bourgeonnement. Reconnue pour sa simplicité nutritionnelle, son adaptation aux conditions de culture et sa capacité à produire de l'éthanol, elle est la plus exploitée dans l'industrie biochimique [32].

II.3.2.2 Taxonomie

S. cerevisiae appartient au règne des Fungi, division des Ascomycota, sous-division des Saccharomycotina, classe des Saccharomycetes, ordre des Saccharomycetales, et famille des Saccharomycetaceae. Ces cellules, sphériques ou ovales, mesurent de 5 à 10 μm de long et de 5 à 7 μm de large en moyenne. Leur taille peut évoluer selon l'âge et les conditions environnementales[32].

II.3.2.3 Morphologie cellulaire de la levure

Les cellules de levure *Saccharomyces cerevisiae* présentent une grande diversité morphologique. Leur forme varie généralement de l'ovale au rond, avec une longueur comprise entre 5 et 10 μm et une largeur de 5 à 7 μm . Certaines cellules peuvent toutefois atteindre des dimensions plus importantes, allant de 2,5 à 21 μm (Figure II.9). [32]

À titre comparatif, les levures ont une taille équivalente à celle d'un globule rouge et sont sensiblement plus grandes que les cellules bactériennes. Leur taille moyenne dépend de plusieurs facteurs, notamment le stade du cycle de croissance, les conditions de culture et l'âge de la cellule ; les cellules âgées tendent à croître progressivement.

Les composants intracellulaires caractéristiques de *S. cerevisiae* sont représentés dans la Figure II.9, qui met en évidence l'organisation interne typique de cette levure, incluant les organites essentiels à ses fonctions métaboliques. [28]

II.3.2.4 Pourquoi utiliser *S. cerevisiae* ?

Cette levure est privilégiée pour la fermentation alcoolique en raison de sa tolérance aux stress environnementaux, sa forte productivité en éthanol, et son coût réduit. Elle présente une excellente viabilité cellulaire (jusqu'à 4.6×10^{10} cellules/g), une grande résistance à la chaleur, à l'acidité, et à l'éthanol [19].

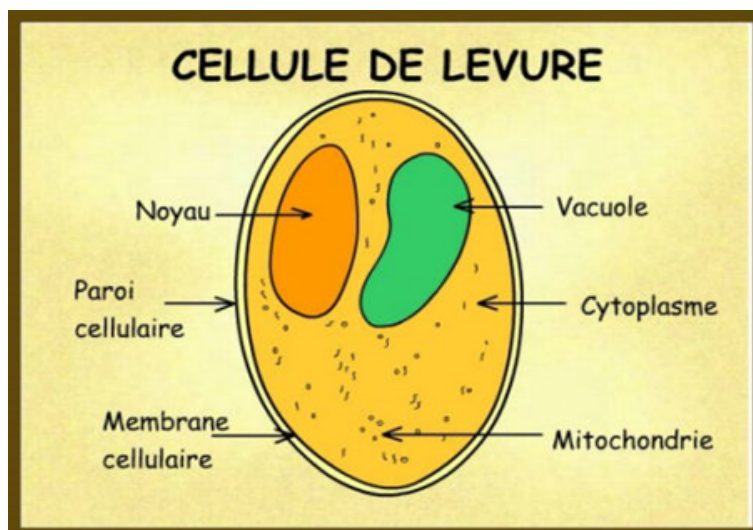


FIGURE II.9 – La levure *Saccharomyces cerevisiae*.

II.4 Distillation fractionnée

II.4.1 Généralités sur la distillation fractionnée

L'éthanol issu de la fermentation est mélangé à de l'eau. La distillation fractionnée permet de les séparer selon leurs points d'ébullition. Le point d'ébullition de l'éthanol est de $78,81^{\circ}\text{C}$. On peut extraire jusqu'à 95 % d'éthanol pur [33].

Lorsque la différence entre les points d'ébullition est inférieure à 100°C , une colonne de fractionnement est indispensable pour améliorer la séparation [34].

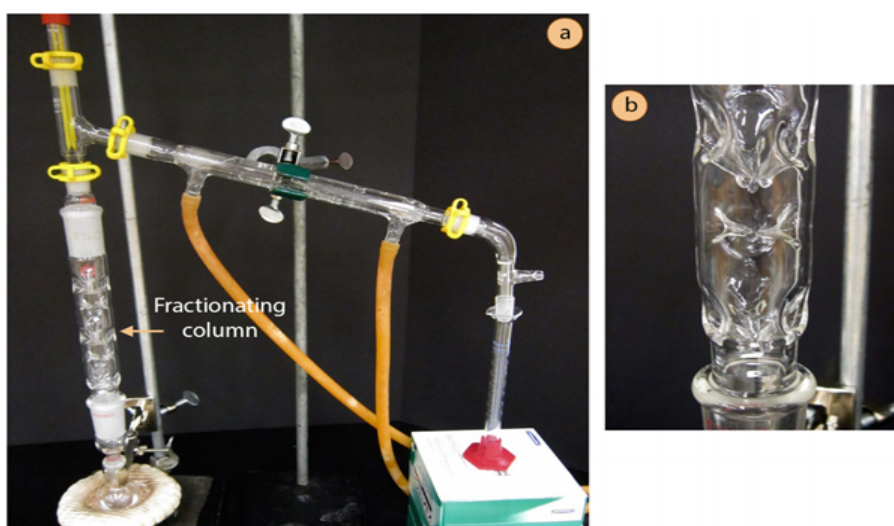


FIGURE II.10 – a) Montage de distillation fractionnée, b) Gros plan sur la colonne de fractionnement pendant la distillation, montrant la condensation s'égouttant depuis les indentations en verre.

II.4.2 Colonne de Vigreux

La colonne de Vigreux permet de réaliser plusieurs cycles successifs de vaporisation-condensation sans avoir à démonter l'appareillage. Chaque cycle enrichit le distillat en composé le plus volatil [34].

II.4.3 Étapes de la distillation fractionnée

La distillation fractionnée comporte trois étapes fondamentales, quel que soit le type de mélange liquide à distiller. Ces étapes sont l'évaporation, la condensation et enfin la récupération. Elles se déroulent à des températures différentes, ce qui signifie que le processus produit plusieurs fractions ou distillats à différents niveaux.

- 1) **Chauffage et évaporation** : Le mélange liquide est chauffé pour produire des vapeurs.
- 2) **Condensation et séparation** : Les composants se condensent à différentes hauteurs selon leur volatilité.
- 3) **Récupération** : Les fractions liquides condensées sont récoltées séparément [3].

II.4.4 Avantages et inconvénients

II.4.4.1 Les avantages

Appareillage simple : La distillation fractionnée nécessite un appareillage relativement simple. Celui-ci comprend généralement un condenseur, un ballon de distillation, une colonne de fractionnement, un thermomètre ainsi qu'une source de chaleur (comme un bec Bunsen). Ces éléments sont largement disponibles dans les laboratoires et faciles à manipuler, ce qui facilite la mise en œuvre du procédé de manière efficace, même dans des environnements à ressources limitées.

Utilisation de la colonne de fractionnement : L'un des éléments centraux de ce procédé est la colonne de fractionnement. Elle permet une séparation plus nette des constituants d'un mélange liquide. Placée entre le ballon de distillation et le condenseur, elle offre une large surface de contact grâce à ses aspérités ou à un matériau de remplissage. Cela améliore considérablement l'efficacité du fractionnement en permettant plusieurs cycles de vaporisation-condensation.

Efficacité élevée : La distillation fractionnée est considérée comme plus efficace que la distillation simple. Elle permet d'obtenir un distillat beaucoup plus pur, surtout lorsque les

points d'ébullition des composants à séparer sont proches (moins de 40 °C d'écart). Ce niveau de précision rend cette méthode indispensable dans les procédés de séparation fine.[35].

II.4.4.2 Les inconvénients

Temps nécessaire : La distillation fractionnée est un procédé qui requiert un temps relativement long. Cela est dû au fait qu'elle repose sur des cycles successifs de vaporisation et de condensation, répétés plusieurs fois, afin d'obtenir une séparation complète des constituants. Ce caractère répétitif prolonge la durée du processus par rapport à une distillation simple.

Risque opérationnel : Ce type de distillation fonctionne à haute température et peut générer des pressions importantes dans l'équipement. Cela pose des risques opérationnels non négligeables, notamment en termes de sécurité. Des incidents comme les fuites, les surpressions ou même les explosions peuvent survenir si les conditions ne sont pas rigoureusement contrôlées. De plus, sa manipulation requiert des compétences techniques précises et une connaissance approfondie des paramètres physiques du mélange traité. [35].

II.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en lumière les fondements scientifiques et technologiques de la fermentation alcoolique appliquée à la production du bioéthanol. Après avoir défini les différents types de fermentation (batch, fed-batch et continue), nous avons examiné leurs principes, avantages, limites et conditions d'utilisation dans un cadre industriel.

L'accent a été mis sur la levure *Saccharomyces cerevisiae*, en tant qu'acteur biologique central du processus fermentaire, pour ses performances élevées en termes de tolérance aux stress et de production d'éthanol. Sa taxonomie, sa morphologie, ainsi que ses propriétés physiologiques ont été présentées en détail afin de mieux comprendre son rôle clé dans le rendement global du procédé.

Enfin, la distillation fractionnée a été abordée comme méthode de purification indispensable pour isoler l'éthanol du moût fermenté. L'usage de la colonne de Vigreux, les différentes étapes du processus ainsi que les avantages et les inconvénients de cette technique ont été clairement détaillés.

Ainsi, ce chapitre constitue une base solide pour aborder les aspects expérimentaux et analytiques du bioéthanol, qui seront développés dans les chapitres suivants.

Matériel et méthodes

Sommaire

III.1 Introduction	30
III.2 Matériels expérimentaux	30
III.2.1 Matières biologiques utilisées.....	30
III.2.2 Produits chimiques utilisés	31
III.2.3 Équipements et instruments	31
III.3 Méthodologie de production expérimentale de bioéthanol	34
III.3.1 L'extraction des sucres à partir des dattes	35
III.3.2 Fermentation alcoolique.....	36
III.3.3 Montage des bioréacteurs	37
III.3.4 Suivi de la fermentation	38
III.3.5 Distillation fractionnée	38

III.1 Introduction

Ce chapitre décrit en détail les matériaux biologiques, les réactifs chimiques, ainsi que les équipements et instruments utilisés tout au long du travail expérimental. Il présente également les différentes étapes méthodologiques mises en œuvre pour la production de bioéthanol à partir de déchets de dattes.

Dans un premier temps, les matières premières et les microorganismes employés seront présentés, suivis des dispositifs expérimentaux utilisés pour assurer des conditions de travail fiables et reproductibles. Ensuite, les différentes procédures expérimentales seront décrites, depuis la préparation du jus de dattes, en passant par la fermentation alcoolique, jusqu'à l'étape finale de distillation fractionnée du bioéthanol.

Cette section vise à fournir un cadre méthodologique rigoureux permettant à tout lecteur ou chercheur de reproduire les expériences réalisées, tout en assurant la traçabilité des résultats discutés dans les chapitres suivants.

III.2 Matériels expérimentaux

III.2.1 Matières biologiques utilisées

Le matériel biologique utilisé pour la production de bioéthanol comprend :

- **Les dattes déclassées**, issues des rejets agricoles. Il s'agit de fruits tombés au sol pendant la récolte ou de faible qualité commerciale, non destinés à la consommation humaine. Elles sont riches en sucres fermentescibles, ce qui les rend adaptées à la fermentation (figure III.1).



FIGURE III.1 – Variétés de dattes utilisées

- **La levure *Saccharomyces cerevisiae***, utilisée dans sa forme boulangère sèche active. Elle a été achetée dans le commerce local (supermarché) et joue un rôle essentiel dans la transformation des sucres en éthanol grâce à son efficacité fermentaire reconnue (figure III.2).



FIGURE III.2 – Levure boulangère *Saccharomyces cerevisiae* utilisée dans l'expérience

III.2.2 Produits chimiques utilisés

Dans le cadre de ce travail, plusieurs produits chimiques ont été utilisés pour la mise en œuvre du procédé de production du bioéthanol à partir de déchets de dattes. L'ensemble de ces réactifs est présenté dans le tableau III.1 ci-dessous.

TABLE III.1 – Produits chimiques utilisés lors de la production du bioéthanol.

Produit	Formule chimique / Utilisation
Chlorure de sodium	NaCl
Hydroxyde de potassium	KOH
Acide phosphorique	H ₃ PO ₄
Sulfate de potassium	K ₂ SO ₄
Sulfate de magnésium	MgSO ₄ · 7H ₂ O
Chlorure de calcium	CaCl ₂ · 2H ₂ O
Soude / Acide chlorhydrique	NaOH / HCl (ajustement du pH)
Éthanol	Éthanol à 96 % (échantillon de référence)

III.2.3 Équipements et instruments

Dans le cadre de ce travail expérimental, plusieurs instruments de laboratoire ont été mobilisés pour assurer les différentes étapes de la production du bioéthanol, notamment la préparation du jus, le suivi de la fermentation, et la distillation. Le Tableau III.2 ci-dessous présente un récapitulatif des équipements utilisés et leurs fonctions principales.

TABLE III.2 – Appareils utilisés pour le procédé de production du bioéthanol.

Appareil	Fonction
Thermomètre	Mesure de la température
Étuve	Incubation des échantillons
Agitateur magnétique	Homogénéisation des solutions
Montage de distillation fractionnée	Séparation et purification de l'éthanol
pH-mètre	Contrôle de l'acidité du milieu
Spectrophotomètre UV-Vis	Analyse spectrale du bioéthanol
Réfractomètre	Détermination de la teneur en sucre
FTIR	Analyse structurale infrarouge
Balance	Pesées précises des réactifs
Plaque chauffante	Chauffage contrôlé des échantillons

Par ailleurs, certaines de ces installations ont été illustrées par des photographies prises directement au sein du laboratoire, afin de mieux visualiser le matériel employé dans les conditions réelles de l'expérimentation. Ces images sont présentées dans les figures suivantes avec des légendes explicatives.



Le **réfractomètre** permet de mesurer l'indice de réfraction d'un liquide, ce qui est directement lié à sa teneur en sucre. Il a été utilisé pour déterminer la concentration en sucres avant et après fermentation.

FIGURE III.3 – Réfractomètre utilisé pour la mesure de la concentration en sucres dans les jus de dattes.



L'**étuve** a permis d'incuber les flacons de fermentation à une température constante de 32 °C pendant 72 heures, condition essentielle à la croissance optimale des levures.

FIGURE III.4 – Étuve utilisée pour incuber les échantillons à température constante.



Le **spectrophotomètre UV-Vis** a été utilisé pour analyser l'absorption du bioéthanol dans l'ultraviolet, ce qui permet de vérifier la présence de groupes fonctionnels spécifiques ou de détecter des impuretés.

FIGURE III.5 – Spectrophotomètre UV-Vis utilisé pour analyser le spectre du bioéthanol.



FIGURE III.6 – pH-mètre utilisé pour contrôler l'acidité du milieu de fermentation.

Le **pH-mètre** permet de mesurer précisément l'acidité du milieu. Le pH a été ajusté avant la fermentation à l'aide de HCl ou NaOH pour assurer un environnement optimal à l'activité enzymatique des levures.



FIGURE III.7 – Spectrophotomètre FTIR utilisé pour analyser la structure moléculaire du produit final.

Le **FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)** a permis d'identifier les liaisons chimiques caractéristiques de l'éthanol produit. Les spectres obtenus ont été comparés à ceux de l'éthanol commercial.

III.3 Méthodologie de production expérimentale de bioéthanol

Cette étude expérimentale a pour objectif la valorisation des déchets de dattes *Deglet Nour* de qualité non marchande (fruits tombés au sol) par conversion en bioéthanol. La méthodologie adoptée comprend trois étapes claires :

III.3.1 L'extraction des sucres à partir des dattes

Dans le but de maximiser l'extraction des sucres fermentescibles à partir des dattes, plusieurs expériences ont été réalisées en faisant varier différents paramètres : température, mode d'agitation, méthode de découpe et volume d'eau. Chaque test a été effectué avec 50 g de dattes, et la concentration en sucre a été mesurée toutes les 15 minutes pendant 2 heures à l'aide d'un réfractomètre.

III.3.1.1 Effet du broyage

- Dattes broyées finement.
- Dattes simplement hachées.

III.3.1.2 Effet de la température

- Broyage + 150 mL d'eau distillée, **chauffage à 65 °C**, brassage magnétique (vitesse 5).
- Broyage + 150 mL d'eau distillée, **non chauffée**, brassage magnétique.

III.3.1.3 Effet du mode d'agitation

- Agitation magnétique à vitesse constante.
- Agitation manuelle toutes les 5 minutes.

III.3.1.4 Effet du volume d'eau

- Broyage + 200 mL d'eau distillée.
- Broyage + 100 mL d'eau distillée.



(a) Broyage des dattes



(b) Les résidus

FIGURE III.8 – Étapes de préparation du jus de dattes : (a) broyage des fruits et (b) résidus après filtration.

III.3.2 Fermentation alcoolique

Le jus filtré est enrichi avec les sels suivants : 0,50 g/L K_2SO_4 , 0,25 g/L $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, 0,20 g/L $CaCl_2 \cdot 2H_2O$, 0,20 g/L NaCl, 0,98 mL/L H_3PO_4 , 0,29 mg/L KOH. Le pH est ajusté à l'aide de NaOH ou HCl selon les besoins de chaque expérience. La levure *Saccharomyces cerevisiae* est ajoutée à une concentration de 1 g/L. Les flacons sont placés dans une étuve à 32 °C pendant 72 heures. Après la fermentation, les échantillons sont filtrés. Le liquide obtenu est appelé «vin de dattes» (Figure III.9), tandis que les résidus solides constituent la «lie de fermentation» (Figure III.10).

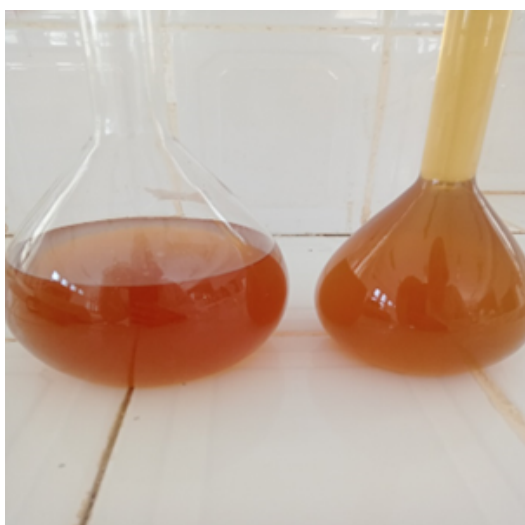


FIGURE III.9 – Vin de dattes obtenu après fermentation



FIGURE III.10 – Résidus solides (lie) issus de la fermentation

III.3.3 Montage des bioréacteurs

Le système de fermentation a été monté comme suit :

- 1) Stérilisation des bouteilles par ébullition pendant 1 heure.
- 2) Insertion d'un tuyau plastique dans chaque bouchon.
- 3) Une étanchéité hermétique est assurée à l'aide de silicone pour empêcher tout échange d'air avec l'extérieur, nécessaire à une fermentation sans oxygène.
- 4) Connexion des flacons à des bouteilles remplies d'eau pour le piégeage du CO_2 (barbotage).
- 5) Insertion d'un second tube pour l'échantillonnage.



FIGURE III.11 – Montage des bioréacteurs de fermentation

III.3.4 Suivi de la fermentation

Chaque 24 heures, un échantillon est prélevé afin de mesurer :

- **pH** : mesuré à l'aide d'un pH-mètre ;
- **Teneur en sucres résiduels** : mesurée par réfractomètre.

III.3.5 Distillation fractionnée

La distillation fractionnée est utilisée pour séparer l'éthanol des autres composants. La colonne à renflements en verre augmente l'efficacité de la séparation. Les fractions indésirables sont éliminées en dessous de 60 °C. L'éthanol est récupéré entre 75 et 80 °C.



FIGURE III.12 – Montage de distillation fractionnée pour la récupération de l'éthanol

Résultats et discussion

Sommaire

IV.1 Introduction	40
IV.2 L'extraction des sucres à partir des dattes	40
IV.2.1 Effet du broyage.....	40
IV.2.2 Effet de la température.....	42
IV.2.3 Effet du mode d'agitation	43
IV.2.4 Effet du volume d'eau	44
IV.3 Étude des conditions de fermentation alcoolique	45
IV.3.1 Effet du pH du milieu	45
IV.3.2 Effet de la concentration du jus.....	46
IV.4 Caractérisation du bioéthanol obtenu.....	47
IV.4.1 Analyse infrarouge FTIR.....	47
IV.4.2 Analyse spectrale UV-Visible	49
IV.4.3 Mesure de la densité et comparaison avec l'éthanol commercial	50
IV.4.4 Indice de réfraction	50
IV.5 Conclusion	51

IV.1 Introduction

Ce chapitre présente les principaux résultats expérimentaux obtenus lors de la production de bioéthanol à partir de déchets de dattes. L'étude a porté sur l'influence de plusieurs paramètres sur deux étapes clés : l'extraction des sucres et la fermentation alcoolique.

Dans la première phase, les effets de la température, du mode d'agitation et du degré de broyage ont été analysés pour optimiser l'extraction des sucres. Ensuite, l'impact du pH et de la concentration du jus sur la production d'éthanol a été évalué.

Enfin, la qualité de l'éthanol obtenu a été vérifiée après distillation fractionnée, à l'aide d'analyses UV-Vis, FTIR et de mesures de l'indice de réfraction, permettant une évaluation comparative rigoureuse entre le bioéthanol extrait expérimentalement et l'éthanol commercial de référence.

IV.2 L'extraction des sucres à partir des dattes

Dans l'objectif d'optimiser la préparation du jus de dattes avant fermentation, six méthodes d'extraction ont été expérimentées. Ces méthodes varient selon quatre paramètres principaux : le mode de découpe, la température, l'agitation et le volume d'eau utilisé. L'efficacité de chaque méthode a été évaluée à travers la concentration en sucres mesurée toutes les 15 minutes pendant 2 heures à l'aide d'un réfractomètre. Les courbes d'évolution de la concentration en fonction du temps ont été analysées, et des mesures complémentaires de l'indice de réfraction ont permis de confirmer les résultats.

IV.2.1 Effet du broyage

TABLE IV.1 – Évolution de l'indice de réfraction avec broyage

Temps (min)	Indice de réfraction
15	1.3563
30	1.3595
45	1.3611
60	1.3627
75	1.3627
90	1.3627
105	1.3627
120	1.3627

TABLE IV.2 – Évolution de l'indice de réfraction sans broyage

Temps (min)	Indice de réfraction
15	1.3516
30	1.3563
45	1.3579
60	1.3595
75	1.3611
90	1.3627
105	1.3627
120	1.3627

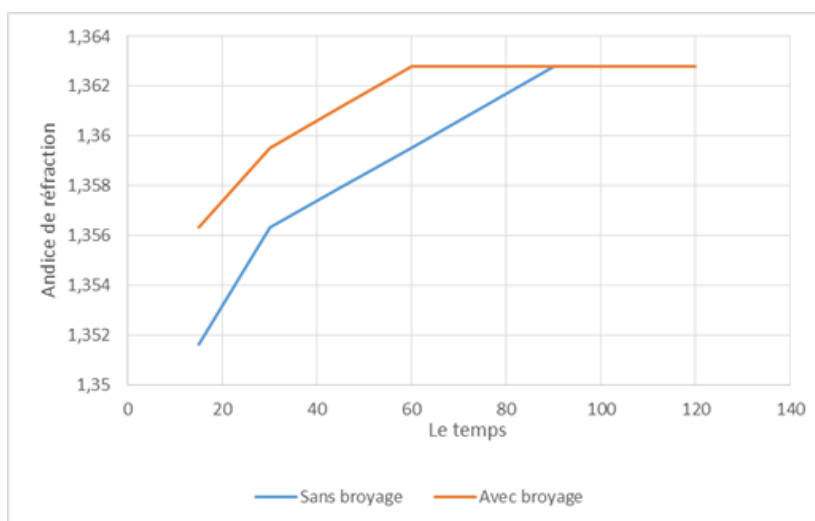


FIGURE IV.1 – Évolution de la concentration en sucres selon le mode de découpe.

broyage fin a significativement augmenté la surface de contact entre le substrat et l'eau, favorisant une libération plus rapide et plus efficace des sucres solubles. Cette amélioration est attribuée à une plus grande surface de contact entre la matière végétale et le solvant, favorisant la diffusion des sucres.

IV.2.2 Effet de la température

TABLE IV.3 – Paramètres d'extraction à T=65 °C

Temps (min)	Indice de réfraction
15	1.35633
30	1.35954
45	1.36116
60	1.36279
75	1.36279
90	1.36279
105	1.36279
120	1.36279

TABLE IV.4 – Paramètres d'extraction à température ambiante

Temps (min)	Indice de réfraction
15	1.35475
30	1.35633
45	1.35793
60	1.35954
75	1.36116
90	1.36116
105	1.36116
120	1.36116

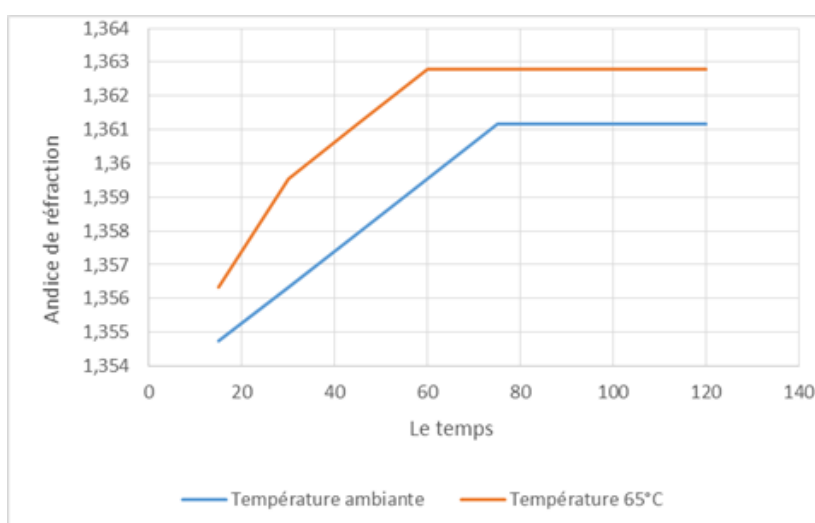


FIGURE IV.2 – Influence de la température sur l'extraction des sucres.

L'élévation de la température d'extraction (65 °C) améliore la solubilité des glucides ainsi que la fluidité du milieu, accélérant ainsi la libération des sucres. La courbe de variation montre une extraction plus rapide et plus complète à température élevée.

IV.2.3 Effet du mode d'agitation

TABLE IV.5 – Résultats avec agitation continue

Temps (min)	Indice de réfraction
15	1.35633
30	1.35954
45	1.36116
60	1.36279
75	1.36279
90	1.36279
105	1.36279
120	1.36279

TABLE IV.6 – Résultats sans agitation

Temps (min)	Indice de réfraction
15	1.35633
30	1.35954
45	1.36116
60	1.36116
75	1.36116
90	1.36116
105	1.36279
120	1.36279

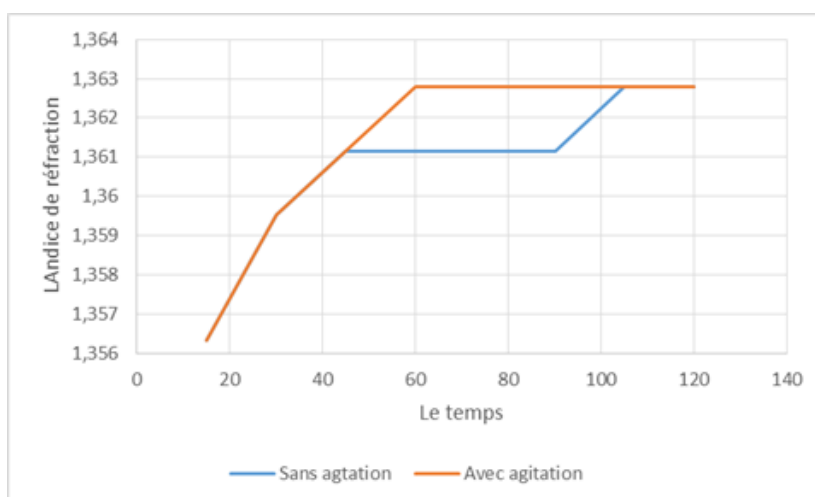


FIGURE IV.3 – Effet du mode d'agitation sur la concentration en sucres.

Deux modes d'agitation ont été comparés : agitation magnétique continue et agitation manuelle toutes les 5 minutes. Les résultats montrent que l'agitation magnétique favorise l'homogénéisation du mélange, augmentant l'efficacité d'extraction.

IV.2.4 Effet du volume d'eau

TABLE IV.7 – Variation de l'indice de réfraction du jus de dattes (1kg de dattes dans 2L d'eau)

Temps (min)	Indice de réfraction
15	1.3697
30	1.3714
45	1.3749
60	1.37992
75	1.37992
90	1.37992
105	1.38162
120	1.38162

TABLE IV.8 – Variation de l'indice de réfraction du jus de dattes (1kg de dattes dans 4L d'eau)

Temps (min)	Indice de réfraction
15	1.35162
30	1.35475
45	1.35633
60	1.35633
75	1.35793
90	1.35954
105	1.35954
120	1.35954

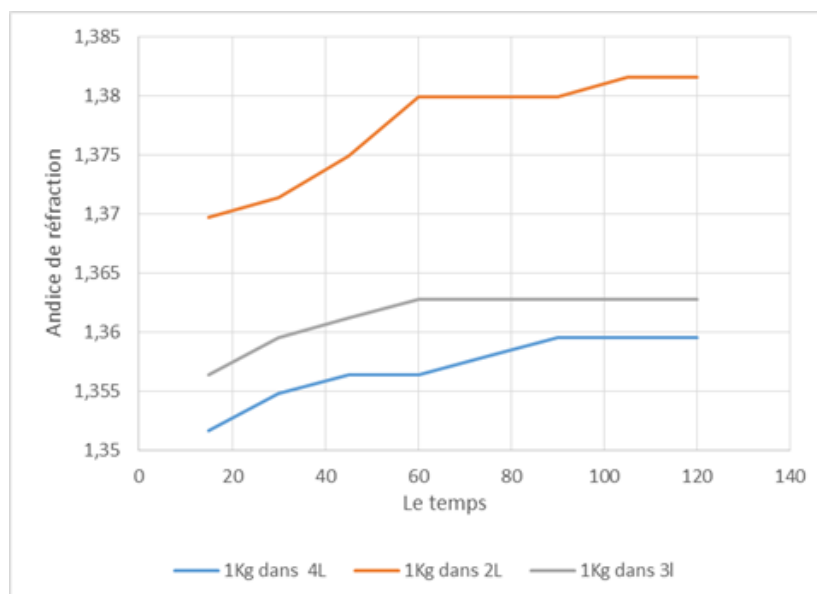


FIGURE IV.4 – Influence du volume d'eau sur l'extraction des sucres.

L'augmentation du volume d'eau facilite la diffusion des sucres mais engendre une dilution du jus extrait. Ainsi, une plus grande quantité totale de sucres est extraite, mais leur concentration est réduite. À l'inverse, un volume plus faible (méthode 6) permet une concentration plus élevée, mais avec un rendement global plus faible.

L'ensemble des résultats montre que la méthode la plus efficace repose sur un broyage fin, une température d'extraction élevée (65 °C), une agitation continue, et un volume d'eau modéré. Ces conditions permettent d'optimiser la libération des sucres fermentescibles tout en maintenant une concentration adéquate dans le jus de dattes.

IV.3 Étude des conditions de fermentation alcoolique

Dans le but d'optimiser la production de bioéthanol, une série d'expériences a été menée pour évaluer l'effet de différents paramètres sur le rendement de fermentation alcoolique. Deux facteurs ont été principalement étudiés : le pH du milieu et la concentration du jus de dattes. Ces paramètres influencent directement l'activité métabolique des levures et la conversion des sucres en éthanol. Les expériences ont été réalisées en utilisant la même souche de *Saccharomyces cerevisiae*, à température constante (32 °C) et pendant une durée de 72 heures.

IV.3.1 Effet du pH du milieu

Le pH est un facteur déterminant dans le métabolisme des levures. Des milieux trop acides ou trop basiques peuvent inhiber l'activité enzymatique, ralentir la croissance microbienne ou même provoquer une inactivation des levures. Dans cette étude, deux valeurs de pH ont été testées : 4,0 et 5,5 afin de déterminer le pH optimal pour la production d'éthanol à partir de jus de dattes.

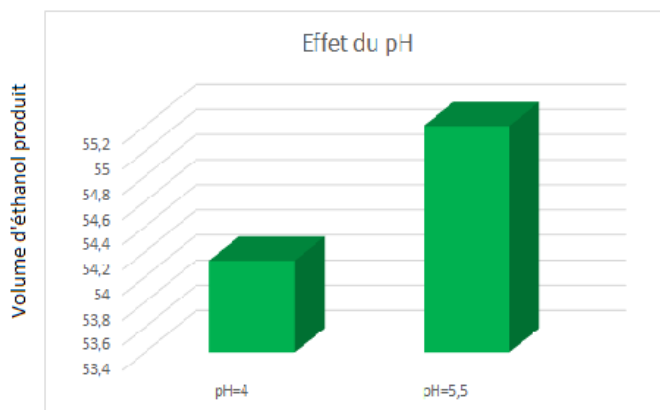


FIGURE IV.5 – Quantité d'éthanol produite selon le pH du milieu de fermentation

L'analyse des résultats (Figure IV.5) montre que le rendement en éthanol augmente avec l'élévation du pH. La production maximale a été obtenue à pH 5,5, indiquant que ce niveau favorise l'activité fermentaire de la levure. À l'inverse, un pH trop acide (pH 4,0) limite la synthèse d'éthanol.

IV.3.2 Effet de la concentration du jus

La concentration du jus de dattes détermine la quantité de sucres disponibles pour la fermentation. Deux dilutions ont été comparées : 1 kg de dattes dans 3 L d'eau (concentration plus élevée) et 1 kg dans 4 L d'eau (concentration plus faible).

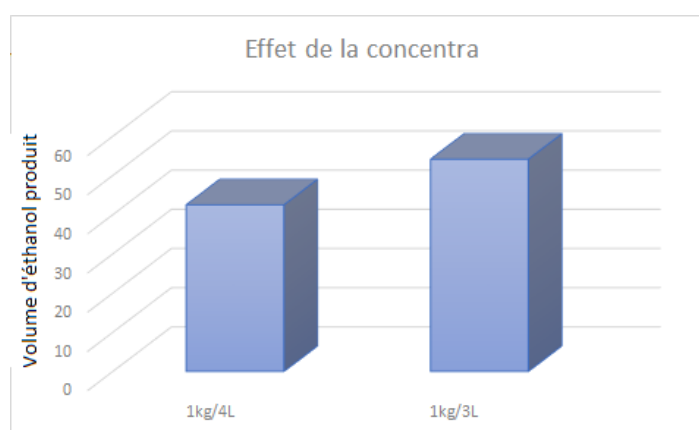


FIGURE IV.6 – Influence de la concentration du jus sur la production d'éthanol

Comme l'illustre la Figure IV.6, une concentration plus élevée du jus (1 kg/3 L) a généré une plus grande quantité d'éthanol. Cela s'explique par une disponibilité accrue de sucres fermentescibles, favorisant une activité métabolique plus soutenue des levures.

IV.4 Caractérisation du bioéthanol obtenu

Dans le but de confirmer la nature et la pureté du bioéthanol extrait à partir des déchets de dattes, deux techniques spectroscopiques complémentaires ont été employées : la spectroscopie UV-Visible et la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR). Ces méthodes permettent de mettre en évidence les groupements fonctionnels caractéristiques de l'éthanol et de détecter d'éventuelles impuretés.

IV.4.1 Analyse infrarouge FTIR

La spectroscopie infrarouge (IR) a été utilisée pour identifier les groupes fonctionnels présents dans les échantillons issus de la fermentation et de la distillation des dattes. Le spectre IR permet notamment de confirmer la présence de l'éthanol et d'évaluer la pureté du produit final.

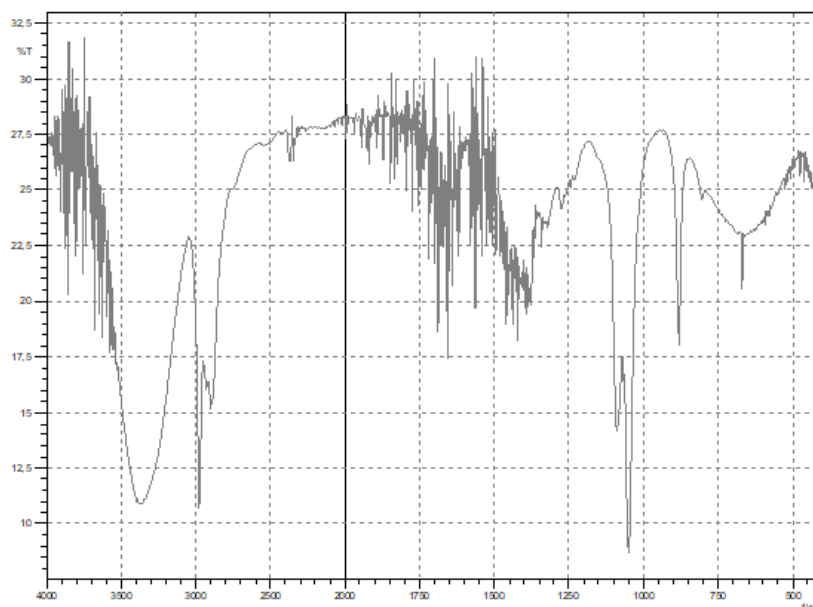


FIGURE IV.7 – Spectre FTIR de l'échantillon (pH = 4 ; 1kg dattes / 3L eau).

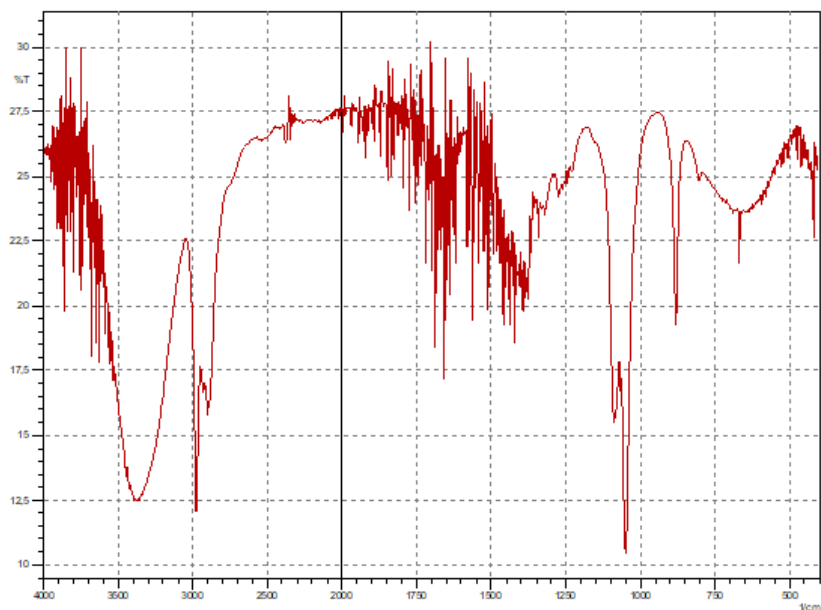


FIGURE IV.8 – Spectre FTIR de l'échantillon 3 (pH = 5.5 ; 1kg dattes / 3L eau).

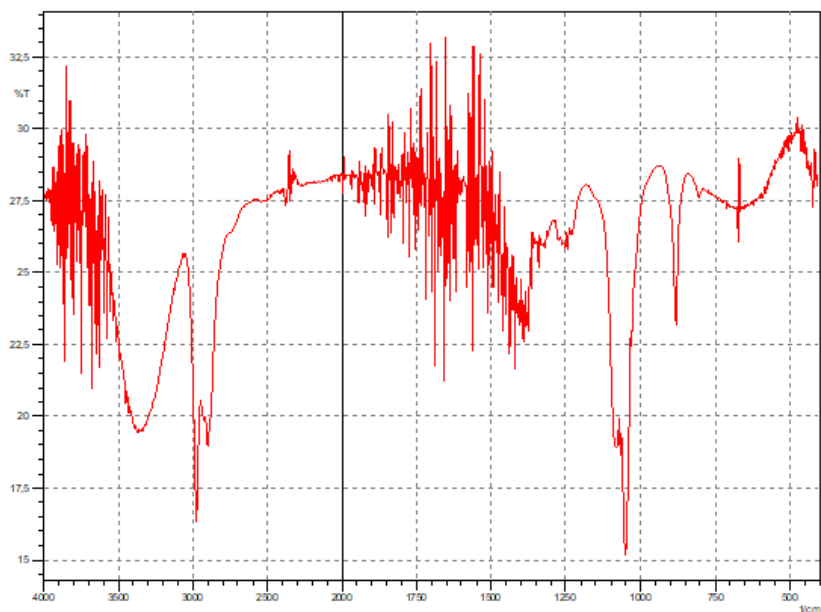


FIGURE IV.9 – Spectre FTIR de l'éthanol commercial (pureté 96 %).

Résultats et interprétation

- **Bande large vers 3300 cm^{-1}** : Elle est caractéristique de l'élongation de la liaison O–H, typique des groupes hydroxyles présents dans les alcools comme l'éthanol.
- **Bande entre 2900 et 2950 cm^{-1}** : Elle correspond aux vibrations d'élongation des liaisons C–H, en particulier celles des groupes CH_3 et CH_2 , présents dans les chaînes aliphatiques de l'éthanol.

- **Bande faible autour de 1450 cm^{-1}** : Associée à la déformation angulaire des groupes méthyle et méthylène, ce qui renforce l'identification de l'éthanol.

La comparaison des spectres montre que les échantillons fermentés présentent les mêmes bandes caractéristiques que l'éthanol commercial, bien que l'intensité de la bande O–H soit plus marquée, ce qui pourrait suggérer une teneur en eau légèrement supérieure ou la présence de composés hydrophiles.

IV.4.2 Analyse spectrale UV-Visible

Afin d'identifier et de comparer la composition des échantillons de bioéthanol obtenus, une analyse spectroscopique UV-Visible a été réalisée. Les spectres d'absorbance ont été enregistrés entre 200 et 600 nm pour plusieurs échantillons issus de la fermentation de dattes à différents pH, ainsi que pour un échantillon d'éthanol commercial à 96 %.

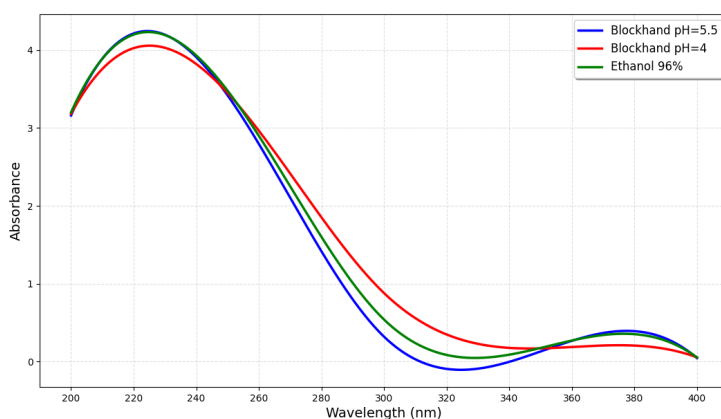


FIGURE IV.10 – Spectres UV-Visible comparatifs des échantillons de bioéthanol à différents pH et de l'éthanol commercial (96 %)

Les résultats montrent un pic d'absorbance intense situé entre 210 et 220 nm dans tous les échantillons analysés, ce qui correspond à la transition électronique $n \rightarrow \sigma^*$, caractéristique des groupes hydroxyles (–OH) présents dans les molécules d'alcool. Ce signal confirme la présence dominante de l'éthanol dans les échantillons fermentés.

L'intensité du pic varie selon le pH utilisé lors de la fermentation. Le bioéthanol obtenu à **pH 5.5** présente une absorbance proche de celle de l'éthanol commercial, indiquant une teneur plus élevée en éthanol ou une meilleure pureté du produit. À l'inverse, le bioéthanol issu de la fermentation à **pH 4.0** affiche une absorbance légèrement inférieure, suggérant soit une concentration plus faible en éthanol, soit la présence de résidus interférents.

Conclusion : Les résultats UV-Visible confirment que les conditions de fermentation influencent la qualité du bioéthanol produit. Le **pH optimal** semble être autour de **5.5**, favorisant une extraction et une purification plus efficaces de l'éthanol.

IV.4.3 Mesure de la densité et comparaison avec l'éthanol commercial

La densité du bioéthanol produit à 34 °C était comprise entre 0,821 et 0,824 g/mL. Corrigée à 20 °C, elle était proche de celle de l'éthanol à 90–92 %, ce qui confirme une pureté satisfaisante.

TABLE IV.9 – Comparaison des densités mesurées à 34 °C, corrigées à 20 °C et estimation de la teneur en éthanol.

Échantillon	ρ à 34 °C (g/mL)	ρ à 20 °C (g/mL)	% estimée d'éthanol
Éthanol commercial (96 %)	0.815	0.8304	96 %
Éthanol produit (échantillon pH=4 ; 1kg dattes / 3L eau)	0.824	0.8394	90 %
Éthanol produit (échantillon pH=4 ; 1kg dattes / 4 L eau)	0.821	0.8394	92 %
Éthanol produit (échantillon pH=5.5 ; 1kg dattes / 3L eau)	0.824	0.8364	90 %

Analyse : Les résultats du tableau IV.9 montrent que les densités corrigées à 20 °C pour les échantillons produits expérimentalement sont très proches de celle de l'éthanol commercial titrant à 96 %. En effet, après correction thermique, les valeurs obtenues indiquent une masse volumique comprise entre 0.8364 et 0.8394 g/mL, ce qui correspond, selon les tables de référence, à un titre alcoométrique d'environ 96 %.

Cela suggère que le bioéthanol obtenu par fermentation des dattes présente un degré de pureté comparable à celui de l'éthanol de qualité commerciale, ce qui témoigne de l'efficacité du procédé de fermentation et de distillation utilisé.

IV.4.4 Indice de réfraction

L'indice de réfraction a été mesuré pour différentes solutions, dont des extraits issus de la fermentation ainsi que de l'éthanol commercial à 96%. Les données obtenues sont présentées dans le **Tableau IV.10** ci-dessous :

TABLE IV.10 – Mesures de l'indice de réfraction des différentes solutions analysées

Échantillon	Indice de réfraction
Extrait fermenté pH = 4	1.36279
Extrait fermenté pH = 5.5	1.36279
1 kg de substrat dans 4 L d'eau	1.36443
Éthanol commercial 96%	1.36443

Les extraits obtenus par fermentation présentent un indice de réfraction de **1.36279**, légèrement inférieur à celui de l'éthanol commercial (**1.36443**). Cette différence, bien que faible,

peut indiquer la présence d'impuretés ou d'eau résiduelle dans les échantillons fermentés.

La valeur mesurée pour l'éthanol commercial est cohérente avec la littérature scientifique, qui situe généralement l'indice de réfraction de l'éthanol pur à 96% entre **1.3639 et 1.3641** à 20 °C [36, 37]. La concordance de cette mesure avec celle de la solution contenant 1 kg de substrat dans 4 L d'eau pourrait indiquer une forte concentration en éthanol dans cette dernière.

IV.5 Conclusion

Ce chapitre a permis d'examiner les effets de plusieurs paramètres clés sur l'efficacité de l'extraction des sucres et sur la performance de la fermentation alcoolique dans la production de bioéthanol à partir de déchets de dattes. Il a été démontré que des facteurs tels que la température, le mode de broyage, l'agitation et le volume d'eau influencent significativement l'extraction des sucres, avec un avantage notable pour le broyage fin, l'agitation magnétique continue et le chauffage à 65 °C.

D'autre part, l'étude de la fermentation a mis en évidence l'importance du *pH* et de la concentration du substrat. Le rendement maximal en éthanol a été obtenu à un *pH* de 5,5 et avec une concentration de 1 kg de dattes pour 3 L d'eau, conditions jugées optimales pour l'activité de la levure *Saccharomyces cerevisiae*.

Enfin, la distillation fractionnée a permis d'obtenir un bioéthanol de bonne pureté, et les analyses UV-Vis, IR, ainsi que les mesures de densité et d'indice de réfraction ont confirmé la présence d'éthanol dans les échantillons, avec des caractéristiques physico-chimiques proches de celles de l'éthanol commercial. Ces résultats ouvrent la voie à une valorisation efficace des déchets phoenicicoles à des fins énergétiques et industrielles.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Dans un contexte mondial marqué par l'urgence climatique et la nécessité de transition énergétique, cette étude a exploré une voie prometteuse de valorisation des déchets agricoles algériens. Les résultats obtenus démontrent clairement le potentiel des déchets de dattes de la variété *Deglet Nour* comme matière première viable pour la production de bioéthanol, alternative renouvelable aux carburants fossiles.

L'analyse approfondie des paramètres d'extraction a mis en évidence que l'optimisation des conditions opératoires — notamment le broyage mécanique, la concentration en sucres et le contrôle du pH — permet d'atteindre des rendements compétitifs. Le protocole mis en place, associant un chauffage modéré à 65 °C et une agitation continue, a conduit à une extraction efficace des sucres fermentescibles, avec un rendement record de 162,59 mL d'éthanol par kilogramme de dattes.

Au-delà des aspects techniques, cette recherche ouvre des perspectives économiques et environnementales importantes. La transformation des déchets phoenicicoles en biocarburant s'inscrit pleinement dans les principes de l'économie circulaire, tout en répondant aux défis locaux de gestion des résidus agricoles. Les analyses de pureté — atteignant 90 % après distillation — confirment la qualité du bioéthanol produit et son adéquation avec les standards industriels.

Cependant, plusieurs défis doivent encore être relevés pour une éventuelle mise à l'échelle industrielle. L'optimisation énergétique du procédé, notamment au niveau de la distillation, ainsi qu'une évaluation complète du cycle de vie, constitueront des axes prioritaires pour les recherches futures. De plus, la valorisation conjointe de coproduits à haute valeur ajoutée (composés phénoliques, fibres alimentaires, etc.) représente une piste à explorer.

En définitive, ce travail contribue à enrichir le champ des alternatives énergétiques durables en Algérie. Il montre que la valorisation raisonnée des ressources locales, couplée à des procédés biotechnologiques maîtrisés, peut constituer une réponse stratégique pour la construction d'un avenir énergétique plus propre, plus autonome et plus résilient.

Références Bibliographiques

- [1] A. Hannou, "Exportation des dattes « deglet nour » algériennes « de luxe » à 40 da : comment est-ce possible ?" *Tadamsa*.
- [2] R. Maazouzi, "Production d'alcool à partir de dattes pourries en algérie," *SciDev.net*.
- [3] J. Clifton. What is fractional distillation. ReAgent Chemicals.
- [4] camerounWeb. Les bienfaits des dattes pour la santé. [Online]. Available : https://www.camerounweb.com/CameroonHomePage/NewsArchive/Les-bienfaits-des-dattes-pour-la-sant-eacute-698960#google_vignette
- [5] M. E. H. BELAROUSSI, "Étude de la production du palmier dattier (phoenix dactylifera l.) variété deglet nour : cas des régions de oued mya et oued righ," Ph.D. dissertation, Université Kasdi Merbah – Ouargla.
- [6] A. presse service. Chaïb reçoit une délégation du groupe d'amitié parlementaire mauritanie-algérie. [Online]. Available : <https://www.aps.dz/algerie/185270-chaib-recoit-une-delegation-du-groupe-d-amitie-parlementaire-mauritanie-algerie>
- [7] M. HADDOU, "Impact des facteurs agro-écologiques sur les caractéristiques des dattes deglet nour dans les régions de ouargla et de biskra," Ph.D. dissertation, Université Kasdi Merbah – Ouargla.
- [8] Algérie360. Datte algérienne : plus de 800 variétés produites localement. [Online]. Available : <https://www.algerie360.com/la-datte-algerienne-plus-de-800-types-produits-localement/>
- [9] S. E. BENZIOUCHE and F. CHERIET, "Structure et contraintes de la filière dattes en algérie," *New Medit*, p. 50.
- [10] C. GUERN and Y. AMEUR, "Production de bioéthanol à partir des déchets de dattes," Master's thesis, Université Frères Mentouri Constantine 1.
- [11] A. ZABI and A. MESSAOUDI, "Production de bioéthanol à partir des déchets de dattes variété ghars," Master's thesis, Université KASDI-MERBAH Ouargla.

- [12] S. ACOURENE and M. TAMA, “Caractérisation physico-chimique des principaux cultivars de dattes de la région des zibans,” *Recherche Agronomique*.
- [13] Y. MIMOUNI, “Développement de produits diététiques hypoglycémiants à base de dattes molles variété «ghars»,” Ph.D. dissertation, Université de Ouargla.
- [14] K. DJAFRI, E. KHEMISSAT, M. BERGOUIA, and S. HAFOUDA, “Valorisation technologique des dattes de faible valeur marchande par la production du sirop,” *Recherche Agronomique*, p. 98.
- [15] I. CHIBANE and R. GHOUBAL, “La bio-production d’éthanol par *saccharomyces cerevisiae* cultivé sur milieu à base de déchets de dattes,” Master’s thesis, Université L’Arbi Ben Mhidi Oum El Bouaghi.
- [16] FitAudit. Nutritional information for dates. [Online]. Available : <https://fitaudit.com/food/114710/minerals>
- [17] A. BOULAL, “Contribution à l’étude de la microflore des dattes conservées par des méthodes traditionnelles (btana), et valorisation des dattes de faible valeur marchande,” Ph.D. dissertation, Université d’Oran 1 Ahmed Ben Bella.
- [18] B. Carburant. (2023) Tout sur le bioéthanol. Bioethanol Carburant. [Online]. Available : <https://www.bioethanolcarburant.com/tout-sur-le-bioethanol/>
- [19] A. Castillo, D. Cortes, C. Sorino, C. Soriño, M. El-Naas, and T. Ahmed, “Bioethanol production from waste and nonsalable date palm (*phoenix dactylifera* l.) fruits : Potentials and challenges,” *Sustainability*.
- [20] K. M. Oucif, “Mise en valeur des dérivés de dattes de la région d’oued souf pour la production de bioéthanol,” Ph.D. dissertation, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017.
- [21] I. Fennouche, “Production de bioéthanol à partir de résidus d’agriculture,” Master’s thesis, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2017.
- [22] S. Meriem, “Le bioéthanol : une véritable alternative pour une énergie propre,” *Recherche et Développement*, 2012.
- [23] C. Igwebuike, “Experimental study on the potential of different feedstock on second generation bioethanol production : setting a methodology,” Ph.D. dissertation, IMT Atlantique – Bretagne-Pays de la Loire (École Mines-Télécom Atlantique), 2024.
- [24] J. M. Brault, “Développement d’un procédé innovant de dégradation enzymatique des parois végétales pour la production de bioéthanol seconde génération,” Ph.D. dissertation, Université de Toulouse, 2024.

- [25] H. Deepthi and T. Ramachandra, "Third-generation bioethanol : status scope and challenges," *Energy and Wetlands Research Group*.
- [26] M. Gautier. Production d'éthanol dans le monde par pays en 2023. Statista.
- [27] (2007) Avantages du bioéthanol. [Online]. Available : <http://bioethanol2007.free.fr/avantages.html>
- [28] S. Chibi, "Contribution à la valorisation et la caractérisation des sous-produits de dattes dans la production du bioéthanol," Ph.D. dissertation, Université Saad Dahlab de Blida 1, 2020.
- [29] A. Boulal, Z. Benbrahim, B. Benali, and L. Segni, "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," *ResearchGate*, September 2013.
- [30] C. Leborgne, "Déterminants du comportement des pigments au cours de la fermentation alcoolique des vins rosés," Ph.D. dissertation, École doctorale GAIA, 2022.
- [31] M. Kechkar, "Procédé de conversion de la biomasse pour la production durable de biocarburants," Ph.D. dissertation, École nationale polytechnique, 2020.
- [32] I. Abbas and M. Belhadad, "Etude bibliographique de la fabrication des produits alimentaires par fermentation : Cas de *saccharomyces cerevisiae* en panification," Master's thesis, Université Mohammed El Bachir El Ibrahimi B.B.A, 2022.
- [33] A. Giwa and S. Chakraborty, "Techno-economic assessment of the sustainability of an integrated biorefinery from microalgae and jatropha : A review and case study," *Renewable and Sustainable Energy*, May 2018.
- [34] L. Butte College. Theory of fractional distillation. LibreTexts.
- [35] K. Sharma. Distillation : Definition, procedure, advantages, disadvantages, applications. Science Info.
- [36] J. R. Rumble, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 102nd ed. CRC Press, 2021. [Online]. Available : <https://www.routledge.com/CRC-Handbook-of-Chemistry-and-Physics/Rumble/p/book/9780367417246>
- [37] National Institute of Standards and Technology, "Ethanol – nist chemistry webbook," <https://webbook.nist.gov/chemistry/name-search/?q=ethanol>, consulté en mai 2025.