

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA



THESE

Présentée à la

**Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie des procédés**

Pour l'obtention du Diplôme de
Doctorat en Sciences : Génie des Procédés
Spécialité : Génie des Procédés

Présentée par :

FANDOUGOUMA Omar
Thème

**Production du Biodiesel à Partir des Noyaux de Quatre
Variétés de Palmiers Dattiers (H'mira, Takerbouchet, Tegazza
et Tinaceur) de la Région d'Adrar**

Soutenue le 15 Mai 2023 devant les membres du jury composé de :

Mr. SEGNI Ladjel	Professeur	Université d'Ouargla	Président
Mr. KALLOUM Slimane	Professeur	Université d'Adrar	Rapporteur
Mr. BRADAI Lyés	Professeur	Université d'Ouargla	Co-rapporteur
Mr. DJAFER Abderrahmane	Professeur	Université de Chlef	Examineur
Mr. MENNOUCHE Djamel	Professeur	Université d'Ouargla	Examineur
Mr. AGUEDAL Hakim	M.C.A	Université d'Adrar	Examineur
Mme. GHIABA Zineb	Professeur	Université d'Ouargla	Invitée

Année universitaire : 2022/2023

A la mémoire de Mon Frère Abderrahmane

A mes parents

A ma femme et mes enfants

A mes sœurs et mes frères

A ma famille

Avant-Propos

Le travail présenté dans ce manuscrit a été effectué, dans le **Laboratoire des Ressources Naturelles Sahariennes (LRNS)**, en collaboration avec le **Laboratoire de l'Energie, de l'Environnement et des Systèmes d'Information (LEESI)**, à l'université d'Ahmed Draïa- Adrar. Je tiens tout particulièrement à remercier leurs directeurs : Monsieur **Abdelkader IDDOU**, Professeur à l'université d'Adrar et Monsieur **Slimane KALLOUM**, Professeur à l'université d'Adrar, respectivement. Je les remercie de m'avoir accueilli dans ses laboratoires, de ses conseils ainsi que ses grandes convivialités et leurs connaissances du milieu scientifique.

Je remercie chaleureusement mon directeur de thèse, Professeur **Slimane KALLOUM**, de m'avoir encadré tout au long de ce travail sur un sujet porteur et passionnant. Il a été présent dans mes débuts incertains, dans mes moments de découragements ; il a su gérer mon stress sans jamais me faire part du sien, et surtout il m'a su faire découvrir le plaisir et la patience nécessaire dans la recherche. Toute ma reconnaissance pour son soutien et sa patience qu'il a su m'accorder pour mener à bien ce travail.

Mes remerciements s'adressent aussi à Monsieur **Lyés BRADAI**, Professeur à l'université d'Ouargla, qui a également encadré ce travail de recherche. Son écoute, ses connaissances, ses critiques et ses conseils constructifs m'ont guidé tout au long de cette thèse.

Je remercie tout particulièrement Monsieur **Ladjel SEGNI**, Professeur à l'université d'Ouargla, d'avoir accepté la présidence du jury de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma très grande considération et vive reconnaissance à Monsieur **Abderrahmane DJAFER**, Professeur à l'université de Chlef pour l'intérêt qu'il a manifesté pour ce travail en acceptant de faire partie du jury. Je suis très honoré de sa présence dans ce jury.

Que Messieurs **Hakim AGUEDAL**, Maitre de Conférence à l'université d'Adrar et Monsieur **Djamel MENNOUCHE**, Professeur à l'université d'Ouargla, trouvent mes plus sincères remerciements d'avoir accepté d'être membres du jury. Je les remercie vivement de l'intérêt qu'ils ont témoigné et pour le soin qu'ils ont apporté à examiner ce mémoire.

Je tiens à remercier également Monsieur **Dario COMPAGNONE**, Professeur à la faculté des sciences biologiques et de la technologie pour l'alimentation, l'agriculture et l'environnement, Université de Teramo en Italie, pour avoir accepté de m'accueillir au sein de son laboratoire sans oublier toute l'équipe de personnel et les doctorants.

Il m'est impossible d'oublier mes très chers amis et collègues « **Moustafa, Abdelaziz, et Mohammed Amine** » pour leurs aides précieuses, je suis ravie d'avoir travaillé en leur compagnie, ils ont toujours été là pour me soutenir. Ils ont toujours fait tous leurs possible pour m'aider.

Je remercie ma femme, ma famille et mes proches qui m'ont toujours encouragé durant toute la période de la formation de doctorat.

Abstract

Biodiesel is a renewable, biodegradable, and non-toxic biofuel, which refers to fatty acid alkyl esters, it has attracted considerable attention as an environmentally friendly alternative fuel for diesel engines. In this work, four cultivars of *Phoenix dactylifera* L. from southwestern Algeria are exploited for the first time in biodiesel production. The physicochemical characteristics and fatty acid composition of these oils were determined. The biodiesel is obtained by transesterification of the oils extracted from the seeds of the four cultivars. FT-IR spectroscopy analysis confirmed the synthesis of biodiesel, with the removal of glycerol initially present in the extracted oils. GC-FID analysis showed that these oils can be classified as oleic-lauric oils, very rich in C18:1 oleic acid (44.74-47.99%) and C12:0 lauric acid (15.29-19.80%). In this study, we valorized the date seeds generally considered waste. This valorization resulted in finished products: oil and biodiesel.

Keywords: Biodiesel, Oils, *Phoenix dactylifera* L., FT-IR, GC-FID.

ملخص

الديزل الحيوي هو وقود حيوي متجدد وقابل للتحلل الحيوي وغير سام، وهو عبارة عن استرات ألكيل الأحماض الدهنية، وقد جذب اهتمامًا كبيرًا كوقود بديل صديق للبيئة لمحركات الديزل. في هذا العمل، تم استغلال أربعة أصناف من أعلاف النخيل (*Phoenix dactylifera* L) من جنوب غرب الجزائر لأول مرة في إنتاج وقود الديزل الحيوي. تم تحديد الخصائص الفيزيائية والكيميائية وتركيب الأحماض الدهنية لهذه الزيوت. تم الحصول على وقود الديزل الحيوي عن طريق الأسترة التبادلية للزيوت المستخرجة من بذور الأصناف الأربعة. أكد التحليل الطيفي FT-IR الى إنتاج وقود الديزل الحيوي، مع إزالة الجلسرين الموجود في البداية في الزيوت المستخرجة. أظهر تحليل GC-FID أن هذه الزيوت يمكن تصنيفها على أنها زيوت أوليك-لوريك، غنية جدًا بحمض الأوليك (44.74-47.99 %) وحمض اللوريك (15.29-19.80 %). في هذه الدراسة، قمنا بتثمين أعلاف التمور والتي تعتبر بشكل عام كمخلفات غير مستغلة. نتج عن هذا التثمين منتجات نهائية: الزيت والديزل الحيوي.

كلمات مفتاحية: الديزل الحيوي، الزيوت، *Phoenix dactylifera* L، FT-IR، GC-FID.

Résumé

Le biodiesel, est un biocarburant renouvelable, biodégradable et non toxique, qui désigne les esters alkyliques d'acides gras, il a suscité une attention considérable en tant que carburant de substitution respectueuse de l'environnement pour les moteurs diesel. Dans ce travail, quatre cultivars de *Phoenix dactylifera* L. du sud-ouest de l'Algérie sont exploités pour la première fois dans la production de biodiesel. Les caractéristiques physico-chimiques et la composition en acides gras de ces huiles ont été déterminées. Le biodiesel est obtenu par transestérification des huiles extraites des noyaux des quatre cultivars. L'analyse par spectroscopie FT-IR a confirmé la synthèse des biodiesels, avec l'élimination du glycérol initialement présent dans les huiles extraites. L'analyse GC-FID a montré que ces huiles peuvent être classées comme des huiles oléiques-lauriques, très riches en acide oléique C18:1 (44,74-47,99%) et en acide laurique C12:0 (15,29-19,80%). Dans cette étude, nous avons valorisé les noyaux de dattes généralement considérées comme des déchets. Cette valorisation a abouti à des produits finis : huile et biodiesel.

Mots clés : Biodiesel, Huiles, *Phoenix dactylifera* L., FT-IR, GC-FID.

Sommaire

Dédicace	i
Avant-propos	ii
Abstract	iv
ملخص	v
Résumé	vi
Abréviations, Symboles & Unités utilisées	x
Liste des Figures	xii
Liste des Tableaux	xv

Introduction

Introduction Générale	1
Références bibliographiques	7

Chapitre I : Etude Bibliographique du Palmiers Dattiers

I.1- Généralités & historiques du palmier dattier	9
I.2- Distribution géographique & production mondiale	10
I.2.1- Dans le monde	10
I.2.2- En Algérie	13
I.3- Description systématique et botanique	16
I.3.1. Description botanique	16
I.3.2. Stipe	19
I.3.3. Feuilles	20
I.3.4. Fruit	21
I.3.5. Noyaux	24
I.4- Reproduction du palmier dattier	25
I.5- Ecologie du palmier dattier	25
I.6- Différentes utilisations du palmier dattier	27
I.7- Composition chimique des dattes & noyaux du palmier dattier	33
Références bibliographiques	38

Chapitre II : Biocarburants & Production du Biodiesel

II.1- Généralité	43
------------------------	----

II.2-	Contexte historique	43
II.3-	Classification des biocarburants	44
II.3.1-	Biocarburants de première génération	45
a)-	Ressources de bioalcools	45
b)-	Ressources de biodiesel	47
II.3.2-	Biocarburants de deuxième génération	48
a)-	Ressources de bioalcool et de biogaz	49
b)-	Ressources de biodiesel	50
II.3.3-	Biocarburants de Troisième génération	51
a)-	Ressources de bioalcools	52
b)-	Ressources de biodiesel	54
II.4-	Caractéristiques des biocarburants	55
II.5-	Procédés de production de biodiesel	58
II.6-	Production & consommation mondiale de biodiesel	64
	Références bibliographiques	67

Chapitre III : Matériels & Méthodes

III.1-	Échantillonnage	74
III.2-	Préparation des noyaux de dattes	76
III.3-	Extraction de l'huile	77
III.4-	Synthèse & production de biodiesel	77
III.5-	Caractérisation physicochimique	78
III.5.1-	Densité (Gravité spécifique) ; d	78
III.5.2-	Indice de réfraction ; n_D^{20}	79
III.5.3-	Indice d'iode ; I_I	80
III.5.4-	Indice de saponification ; I_S	82
III.5.5-	Indice d'acide ; I_A	83
III.5.6-	Nombre de Cétane ; N_C	84
III.5.7-	Pouvoir calorifique supérieur ; PCS	86
III.6-	Analyse par spectroscopie Infrarouge	87
III.7-	Analyses chromatographiques CPG–DIF	88
	Références bibliographiques	90

Chapitre IV : Résultats & Discussions

IV.1-	Extraction, composition & propriétés physico-chimiques des huiles	94
IV.1.1-	Teneur en huile	94
IV.1.2-	Analyses Chromatographiques CG–FID	95
IV.1.3-	Propriétés Physico-chimiques des huiles extraites	96

a)-Densité ; d	97
b)-Indice de réfraction ; n_D^{20}	98
c)- Indice d'iode, I_I	99
d)-Indice de saponification, I_S	100
e)- Acidité libre et l'Indice d'acide, I_A	101
f)- Indice de cétane, I_C	103
g)- Pouvoir Calorifique Supérieur, PCS	104
IV.1.4- Analyses Spectroscopiques FTIR	104
IV.2- Production & propriétés de biodiesel	107
IV.2.1- Rendement de biodiesel	107
IV.2.2- Propriétés physicochimiques de biodiesel synthétisé	108
a)-Densité ; d	108
b)-Indice d'iode I_I	110
c)- Indice de saponification I_S	111
d)-Acidité Libre & l'Indice d'acide, I_A	112
e)- Indice de cétane, I_C	113
f)- Pouvoir Calorifique Supérieur, PCS	114
IV.2.3- Analyses Spectroscopiques FTIR	115
Références bibliographiques	118
<hr/> Conclusion <hr/>	
Conclusion Générale	125

Abréviations, Symboles & Unités utilisées

AG	Acide Gras ;
AGL	Acide Gras Libre ;
AGMI	Acide Gras Mono-Insaturé ;
AGPI	Acide Gras Poly-Insaturé ;
AGS	Acide Gras Saturé ;
ASTM	Société américaine pour les essais et les matériaux (American Society for Testing and Materials : en Anglais)
BD	Biodiesel ;
CE	Conductivité Electrique ;
cm	Centimètre ;
d	Densité ;
°	Degré ;
°C	Degré Celsius ;
DI	Degré d'Insaturation ;
dS.m⁻¹	DeciSiemens par mètre ;
eds.	Editions ;
EMAG	Ester Méthylique de l'Acide Gras ;
EN	Norme européen (European Norm : en Anglais) ;
FAO	Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (Food and Agriculture Organization : en Anglais) ;
FT-IR	Infrarouge à transformée de Fourier (Fourier Transform InfraRed : en Anglais) ;
g	Gramme;
GES	Gaz à Effet de Serre ;
g I₂/100 g	Gramme de diiode par 100 grammes de l'échantillon ;
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié;
GC-FID	Chromatographie en phase gazeuse à détection par ionisation de flamme (Gas Chromatograph-Flame Ionization Detector ; en Anglais);
h	Heure ;
ha	Hectare ;
HDL	Lipoprotéine à haute densité (High Density Lipoprotein : en Anglais) ;
Hm	H'mira (Variété de dattes) ;
HV	Huile Végétale ;
I_A	Indice d'Acide ;

I_C	Indice de Cétane ;
I_I	Indice d'Iode ;
I_P	Indice de Peroxyde ;
n_D²⁰	Indice de réfraction ;
I_S	Indice de Saponification ;
kg	Kilogramme ;
L	Litre ;
L.	Linné ;
LDL	Lipoprotéine de basse densité (Low Density Lipoprotein ; en Anglais) ;
m	Mètre ;
mg	Milligramme ;
mg KOH/ g	Milligramme de KOH par un gramme de l'échantillon ;
min	Minute ;
MJ	Méga Joule ;
μM	Micro Molaire ;
mL	Millilitre ;
mm²/sec	Millimètre carré par seconde ;
mol	Mole ;
N	Normalité ;
N_C	Nombre de Cétane ;
OCDE	Organisation de Coopération et Développement Economique ;
%	Pourcent ;
PCS	Pouvoir Calorifique Supérieur ;
ppm	Partie Par Million ;
TG	Triglycéride ;
Tg	Teggaza (Variété de dattes) ;
Tk	Takerbouchet (Variété de dattes) ;
Tn	Tinaceur (Variété de dattes) ;
UE	Union européenne (Union European : en Anglais) ;
US	États-Unis (United States : en Anglais) ;
USA	États-Unis d'Amérique (United States of America : en Anglais) ;
UV	Ultraviolet ;
VCB	Valeur Calorifique Brute.

Liste des Figures

Figure 01 :	Photo du Palmier dattier.....	09
Figure 02 :	Le palmier dattier dans l'ère sumérienne.....	10
Figure 03 :	Carte mondiale des pays producteurs de dattes en fonction de la répartition des surfaces (en gris nuancé) et de la quantité produite (en colonnes).....	11
Figure 04 :	Dix principaux pays producteurs de dattes (en tonnes) dans le monde (FAOstat, 2019).....	12
Figure 05 :	Quelques variétés de dattes dans le monde.....	13
Figure 06 :	Carte de l'Algérie indiquant les différentes zones des palmiers dattiers.....	14
Figure 07 :	Répartition de la production de dattes dans la région d'Adrar.....	16
Figure 08 :	Port de la plante.....	17
Figure 09 :	Figuration schématique du palmier dattier.....	19
Figure 10 :	Forme du Stipe.....	20
Figure 11 :	Palme (Feuille).....	21
Figure 12 :	Forme du Fruit (Datte).....	21
Figure 13 :	Cinq stades de croissance des dattes.....	22
Figure 14 :	Longueur/Largeur de la cavité de la datte.....	22
Figure 15 :	Forme de la chair (Mésocarpe/Epicarpe).....	23
Figure 16 :	Longueur de la partie ramifiée de la hampe florale.....	23
Figure 17 :	Forme des épillets.....	24
Figure 18 :	Longueur and largeur du noyau.....	24
Figure 19 :	Formes de noyau.....	25
Figure 20 :	Troncs de palmier utilisés pour la fabrication de toits.....	28
Figure 21 :	Troncs de palmier dattier utilisés pour la fabrication de portes.....	29
Figure 22 :	Tressage de feuilles de palmier dattier pour la construction d'un abri.....	30
Figure 23 :	Récipients à usage domestique et cordons fabriqués à main à partir de feuillettes de palmiers dattiers.....	31

Figure 24 :	Structures de quelques composés chimiques présents dans les dattes.....	33
Figure 25 :	Structure chimique de Saccharose.....	34
Figure 26 :	Structures chimiques de l'acide caffeoylshimique et caféique.....	35
Figure 27 :	Structures chimiques de quelques vitamines présentes dans les dattes.....	35
Figure 28 :	Structures chimiques de quelques acides aminés présents dans les dattes.....	36
Figure 29 :	Structures chimiques de quelques acides gras présents dans les dattes.....	37
Figure 30 :	Différentes matières premières de biocarburants.....	45
Figure 31 :	Structure chimique de la cellulose et de l'hémicellulose.....	46
Figure 32 :	Structure chimique de l'amidon.....	53
Figure 33 :	Étapes schématiques de la transestérification catalysée par la base.....	60
Figure 34 :	Étapes schématiques de la transestérification catalysée par un acide.....	61
Figure 35 :	Étapes schématiques de la transestérification enzymatique.....	63
Figure 36 :	Diagramme schématique de la production de biodiesel.....	64
Figure 37 :	Consommation mondiale de biodiesel.....	66
Figure 38 :	Localisation géographique de la Wilaya d'Adrar. Régions d'échantillonnage: A) Zaouiet Kounta ; B) Bouda ; C) Reggane.....	74
Figure 39 :	Aperçu des dattes utilisées.....	76
Figure 40 :	Géométrie typique de l'indice de réfraction.....	79
Figure 41 :	Valeurs des densités de variétés Hm, Tk, Tg et Tn.....	98
Figure 42 :	Valeurs des indices de réfraction de variétés Hm, Tk, Tg et Tn.....	99
Figure 43 :	Valeurs des indices d'iode de variétés Hm, Tk, Tg et Tn.....	100
Figure 44 :	Valeurs des indices de saponification de variétés Hm, Tk, Tg et Tn.....	101
Figure 45 :	Valeurs des indices d'acide de variétés Hm, Tk, Tg et Tn.....	102
Figure 46 :	Valeurs de l'acidité (AGL %) de variétés Hm, Tk, Tg et Tn.....	102
Figure 47 :	Valeurs des indices de cétane de variétés Hm, Tk, Tg et Tn.....	103
Figure 48 :	Valeurs de pouvoir calorifique supérieur de variétés Hm, Tk, Tg et Tn.....	104
Figure 49 :	Spectre FTIR des huiles : A: H'mira (Hm), B: Takerbouchet (Tk), C: Teggaza (Tg) and D: Tinaceur (Tn).....	106
Figure 50 :	Valeurs des densités de biodiesels d'Hm, Tk, Tg et Tn.....	109

Figure 51 :	Valeurs des indices de réfraction de biodiesel d'Hm, Tk, Tg et Tn.....	110
Figure 52 :	Valeurs des indices d'iode de biodiesel d'Hm, Tk, Tg et Tn.....	110
Figure 53 :	Valeurs des indices de saponification de biodiesel d'Hm, Tk, Tg et Tn.....	111
Figure 54 :	Valeurs des indices d'aide de biodiesel d'Hm, Tk, Tg et Tn.....	112
Figure 55 :	Valeurs de l'acidité % de biodiesel d'Hm, Tk, Tg et Tn.....	113
Figure 56 :	Valeurs des indices de cétane de biodiesel d'Hm, Tk, Tg et Tn.....	114
Figure 57 :	Valeurs des pouvoirs calorifiques supérieurs de biodiesels d'Hm, Tk, Tg et Tn.....	115
Figure 58 :	Spectre FTIR des biodiesels : A: H'mira (Hm), B: Takerbouchet (Tk), C: Teggaza (Tg) and D: Tinaceur (Tn).....	116

Liste des Tableaux

Tableau 01 :	Inventaire variétal dans les trois régions phoenicicoles d'Algérie.....	15
Tableau 02 :	Événements initiaux des biocarburants.....	44
Tableau 03 :	Caractéristiques des biocarburants de première génération.....	56
Tableau 04 :	Caractéristiques des biocarburants de deuxième génération.....	57
Tableau 05 :	Les normes internationales (Biodiesel).....	58
Tableau 06 :	Caractéristiques des variétés utilisées.....	75
Tableau 07 :	Teneurs en huile (en %)......	94
Tableau 08 :	Composition en acide gras dans les huiles Hm, Tk, Tg et Tn.....	95
Tableau 09 :	Propriétés physicochimiques des huiles extraites.....	97
Tableau 10 :	Groupes fonctionnels et Modes de vibration des huiles extraites (en cm^{-1}).....	105
Tableau 11 :	Rendement en biodiesel (en %)......	107
Tableau 12 :	Propriétés physicochimiques des biodiesels synthétisés.....	108

Introduction

INTRODUCTION

Actuellement, les combustibles fossiles sont les principaux responsables de la satisfaction de la demande mondiale totale d'énergie et restent la principale source du scénario d'approvisionnement énergétique mondial [1]. Cependant, la demande de combustibles fossiles a augmenté de façon spectaculaire en raison de l'augmentation rapide de l'industrialisation et de la population humaine. Cette augmentation rapide de la consommation de pétrole a attiré l'attention sur la disponibilité et les problèmes environnementaux dus à la combustion de combustibles fossiles [1-2]. Enfin, les combustibles fossiles constituent la principale matière première de l'industrie chimique. Des milliards de dollars d'infrastructures ont été créés au cours de nombreuses décennies pour produire, distribuer, stocker et utiliser les combustibles fossiles liquides. À titre d'exemple, les investissements mondiaux dans l'approvisionnement en pétrole et en gaz ont représenté à eux seuls 2,03 billions de dollars en 2018-2020 [2].

L'une des plus importantes sources d'énergie, la biomasse constitue une source précieuse. L'utilisation de la biomasse comme source d'énergie est un moyen de réduire les préoccupations liées à l'utilisation des combustibles fossiles et peut également contribuer à réduire les crises énergétiques auxquelles le monde est confronté. La biomasse est utilisée depuis les temps anciens à petite échelle pour un usage domestique en raison de ses effets positifs sur l'environnement, de sa haute densité énergétique et de ses applications dans les biocarburants, les produits chimiques et les matériaux [1, 3]. La conversion durable des produits de la biomasse et l'utilisation de différents résidus issus de l'agriculture peuvent jouer un rôle important dans la réduction des déchets en plusieurs phases [3].

Les déchets de la biomasse ont un fort potentiel d'utilisation comme source d'énergie. Un aspect intéressant de l'utilisation de la biomasse est son caractère renouvelable, qui permet de garantir que les sources ne seront pas épuisées [4]. La biomasse du palmier dattier est une ressource naturelle renouvelable qui n'a pas été largement utilisée dans l'industrie, et peut être considérée comme une alternative à l'énergie conventionnelle combinée à d'autres sources d'énergie renouvelables [5-6].

Les palmiers dattiers produisent d'énormes quantités de déchets agricoles sous forme de feuilles, tronc, noyaux, pédicelles, etc. Ces sous-produits ont diverses utilisations traditionnelles dans les régions subsahariennes. Alors, il est nécessaire de transformer les déchets du palmier dattier en produits utiles pour un rendement économique, à titre d'exemple, les nervures médianes ont été utilisées pour les toitures, les clôtures, la fabrication de meubles, de caisses et de cages. Les feuilles ont été utilisées dans la fabrication de nattes, de paniers, de sacs, de cordes, de filets, des balais et de chasse-mouches. Les tiges ont été utilisées pour fabriquer des balais et des tamis domestiques. En outre, les fibres obtenues à partir des tiges ont été utilisées pour lier les cultures agricoles. Le tronc du palmier a été utilisé comme linteaux de fenêtres, poutres et colonnes dans la construction. De plus, les troncs ont été utilisés comme substitut de bois dans la fabrication de meubles [7, 8].

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) est un membre de la famille des *Arecaceae*, également connue sous le nom de *Palmaceae*. Il existe actuellement plus de 2000 variétés ou cultivars différents dans le monde, mais seul un nombre limité d'entre eux est apprécié pour la qualité de ses fruits [9].

L'origine exacte de *Phoenix dactylifera* L. est inconnue, mais il semble que cette plante ait pu être domestiquée dans la région sud de l'Irak actuel il y a au moins 4000 ans, selon les preuves archéologiques de l'ancienne Mésopotamie. Cette plante a été cultivée par de nombreuses cultures, comme les Sumériens, les Assyriens, les Babyloniens et, plus tard, les cultures d'Asie occidentale [10]. Les caractéristiques uniques du palmier dattier peuvent être véritablement appelées "arbre de vie"; et est une plante considérée comme l'une des cultures de base les plus anciennes en Asie du Sud-Ouest et en Afrique du Nord. En outre, les dattes peuvent être cultivées en Australie, au Mexique, en Amérique du Sud, en Afrique du Sud et aux États-Unis, notamment dans le sud de la Californie, en Arizona et au Texas [11-12]. Les fruits du palmier dattier sont couramment consommés et constituent un élément essentiel de l'alimentation dans de nombreuses régions du monde [13].

Les fruits de dattes ont un énorme potentiel d'utilisation comme aliment en raison de leur valeur nutritionnelle et économique. Les fruits de dattes contiennent

6,5 à 11,5 % de fibres alimentaires totales, environ 1 % de matières grasses, 2 % de protéines et 2 % de cendres et sont une riche source d'antioxydants phénoliques (1 à 2 %) [14].

Les variations de la composition chimique des fruits de dattes devraient influencer leur valeur nutritionnelle, leur qualité sensorielle et leur utilisation industrielle. Les noyaux de dattes, qui représentent 10 à 15 % du fruit entier [14].

Les noyaux de dattes présentent une bonne composition chimique avec des quantités élevées de glucides, de protéines et de lipides. En outre, ces noyaux de dattes sont riches en fibres alimentaires, en composés phénoliques et en antioxydants, qui pourraient protéger contre les principales maladies chroniques, telles que différents types de cancer et de maladies cardiovasculaires, et contribuer à réduire la pression artérielle et à normaliser la glycémie, et peuvent être utilisées pour améliorer la teneur en fibres de certains produits alimentaires [9, 14].

La valorisation des sous-produits organiques issus de l'industrie alimentaire a suscité l'intérêt de nombreux chercheurs pour deux objectifs principaux : la protection de l'environnement et l'exploitation économique des résidus organiques [9].

Les déchets alimentaires sont un problème inévitable dans l'industrie alimentaire mondiale ; plus de 30 % des aliments sont envoyés dans des décharges ou des incinérateurs. Ce flux de déchets représente une source d'énergie prometteuse, notamment pour la production de biodiesel à partir de matériaux tels que les résidus de café et les huiles de cuisson usagées. Récemment, les noyaux de palmier dattier du désert ont également été proposées comme matière première végétale potentielle pour la production de biodiesel [15].

Le noyau de datte représente une quantité importante de déchets, Ainsi, selon les statistiques de FAO, 2019 ; environ plus de 800 000 tonnes de noyaux de dattes pourraient être produites annuellement. Conventionnellement, dans la plupart des pays producteurs, les noyaux de dattes sont négligés ou partiellement incorporés dans l'alimentation animale, ou utilisées comme engrais [9, 16]. Ils constituent un bon précurseur pour la production de charbon actif [17].

Cependant, les noyaux de dattes sont des sous-produits facilement valorisables dans les industries de transformation technologique ou biologique des dattes. En outre, la non-utilisation de ce sous-produit pour l'alimentation humaine constitue une véritable perte économique, qui peuvent être utilisés comme biocarburants ou comme composants thérapeutiques [9]. Les teneurs en huile végétale des différents noyaux de dattes ont été obtenues dans une fourchette de pourcentage de 5–13 %. L'huile de noyaux de dattes pourrait être considérée comme une huile comestible et être utilisée dans les cosmétiques et les produits pharmaceutiques. L'huile de datte est principalement composée de quatre acides gras, à savoir l'acide oléique, l'acide laurique, l'acide linoléique et l'acide palmitique. La teneur en acides gras saturés de l'huile de datte est très élevée [18]. Les noyaux de palmier dattier peuvent donc être utilisés comme source pour la production de biocarburant. Les résidus du palmier-dattier représentent un fardeau économique et environnemental à gérer. Il est intéressant de noter que les noyaux de dattes contiennent des composés volatils qui représentent 15 à 20 % de la matière et peuvent servir de source potentielle pour la production de biocarburant [1].

Le biodiesel a suscité un intérêt particulier en raison de son caractère moins polluant et renouvelable par rapport au carburant diesel à base de pétrole, et il constitue un substitut renouvelable au diesel à base de pétrole [18]. Le biodiesel, est un mélange d'esters méthyliques d'acides gras (EMAG), est généralement produit à partir de matières premières riches en huile, telles que les huiles végétales, les graisses animales, les huiles de cuisson usagées et les lipides de microalgues. Commercialement, la production s'effectue par transestérification à l'aide de catalyseurs alcalins [19].

Le biodiesel a été largement étudié ces dernières années, car il peut offrir des possibilités intéressantes en termes de réduction des gaz à effet de serre (GES) et des émissions polluantes, ainsi qu'en termes de diversification des sources d'énergie [20].

L'objectif principal de ce présent travail s'inscrit dans le contexte énergétique, en particulier dans la production et la synthèse de biocarburant à partir des noyaux de quelques variétés de dattes endémiques de la région d'Adrar.

La biodisponibilité et l'abondance de ces variétés dans la région, et leur importance socioéconomique.

Pour réaliser notre étude pratique, deux aspects se dégagent : le premier sera intéressé à la production de biodiesel à partir des huiles issues à partir de l'extraction hexanolique des noyaux des variétés de dattes H'mira, Takerbouchet, Teggaza et Tinaceur. Le deuxième consacrera à la composition en huile a été prouvée par l'analyse CG-FID, et L'analyse par spectroscopie FTIR a confirmé la synthèse des biodiesels.

Le manuscrit sera donc articulé de la manière suivante :

Dans un premier chapitre, nous présenterons succinctement une description sur le palmier dattier *Phoenix dactylifera* L. (géographique, systématique, botanique et morphologique), en se rattachant surtout à leur composition chimique et à leur production dans le monde et dans l'Algérie.

Le deuxième chapitre est une étude bibliographique, étudiant tout d'abord le contexte historique de la production de biocarburants, la classification et les ressources de ces biocarburants, ses caractéristiques physicochimiques ainsi que les différents procédés de production de biodiesel. Ce chapitre a aussi porté sur la consommation mondiale de biodiesel.

Le troisième chapitre est consacré aux matériels et méthodes mis en œuvre dans le cadre du travail expérimental réalisé au laboratoire. Il s'agit d'abord d'une description morphologique de différentes variétés de palmiers dattiers utilisés dans ce travail, d'une description détaillée sur la préparation préliminaire des noyaux de dattes et leur extraction, suivi par le protocole de production de biodiesel. Ensuite, nous présenterons les différentes méthodes physicochimiques et les modes opératoires utilisés. La composition en huiles et l'analyse spectroscopiques des huiles extraites et des biodiesels synthétisés ont été effectué par la chromatographie CG-FID et la spectromètre FTIR, respectivement.

Les résultats de l'extraction des huiles, la production de biodiesel, et les propriétés physicochimiques, ainsi leurs discussions font l'objet du quatrième chapitre.

Nous terminerons par une conclusion rassemblant les résultats les plus pertinents et quelques perspectives jugées utiles pour ce travail.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]– Al-Muhtaseb, A.H., Jamil, F., Al-Haj, L., Zar Myint, M.T., Mahmoud, E., Ahmad, M.N.M., Rafiq, S. Biodiesel Production Over a Catalyst Prepared from Biomass-derived Waste Date Pits. *Biotechnology Reports*, **2018**, *20*, e00284.
- [2]– Forsberg, C.W., Dale, B.E., Jones, D.S., Hossain, T., Morais, A.R.C., and Wendt, L.M. Replacing Liquid Fossil Fuels and Hydrocarbon Chemical Feedstocks with Liquid Biofuels from Large-scale Nuclear Biorefineries. *Applied Energy*, **2021**, *298*, 117225.
- [3]– Tahir, A.H.F., Al-Obaidy, A.H.M.J., and Mohammed, F.H. Biochar from Date Palm Waste, Production, Characteristics and Use in the Treatment of Pollutants: A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **2020**, *737*, 012171.
- [4]– Sulaiman, A., Bamufleh, S.S.H., Tamili N.A.S., Inayat, M., and Naz, Y.M. Characterization of Date Palm Fronds as a Fuel for Energy Production. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, **2017**, *30(3)*, 465.
- [5]– Khalida, B., Mohamed, Z., Belaid, S., Samir, H.O., Sobhi, K. and Midane, S. Prediction of Higher Heating Value HHV of Date Palm Biomass Fuel using Artificial Intelligence Method. *8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, **2019**, pp. 59-62.
- [6]– Amirou, S., Zerizer, A., Pizzi, A., Haddadou, I., and Zhou, X. Particleboards Production from Date Palm Biomass. *European Journal of Wood and Wood Products*, **2013**, *71(6)*, 717–723.
- [7]– Mously, I.H., and Darwish, E.A. *Date Palm Byproducts: History of Utilization and Technical Heritage*. In: Midani, M., Saba, N., Alothman, O.Y. (eds) *Date Palm Fibre Composites. Composites Science and Technology*. Springer, Singapore, **2020**, pp. 3–71.
- [8]– Ahmad, A., Naqvi, S.A., Jaskani, M.J., Waseem, M., Ali, E., Khan, I.A., Aadil, R.M. Efficient Utilization of Date Palm Waste for the Bioethanol Production Through *Saccharomyces Cerevisiae* Strain. *Food Science & Nutrition*, **2021**, *9(4)*, 2066–2074.
- [9]– Souda, B., Rami, R., Jalloul, B., and Mohamed, D. Roasted Date Palm Seeds (*Phoenix dactylifera*) as an Alternative Coffee: Chemical Composition and Bioactive Properties. *Biomass Conversion and Biorefinery*, **2020**,

- [10]– Ortiz-Uribe, N., Salomón-Torres, R., and Krueger, R. Date Palm Status and Perspective in Mexico. *Agriculture*, **2019**, *9*(3), 46.
- [11]– Al-Alawi, R.A., Al-Mashiqri, J.H., Al-Nadabi, J.S.M., Al-Shihi, B.I., and Baqi, Y. Date Palm Tree (*Phoenix dactylifera* L.): *Natural Products and Therapeutic Options*. *Frontiers in Plant Science*, **2017**, *8*.
- [12]– Jain, S. Date Palm Biotechnology: Current Status and Prospective- An Overview. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, **2017**, *24*(5), 386–399,
- [13]– Al-Turki, S., Shahba, M.A and Stushnoff, C. Diversity of Antioxidant Properties and Phenolic Content of Date Palm (*Phoenix dactylifera* L.) Fruits as Affected by Cultivar and Location. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, **2010**, *8*(1), 253–260.
- [14]– Ghnimi, S., Umer, S., Karim, A., and Kamal-Eldin, A. Date Fruit (*Phoenix dactylifera* L.): An Underutilized Food Seeking Industrial Valorization. *NFS Journal*, **2017**, *6*, 1–10.
- [15]– Kamil, M., Ramadan, K., Olabi, A.G., Ghenai, C., Inayat, A., and Rajab, M.H. Desert Palm Date Seeds as a Biodiesel Feedstock: Extraction, Characterization, and Engine Testing. *Energies*, **2019**, *12*(16), 3147.
- [16]– Najjar, Z., Stathopoulos, C., and Chockchaisawasdee, S. Utilization of Date By-Products in the Food Industry. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, **2020**, *32*(11), 808–815,
- [17]– Shanab, S.M.M., Hanafy, E.A. and Shalaby, E.A. Biodiesel Production and Antioxidant Activity of Different Egyptian Date Palm Seed Cultivars. *Asian Journal of Biochemistry*, **2014**, *9*: 119-130.
- [18]– Demirbas, A. Utilization of Date Biomass Waste and Date Seed as Bio-fuels Source. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, **2017**, *39*(8), 754–760.
- [19]– Al-Zuhair, S. Taher, H., Al Dhaheri, S., Wajeih, S., Nour, M. and El-Najjar, E. Biodiesel Production from Oils Extracted from Date Pits. *Green and Sustainable Chemistry*, **2017**, *7*, 48–56.
- [20]– Millo, F., Vlachos, T., and Piano, A. Physicochemical and Mutagenic Analysis of Particulate Matter Emissions from an Automotive Diesel Engine Fuelled with Fossil and Biofuel Blends. *Fuel*, **2021**, *285*, 119092.

Chapitre I :
Etude Bibliographique
du Palmiers Dattiers

I.1-GENERALITES & HISTORIQUES DU PALMIER DATTIER

Selon Alexander Von Humboldt, « *ce qui distingue surtout les palmiers, c'est une physionomie et un port majestueux qu'il est difficile de représenter par des paroles... La direction des feuilles est, avec l'axe tracé par leur tige, ce qui contribue le mieux à donner aux palmiers cet air de majesté souveraine...* » [1].

Les preuves de la culture du palmier dattier remontent à 4 000 avant JC., dans ce qui est aujourd'hui le sud de l'Irak. Le palmier dattier (Figure 01) se trouve au Proche-Orient, en Afrique du Nord et sur le continent américain, où il est cultivé commercialement en grandes quantités [1].



Figure 01 : Photo du Palmier dattier.

L'origine du palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) reste toujours un problème, et donne lieu à de nombreuses hypothèses classées en deux groupes. Celle qui font parvenir le dattier d'une ou de plusieurs espèces de *Phoenix* réparties dans son aire actuelle de culture et plus ou moins passées dans les formes cultivées. Celle de second groupe font parvenir le dattier cultivé d'un *Phoenix* existant encore dans son aire actuelle de culture ou au voisinage de celle-ci. La majorité des botanistes sont d'accord pour considérer la zone désertique

orientale (Irak, Mésopotamie) comme sa partie originelle. Il a été suggéré que les Sumériens (4 000– 3 000 Avant JC.) étaient les premiers à cultiver le palmier dattier (Figure 02). Ils ont utilisé ses fruits comme aliment de base dans la vallée du Tigre-Euphrate [2–5].



Figure 02 : Le palmier dattier dans l'ère sumérienne.

I.2- DISTRIBUTION GEOGRAPHIQUE & PRODUCTION MONDIALE

I.2.1- Dans le monde

Le palmier dattier est une plante des déserts chauds, dans le microclimat oasien. Inexistante dans les déserts froids, elle est cultivée dans la partie sud du bassin méditerranéen, avec une extension marquée vers les pays du golfe persique [3]. *P. dactylifera* est maintenant présent dans les régions tropicales et subtropicales du monde entier ainsi que dans les régions tempérées et arides des Etats-Unis, d'Australie, du sud de l'Espagne, de la côte méditerranéenne d'Afrique et d'Asie occidentale [6].

Le palmier-dattier peut être cultivé sur les cinq continents du monde, principalement entre les latitudes 39° nord et 20° sud. Cependant, la principale région de production est le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord, où 89% des dattes sont produites (Figure 03). Ces dernières années, le nombre de palmiers dattiers plantés dans cette région a connu une forte augmentation [7].



Figure 03 : Carte mondiale des pays producteurs de dattes en fonction de la répartition des surfaces (en gris nuancé) et de la quantité produite (en colonnes).

Le palmier dattier fut introduit sur les côtes orientales de l’Afrique par les arabes au début de XVI^{ème} siècle. Dès le début de XIX^{ème} siècle, des palmiers dattiers, en petit nombre, ont été plantés au Pérou, en Argentine, en Afrique du sud, au Mexique et en Australie. Aux Etats Unis, des plantations de création récente existent aussi dans la vallée du sud de la Californie, en Arizona et dans le nord-ouest du Mexique, et quelques plantations en Amérique du Sud importés de l’Algérie, d’Irak et de l’Egypte, durant les années 1911 et 1922 [3, 8–10]. Il existe également des plantations de palmiers dattiers dans les déserts australiens du Queensland. En dehors des régions mentionnées ci-dessus, et lorsque les hivers ne sont pas trop froids, le palmier dattier poussera, mais ne fructifiera pas correctement [8].

L’Egypte est le plus grand producteur mondial de palmiers dattiers avec une production totale atteignant 1 603 762 tonnes en 2019. Dans ce pays, les types de palmiers dattiers sont classés en fonction des conditions géographiques, à savoir doux (43,5 %), semi-arides (19 %), et arides (2,5 %) (FAOstat, 2019). Sur le plan agronomique, les palmiers dattiers de ce pays de la Pyramide sont principalement plantés dans la vallée du Nil, avec une production qui atteint 1/3 de la production nationale de l’Egypte [11]. Le deuxième plus grand producteur mondial de palmiers dattiers en 2019, est l’Arabie saoudite, avec une production totale de 1 539 756 tonnes (FAOstat, 2019), provenant de 25 millions palmiers

pour une superficie de 170 000 ha [12]. Suivi par l'Iran (1 307 908 tonnes) (FAOstat, 2019), l'Algérie (1 136 025) [13] et l'Iraq (639 315 tonnes) [5] (Figure 04).

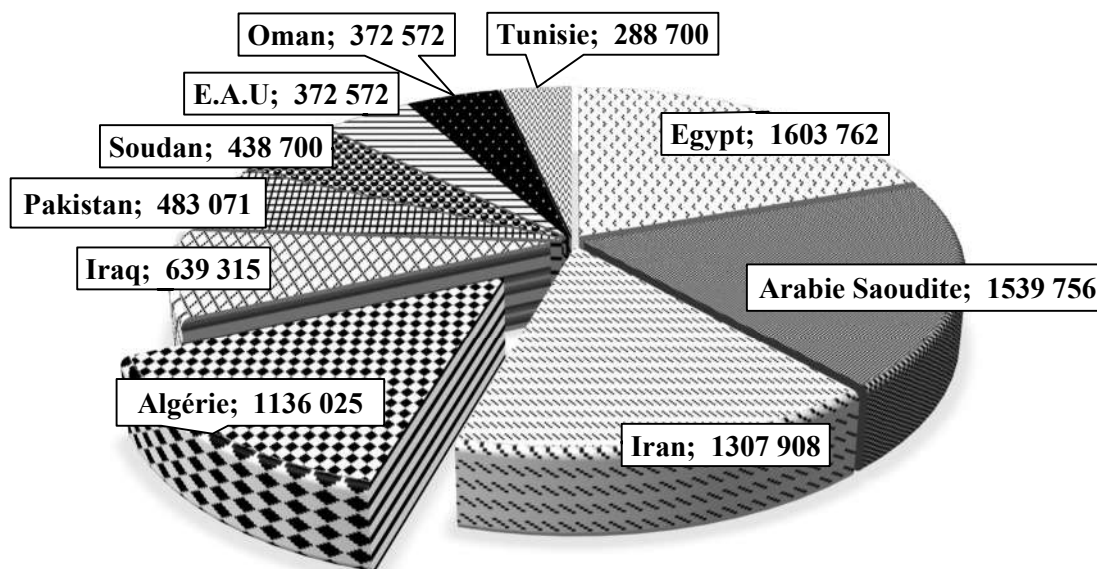


Figure 04 : Dix principaux pays producteurs de dattes (en tonnes) dans le monde (FAOstat, 2019).

Très peu de cultivars sont cultivés de manière extensive dans les principaux pays producteurs. Zahdi ou Zahidi, Khadrawy, Hillawy, Khustawy, Maktoom, Shalabi, Sukari et Sayer sont couramment cultivés en Irak. Hayani, Samani, Zaghlol, Saidy et Duwaki sont cultivés commercialement en Égypte. Saidy et Bikraari en Libye. Boufgouss, Bousthami, Jihel, Bouskri et Mejhoul ou Medjool au Maroc. Fardh, Naghal, Kamri, Mobsouli et Oum Sila à Oman. Ftimi en Tunisie. Halawi, Chichap, Shanker, Barhee Shahaani et Bureim en Inde. Anbara, Khalas, Khasab, Ruzeis, Kheneizy, Sukkary, Duwaiki et Khudairi en Arabie saoudite. Kabkab, Sayer et Shahani en Iran. Jowan Sor, Karba, Kalud et Abdandan au Pakistan. Aux États-Unis, Medjool, Deglet-Nour, Zahdi, Khadrawi et Hallawi dominent la production commerciale. En Algérie, les principaux cultivars sont Deglet-Nour, Ghars et Degla-Beida [3] (Figure 05).

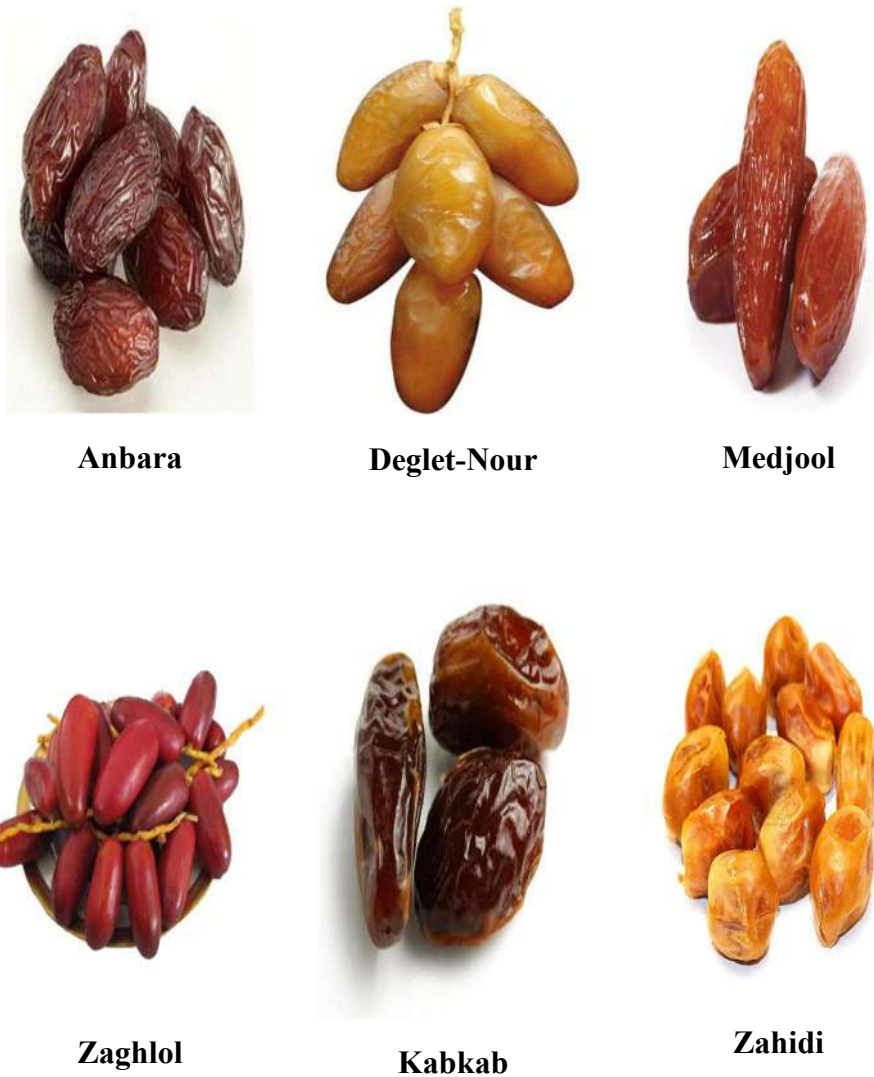


Figure 05 : Quelques variétés de dattes dans le monde.

I.2.2- En Algérie

Le palmier dattier trouve en Algérie un climat favorable à son développement et à la maturation de ces fruits ; en plusieurs oasis réparties sur le Sud du pays où le climat est chaud et sec (zone saharienne), comme Oued-Righ, Souf, Zibans, Touat, Gourara et le Tidikelt [3, 14]. Le potentiel du palmier dattier en Algérie, a marqué un progrès important dans les cultivars de palmiers dattiers, qui ont atteint 18 millions de palmiers, couvrant plus de 350 000 ha, où 11 millions d'arbres sont productifs [15].

L'essentiel du patrimoine est situé dans la partie septentrionale Est et Centre du Sahara algérien : les Zibans, Oued-Righ, le Souf, la cuvette de Ouargla,

le Mzab et El-Goléa (Figure 06). Avec ce potentiel, l'Algérie se place en 4^{ème} position mondiale avec plus de 70 % constitués de variétés Deglet-Nour, Ghars, Degla-Beida et Mech-Degla [3].

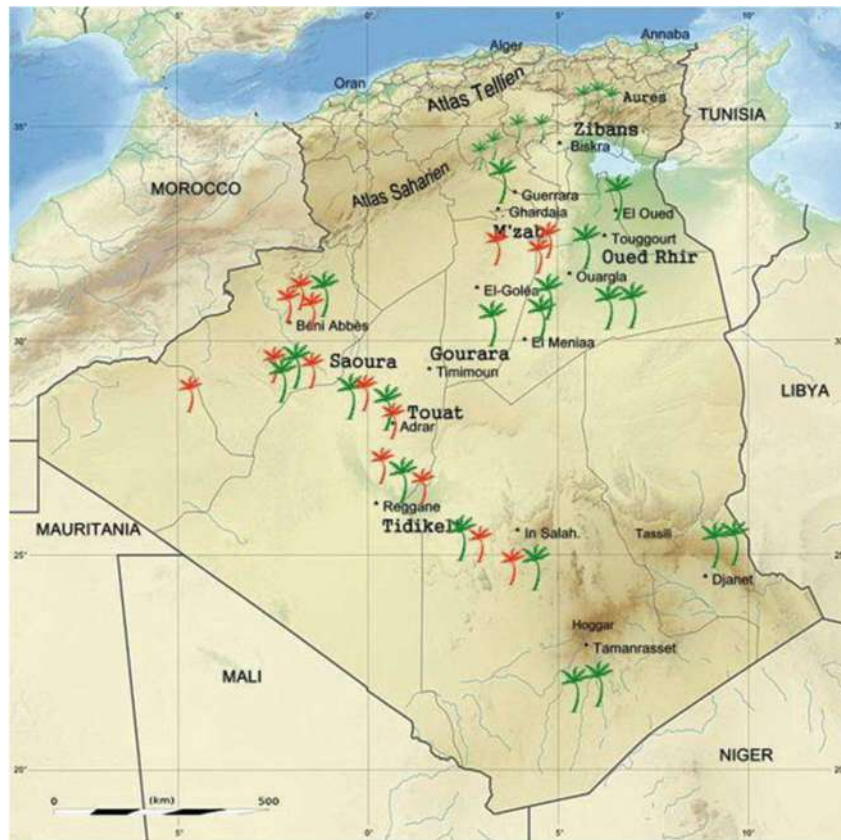


Figure 06 : Carte de l'Algérie indiquant les différentes zones des palmiers dattiers [13].

Près d'un millier de cultivars a été inventorié et les trois régions principales de culture se distinguent sur le plan de la diversité génétique (Tableau 01). A cette catégorie, il faut ajouter un grand nombre de pieds francs « *Khalts* » qui poussent au hasard dans les oasis et qui représentent une source appréciable pour de nouvelles sélections de cultivars appréciables pour leur datte [14].

Tableau 01 : Inventaire variétal dans les trois régions phoenicoles d'Algérie [14].

	Région	Nombre de cultivars	Cultivars les plus courants
Ouest	Atlas	70	<i>Ghares, Asyan, Feggous</i>
	Saoura	80	<i>Feggous, Hartan, Cherka, Hmira, Deglat Talmine</i>
	Gourara	230	<i>Hmira, Tinnacer, Takerbouchet</i>
	Touat	190	<i>Teggaza, Aghamou, Takerbouchet</i>
	Tidikelt	60	<i>Teggaza, Takerbouchet, Cheddakh, Aggaz</i>
Centre	El-Ménia	70	<i>Timjuhart, Ghars, Timedwel</i>
	M'Zab	140	<i>Azerza, Ghars, Deglet-Nour, Taddela</i>
Est	Ouargla	70	<i>Ghars, Deglet-Nour, Degla-Beida</i>
	Oued Righ	130	<i>Deglet-Nour, Ghars, Degla-Beida</i>
	Souf	70	<i>Deglet-Nour, Ghars, Degla-Beida, Mech Degla</i>
	Zibans	140	<i>Deglet-Nour, Ghars, Degla-Beida, Mech Degla</i>
	Tassili	180	<i>Tanghimen, Tabanist, Khadaji</i>
	Autres	220	<i>Buzrur, Alig, Buhles, Mech Degla</i>

Du point de vue production, l'Algérie est classée au 4^{ème} rang mondial avec une production moyenne annuelle évaluée à plus de 1 136 025 tonnes de dattes (FAOstat, 2019) (voir Figure 04), dont 45 % de Deglet-Nour ; au 5^{ème} rang pour ses exportations et le 1^{er} pour sa qualité des fruits exportés grâce à sa production de dattes Deglet-Nour [3, 15–18].

Les statistiques montrent que la production de palmiers dattiers en Algérie est principalement concentrée dans la partie sud-est du pays où elle représente 76% de la production nationale. La province de Biskra occupe la première place avec une contribution à la production nationale de près de 31 %, suivie par El Oued (27 %) et Ouargla (18 %). Les spécificités édaphiques et pédoclimatiques, ainsi que la gestion des cultures et la valeur marchande des cultivars, justifient l'importance de la production dans ces régions. Dans les autres régions, la production est moins importante, contribuant à 24 % de la production nationale totale de dattes, répartie comme suit : sud-ouest (15 %) et centre-sud (9 %) [13].

La région d'Adrar a produit 91 360 tonnes de dattes en 2016, ce qui est représenté par la figure 07 ; provenant de 2.8 millions palmiers pour une superficie de 29 104 ha [19]. La majeure partie de cette production est exportée vers les pays voisins sous forme de troc, le reste étant soit consommé localement,

soit utilisé comme alimentation pour le bétail [15]. Contrairement aux palmeraies du sud-est où on trouve un potentiel important de cultivars de très bonne qualité dattier (Deglet-nour, Ghars...etc), le patrimoine phœnicicole de la région d'Adrar est constitué essentiellement de cultivars dits "khalts" comme Tilemsou ou Hmira, Tinaceur, Takareboucht, Deglet-Talmine, ...etc. [20].

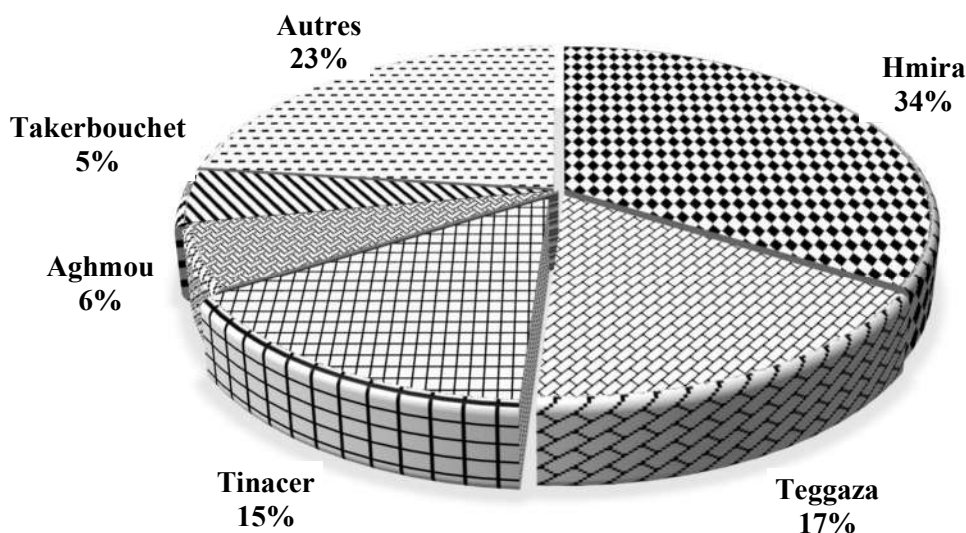


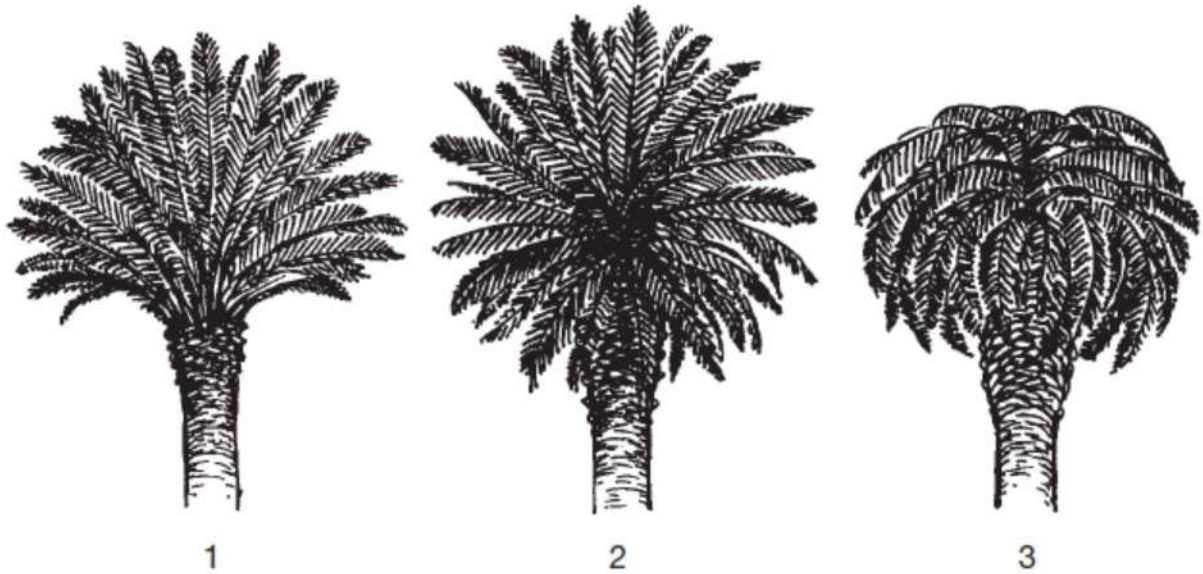
Figure 07 : Répartition de la production de dattes dans la région d'Adrar [21].

I.3- DESCRIPTION SYSTEMATIQUE ET BOTANIQUE

I.3.1. Description botanique

Le nom botanique du palmier dattier (Figure 08) est *Phoenix dactylifera* L., c'est un membre important de la famille *Acéracées* (*Palmacée*) sous famille des coryphènes. La *Palmacée* est, une famille des angiospermes monocotylédones comprenant environ 200 genres et 1500 espèces. Le genre *Phoenix* (*Coryphoideae Phoeniceae*) est l'un de ces 200 genres ; il contient une douzaine d'espèces, dont *Phoenix dactylifera* L. « *Phoenix* » proviendrait de *phoinix*, nom utilisé par les grecs pour le dattier. En effet, les grecs de l'Antiquité le considéraient comme l'arbre des phéniciens qui l'avaient introduit en Grèce. Selon une autre hypothèse, le nom « *Phoenix* » est dérivé de l'oiseau légendaire de la Grèce ancienne ; qui était capable de renaître de ses cendres. Ce nom aurait été attribué au palmier en raison de sa capacité à survivre après avoir été partiellement brûlé. Le nom « *dactylifera* » dérivé du latin *dactylis*, dérivant du

grec *dactylus* signifie « doigt », en tenant compte de la forme du fruit (la datte), associé au mot latin *fero*, porté, en référence aux fruits [1, 6, 16–17].



1 : Erigé (Exp : Deglet-Nour) ; 2 : Sphérique (Bser Helou) ; 3 : Retombante (Ghars).

Figure 08 : Port de la plante [22].

En 1986, Dransfield et Uhl ont classifié le palmier dattier comme suit [17]:

- ✓ **Groupe** : *Spadiciflora* ;
- ✓ **Ordre** : *Palmea* ;
- ✓ **Famille** : *Arecacea (Palmaceae)* ;
- ✓ **Sous-famille** : *Coryphoideae* ;
- ✓ **Division** : *Phoeniceae* ;
- ✓ **Genre** : *Phoenix* ;
- ✓ **Espèce** : *dactylifera L.*

Il a longtemps été suggéré que le *Phoenix dactylifera* ne s'agit peut-être même pas d'une espèce, mais d'un cultigène dérivé d'une espèce connue dans la nature comme *Phoenix sylvestris*, ou produit par hybridation entre deux ou plusieurs espèces. Cependant, les données moléculaires ont démontré que *Phoenix dactylifera* est une véritable espèce, complètement distincte de toutes les autres espèces de son genre *Phoenix* [23].

Cependant, le palmier dattier *P. dactylifera* est une espèce pérenne et dioïque ; dont les organes mâles et femelles sont portés par des arbres séparés. C'est l'arbre le plus haut de toutes les espèces de *Phoenix*, et dans certaines conditions, le tronc non ramifié peut atteindre plus de 30 m de hauteur [6].

Les espèces du genre *Phoenix* sont tellement proches morphologiquement qu'il est même parfois difficile de les distinguer. Cette ressemblance provoque une confusion sur le nombre exact d'espèces. Une confusion qui est également due au fait que tous les *Phoenix* possèdent 36 chromosomes et qu'ils peuvent ainsi s'hybrider très facilement entre eux [17].

En observant le palmier dattier, on dirait que c'est un arbre, mais en fait, il s'agit d'une monocotylédone comme le maïs. Il n'a pas de tronc mais un stipe. Le palmier dattier dispose d'un appareil végétatif (stipe et palmes), d'un système racinaire et d'un appareil reproducteur (Figure 09) [17].

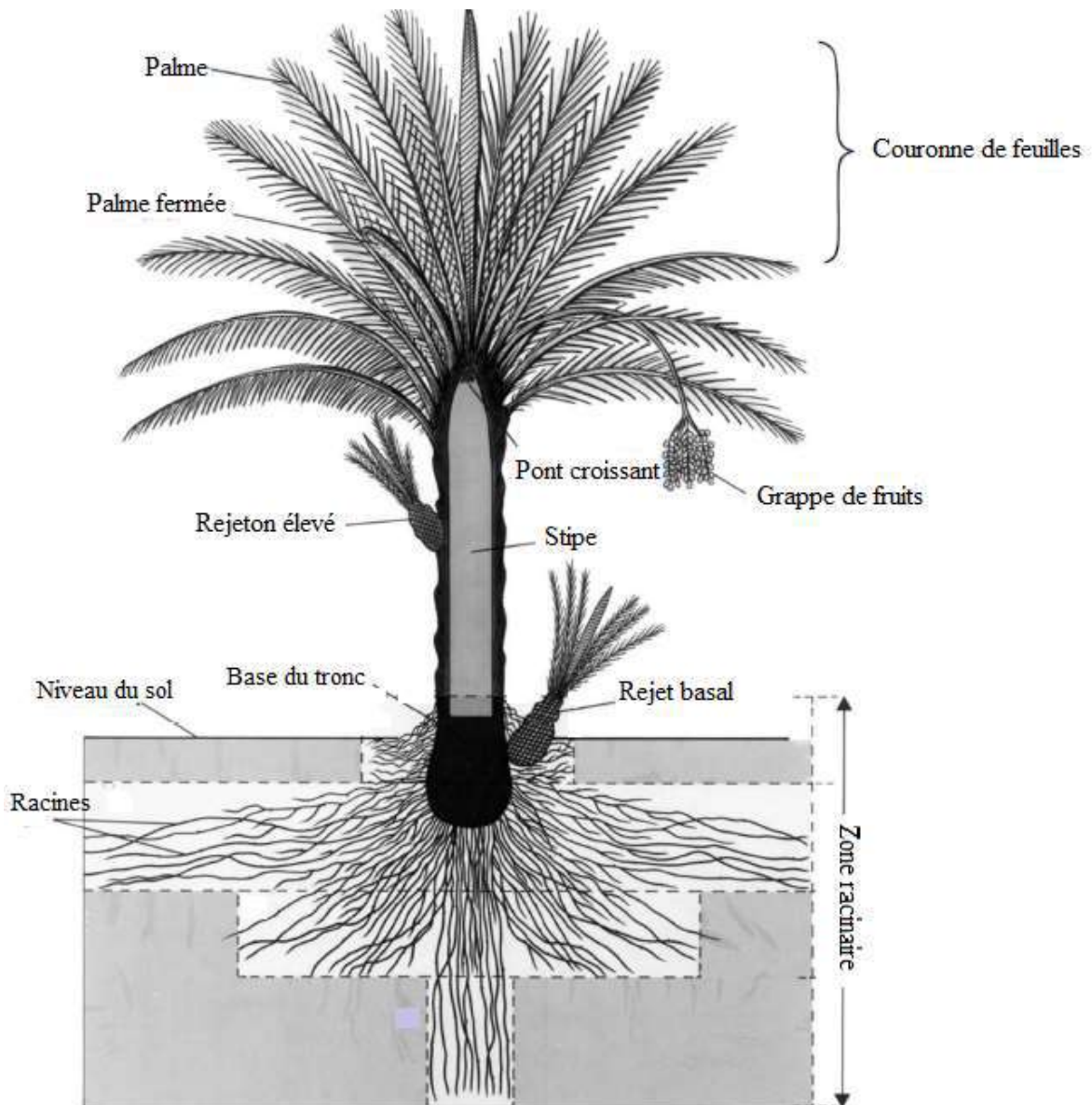
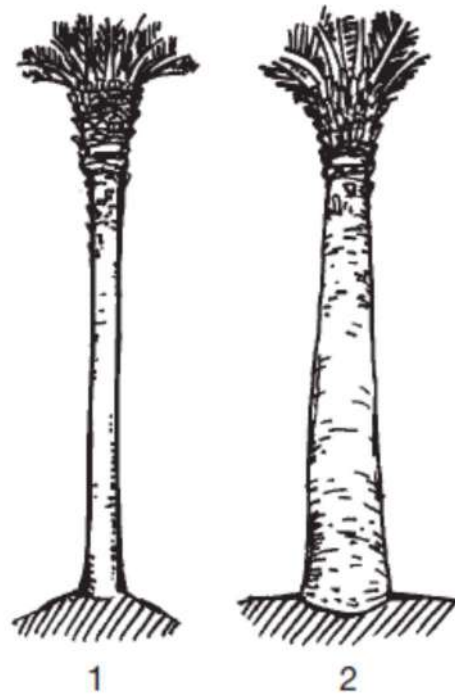


Figure 09 : Figuration schématique du palmier dattier [24].

I.3.2. Stipe

P. dactylifera a un apex de pousse terminal (porté sur un stipe) (Figure 10) qui assure sa croissance dans le sens de la longueur avec un système racinaire très développé [6].



1 : Cylindrique ; 2 : Conique.

Figure 10 : Forme du Stipe [22].

I.3.3. Feuilles

Les feuilles ou les palmes (*Djérid*, en Arabe) (Figure 11) sont grandes (4–5 m de large), longues (4–8 m) et pennées ; elles poussent en alternance du sol vers le haut en forme de spirale sur le tronc, avec un enrobage en rosettes terminales denses ou en couronne de 100–120 feuilles [6].

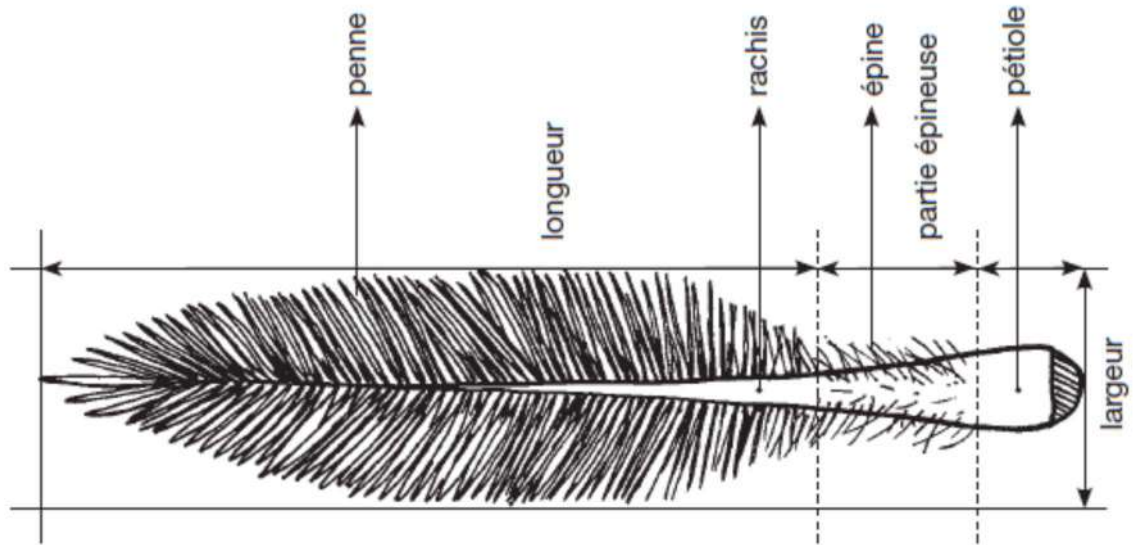
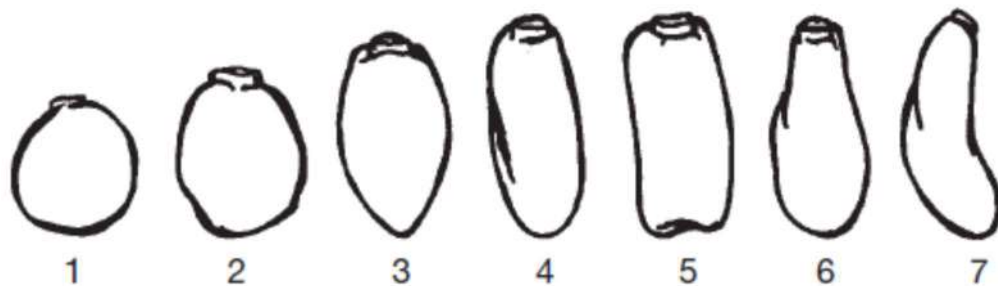


Figure 11 : Palme (Feuille) [6].

I.3.4. Fruit

Le palmier dattier représente plus de 3 000 variétés que l'on trouve dans le monde entier, dont la forme, la taille et le poids varient. Il y en a environ plus de 800 en Algérie, 244 au Maroc, 250 en Tunisie, 370 en Irak, 400 en Iran, et de nombreuses variétés supplémentaires dans les autres grands pays producteurs de dattes. Les dattes sont généralement de forme oblongue, bien que certaines variétés puissent être presque rondes (Figure 12) [6, 21, 25].



1 : Sphérique (Ex : Tantabucht) ; **2** : Sub Sphérique (Ex : Bser-Helou) ; **3** : Ovoïde (Ex : Beyd-Hmam) ; **4** : Sub Cylindrique (Ex : Deglet-Nour) ; **5** : Cylindrique (Ex : Mejhoul) ; **6** : Piriforme (Ex : Ghars) ; **7** : Courbée (Ex : Garn-Gzal).

Figure 12 : Forme du Fruit (Datte) [22].

Le développement des fruits de dattes est divisé en cinq étapes, *Hababouk*, *Kimri*, *Khalal*, *Rutab* (semi-mûres) et *Tamar*, et les dattes sont généralement récoltées au stade de la maturité complète du *Tamar* (Figure 13) [25].

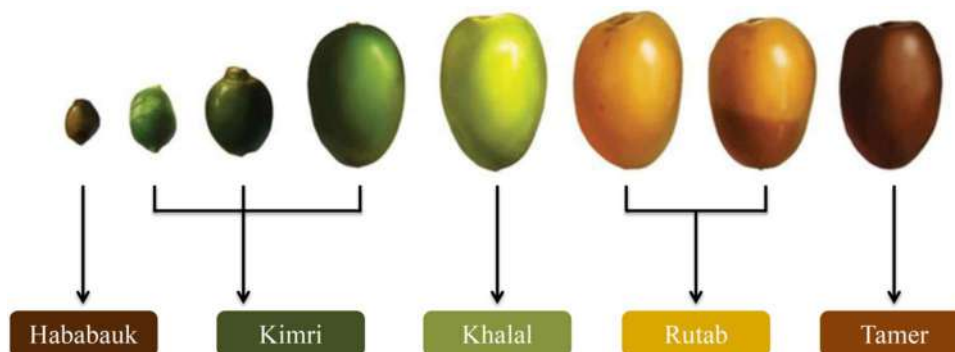


Figure 13 : Cinq stades de croissance des dattes [26].

La longueur de datte varie de 1,8 à 11,0 cm et la largeur de 0,8 à 3,2 cm (Figure 14), le poids moyen par fruit est de 2 à 60 g. Les fruits sont verts et tourmentés, mais ils deviennent jaunes et glabres lorsqu'ils arrivent à maturité. Il a une pulpe comestible aigre-douce [1, 6].

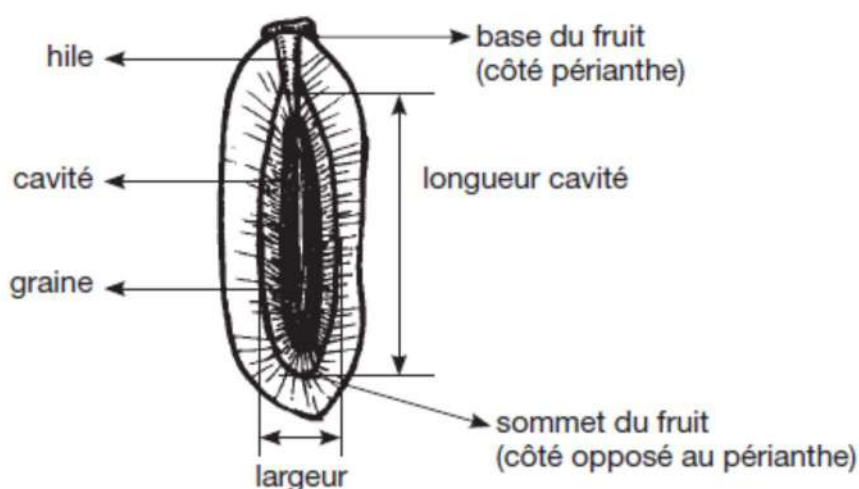


Figure 14 : Longueur/Largeur de la cavité de la datte [22].

La datte comporte un mésocarpe charnu (pulpe) protégé par un fin péricarpe et un tégument interne blanc et fibreux, l'endocarpe directement appliqués sur le noyau (également appelée aussi la graine) (Figure 15) [27].

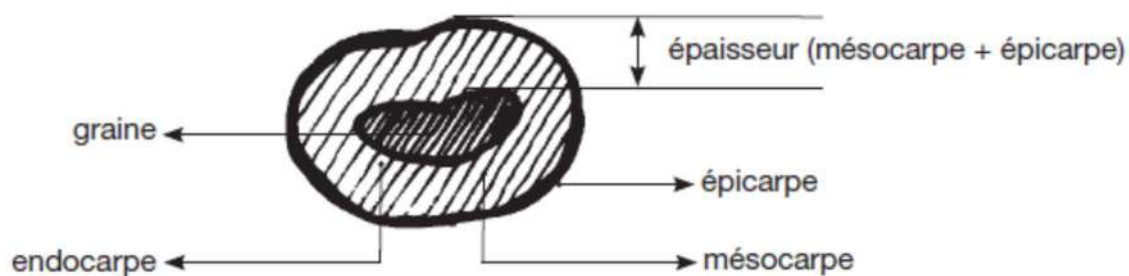


Figure 15 : Forme de la chair (Mésocarpe/Epicarpe) [22].

Les palmiers dattiers commencent à porter leurs fruits à l'âge de 4 à 5 ans et atteignent leur pleine maturité à l'âge de 10 à 12 ans, en fonction des conditions locales affectant le taux de croissance et de développement. Les fleurs sont portées en brins sur les hampes (Figure 16) au sommet de l'arbre [8].

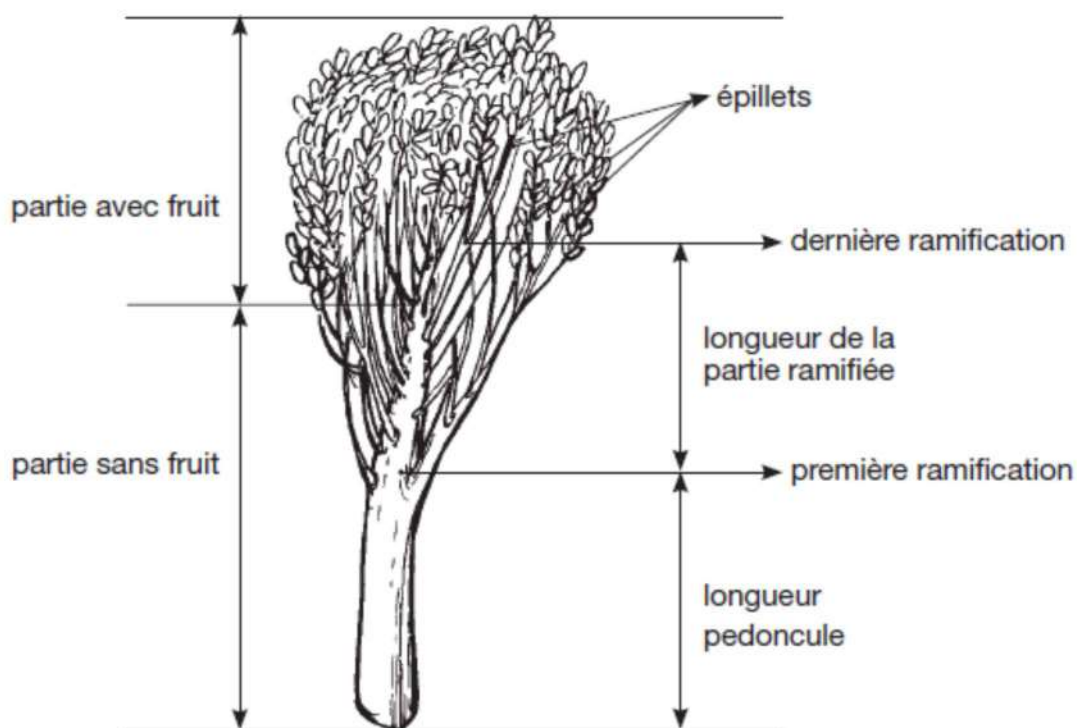


Figure 16 : Longueur de la partie ramifiée de la hampe florale [22].

Le nombre de hampes par arbre varie de trois à dix et chaque hampe contient des centaines d'épillets (Figure 17) et des milliers de dattes. Le poids moyen des hampes varie de 5 à 20 kg. Un palmier peut produire jusqu'à 100 kg par an, certains cultivars ayant un rendement moyen par arbre de 180 kg [8].



1 : Rectiligne ; 2 : Sinueuse ; 3 : Très Sinueuse.

Figure 17 : Forme des épillets [22].

I.3.5. Noyaux

Comme pour la datté, les caractéristiques des noyaux varient grandement selon la variété, les conditions environnementales et les conditions de croissance. Le poids des noyaux varie de 0,5 à 4 g, la longueur de 1,2 à 3,6 cm et la largeur de 0,6 à 1,3 cm (Figure 18). Le noyau est généralement oblong, rainuré ventralement, avec un petit embryon et un endosperme dur fait d'un dépôt de cellulose à l'intérieur des parois cellulaires [1].

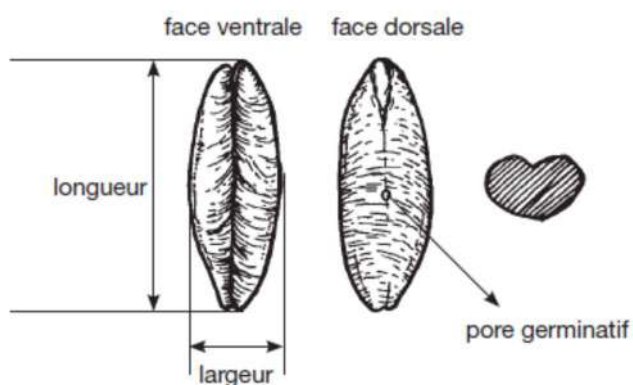
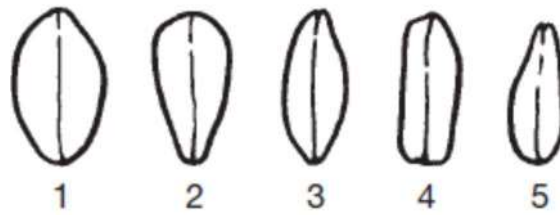


Figure 18 : Longueur et largeur du noyau [22].

Les noyaux de dattes (Figure 19) sont inodores et ont une couleur brune claire à brune foncée et un goût sans saveur avec une légère amertume [28].



1 : Ovoïde (Ex : Tantabucht) ; 2 : Coniforme (Ex : Horra) ; 3 : Fusiforme (Ex : Deglet-Nour) ; 4 : Sub Cylindrique (Ex : Ghars) ; 5 : Piriforme

Figure 19 : Formes de noyau [22].

I.4- REPRODUCTION DU PALMIER DATTIER

Les palmiers dattiers sont des fruits anciens ayant une valeur nutritionnelle, médicinale et économique importante. Ils sont multipliés par deux techniques : la multiplication des noyaux et la multiplication des ramifications. La propagation des semences est la méthode de propagation la plus facile et la plus rapide, mais ce n'est pas une technique de propagation précise parce qu'il n'y a pas deux semis qui se ressemblent. En raison de sa diversité, l'approche par les semences ne peut être utile qu'à des fines sélections. Les noyaux de dattes sont donc jetés ou utilisés comme fourrage pour les bovins, les moutons, les chameaux et les volailles. L'utilisation de noyaux de dattes pour l'alimentation animale de manière traditionnelle reste probablement la pratique la plus courante [1, 29].

Les palmiers dattiers issus de ramifications commencent à porter leurs fruits dans un délai moyen de 5 à 8 ans après la plantation ; ils atteignent leur maturité vers l'âge de 30 ans. D'autre part, la germination des noyaux est la plus facile, mais les semis peuvent prendre jusqu'à 10 ans avant la floraison et la fructification [6].

I.5- ECOLOGIE DU PALMIER DATTIER

Selon les individus et les cultivars, l'activité végétative du palmier se manifeste à partir de 7 à 10 °C, avec une activité maximale à 38°C. Le palmier n'est pas gêné par les températures basses. Cependant, l'activité végétative décroît rapidement au-delà de 38 à 40 °C [17, 30]. Il est constaté aussi que l'action du froid se manifeste à des températures variables selon les cultivars, l'âge de l'individu et la durée de son action. En Algérie, une température de 12 °C cause le dessèchement total des palmes sauf celles du cœur [30].

Pour mûrir, les dattes ont besoin de chaleur estivale, sans excès, au risque de casser le cycle d'évolution et d'une hygrométrie relativement faible. Le palmier a des folioles sur les palmes facilitant l'activité photosynthétique. En période de floraison, les pluies violentes nuisent à une bonne fécondation des fleurs et favorisent aussi les maladies cryptogamiques [17].

Concernant les besoins pédologiques, le palmier dattier est considéré comme une plante peu exigeante et utile. Il pousse sur des sols de formation désertique et semi-désertique, là où d'autres plantes ne pourraient pas pousser. Cette robustesse fait qu'on peut trouver le palmier sur des sols très sableux à très argileux [17]. Le comportement du palmier dattier diffère selon le type de sol. Il préfère les sols légers avec une salinité inférieure à 10 %, où il croît plus rapidement, entrant en production plus précocement, de meilleures qualités, plus homogènes et plus abondantes qu'en sol lourd. Le palmier dattier supporte les sols salés quand ils reçoivent de fortes irrigations et que le drainage est efficace. On obtient une croissance normale du palmier dattier et bonne production que si le sol permet la pénétration de l'eau à une profondeur de 2 à 2,5 m. Les plus belles palmeraies se trouvent sur des sols limoneux sableux [30].

Toutefois, le palmier dattier reste une plante résistante à la salinité car il peut tolérer jusqu'à 15 g/L de NaCl. Certaines variétés de palmier dattier tolèrent une salinité de plus de 22 000 ppm, soit une conductivité électrique (CE) de 34 dS.m⁻¹. Cependant, la croissance et le rendement sont affectés par une très forte salinité : le rendement baisse de 50 % à 11 500 ppm et 100 % à 20 500 ppm (18–32 dS.m⁻¹) [17].

Le palmier dattier a besoin d'azote, de phosphore et de potassium pour sa croissance et sa production de dattes. Pour un palmier, une production de 40 kg de dattes nécessite 0,6 kg d'azote, 0,08 kg d'acide phosphorique et de 0,26 kg de potasse par an [17]. Les premières études sur la fertilisation du palmier dattier ont été entreprises au Sud-est Algérien en 1920, ils ont abouti à une formule de 10/10/20 appliquée à la dose de 3 kg par palmier apportée à un hectare. Après 17 ans ; les mêmes auteurs signalent que les études ont été reprises dans le sud algérien et ils ont défini les besoins du palmier dattier en éléments fertilisant nécessaire pour élaborer une récolte de 50 kg de dattes Deglet-Nour et la pousse

des palmiers de l'année, ils sont de l'ordre de 45,05 kg/ha d'azote, 13,53 kg/ha de phosphore et 81,18 kg/ha de potasse. La fumure organique recommandée est de 20 kg/palmier/an pendant les trois premières années et de 100 kg/palmier/an pour les arbres de plus de deux ans [30].

I.6- DIFFERENTES UTILISATIONS DU PALMIER DATTIER

Le palmier dattier a toujours joué un rôle essentiel dans l'alimentation des habitants des pays producteurs de dattes. Presque toutes les parties de *Phoenix dactylifera* L. sont traditionnellement utilisées comme aliments ou dans la médecine populaire. Le palmier dattier est un arbre connu d'intérêt majeur en raison de sa valeur nutritive élevée et de ses fruits recherchés. Outre les avantages nutritionnels, les dattes ont été associées à plusieurs effets biologiques, notamment les effets antioxydants, antimutagènes, anti-inflammatoires, anticancéreux, antimicrobiens et immunostimulants [6, 31–34].

Dans la médecine populaire, les dattes sont utilisées dans le traitement de la coqueluche, de la leucoderme et d'autres maladies de la peau. En Egypte, les dattes sont utilisées pour les hypoglycémiantes oraux et les antidiabétiques, et l'extrait aqueux de mésocarpe est utilisé dans la médecine populaire soudanaise pour le traitement de l'ictère. Traditionnellement, les fruits du palmier dattier sont utilisés en médecine comme sirops recommandés (*Robb*) pour le traitement des maladies du foie et pour les femmes enceintes avant et après l'accouchement ; de plus, les fruits du palmier dattier ou sirops de dattier sont un composant des boissons, confiseries, produits de boulangerie et glaces [6].

Le reste (résidus) des dattes, qui constitue les dattes communes, qui ne sont pas appréciées par la société et qui est commercialisé avec beaucoup de difficultés sur les marchés locaux. 30% de ces résidus ne sont pas de qualité satisfaisante et sont principalement utilisés pour l'alimentation pour le bétail [15].

Outre sa production de dattes pour l'alimentation humaine, le palmier dattier, offre une large gamme de sous-produits exploités par la population saharienne, à savoir : [16]

- Le vinaigre, l'alcool et les levures, par fermentation microbiologiques des dattes communes ;

- La farine de dattes utilisées dans la panification ;
- Le jus de dattes, par extraction, utilisé comme sucrerie ;
- Le tronc d'arbre, utilisé dans l'ébénisterie traditionnelle, bois de chauffage et charpentes de bâtiments ;
- Les palmes sèches, utilisées comme clôtures, brises vent, dans la confection de couffins, de chapeau, etc. Ils peuvent même servir en industrie de papier.

Au fil des siècles, l'utilisation des produits du palmier dans les régions productrices de dattes s'est répandue dans tous les secteurs de l'économie, de l'agriculture au transport et à la construction, en passant par l'usage domestique et les centres urbains. À l'occasion, la production de ces produits du palmier a égalé ou est devenue plus importante que la récolte de dattes elle-même [35].

En période de pénurie alimentaire, l'intérieur du tronc a été pulvérisé et transformé en une farine grossière pour la consommation humaine. Mais l'utilisation principale du tronc est son bois, qui intrinsèquement n'est pas de grande qualité à cause des faisceaux vasculaires grossiers, mais qui a une grande résistance à la traction. Son utilisation est donc orientée vers l'exploitation de cette caractéristique comme pour les poteaux, les poutres, etc. (Figure 20) [35].



Figure 20 : Troncs de palmier utilisés pour la fabrication de toits.

À cette fin, ils peuvent être utilisés entiers ou fendus en deux ou en quatre. Les demi troncs évidés sont utilisés comme conduits d'eau ou, sur de plus petites longueurs, comme mangeoires et abreuvoirs. Sciés en planches grossières, ils sont transformés en portes (Figure 21), volets et escaliers pour les maisons [35].



Figure 21 : Troncs de palmier dattier utilisés pour la fabrication de portes.

Chaque année, dans des conditions de croissance normales, une moyenne de 12 à 15 nouvelles feuilles sont formées par le palmier et, par conséquent, on peut s'attendre à ce que la même quantité soit coupée dans le cadre de l'entretien du palmier. Si l'on considère des centaines ou des milliers d'arbres, cela peut conduire à un grand nombre de feuilles disponibles chaque année. Les feuilles offrent les possibilités d'utilisation finale les plus variées, qui sont examinées en fonction des différentes parties dans lesquelles la feuille peut être divisée [35]:

- 1- Les feuilles entières sont utilisées comme clôture en les enfonçant dans le sol et en les maintenant ensemble avec deux ou trois couches de corde faites de folioles, ou comme cloison dans les maisons et les clôtures de terrasses pour assurer l'intimité tout en maintenant une certaine ventilation (Figure 22). Lorsque de la boue est utilisée dans la construction d'une maison, des feuilles entières de palmier dattier peuvent être posées sur les poutres du plafond (faites du tronc) en une épaisse couche sur laquelle une couche de boue est versée pour former le premier étage ou la couverture du toit.



Figure 22 : Tressage de feuilles de palmier dattier pour la construction d'un abri.

- 2- Habituellement, la base de la feuille est coupée et traitée séparément tandis que le "bâton" restant (encore appelé nervure médiane pour simplifier la nomenclature), une fois débarrassé des épines et des folioles, est utilisé à différentes fins. Trempées dans l'eau, redressées et fixées et maintenues étroitement ensemble par des traverses percées à travers elles, les nervures médianes font des planches de construction efficaces d'environ 50 x 200 cm, et utilisées comme cloisons ou toitures.
- 3- Les feuillets sont principalement utilisés dans des tresses qui sont cousues ensemble dans un large éventail de paniers et de sacs, mais aussi de nattes et d'articles plus petits comme des éventails et des chapeaux, des paniers, des vases, des cordons et des boites de dépôts (Figure 23).

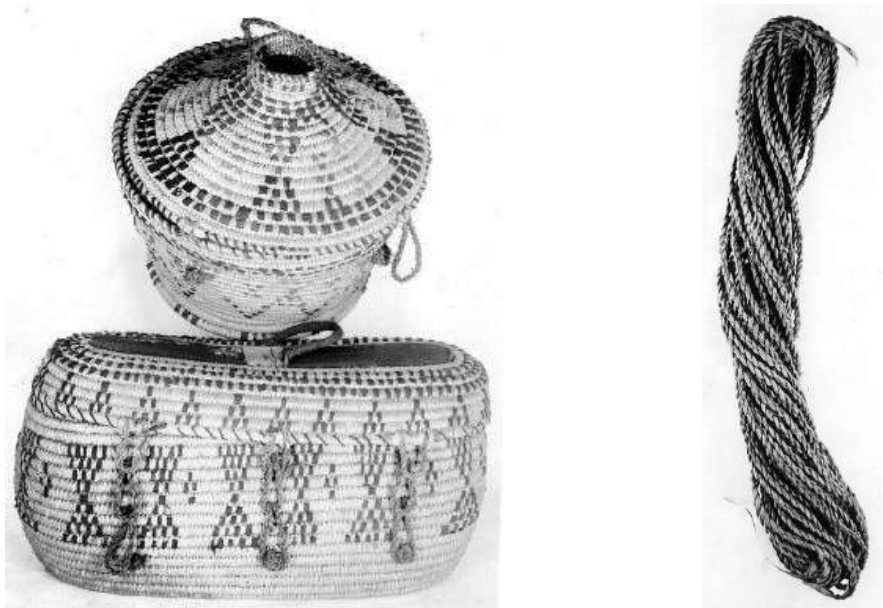


Figure 23 : Récipients à usage domestique et cordons fabriqués à main à partir de feuillettes de palmiers dattiers.

Habituellement, les palmiers dattiers produisent de grandes quantités de déchets agricoles et, selon une estimation, chaque palmier dattier produit environ 20 kg de feuilles sèches par an. D'autres déchets tels que les noyaux de dattes représentent en moyenne 10 % des fruits de dattes. Bien que ces déchets agricoles soient constitués de cellulose, d'hémicelluloses, de lignine et d'autres composés qui pourraient être utilisés dans de nombreux processus biologiques, ils étaient brûlés dans les fermes, ce qui constituait une grave menace pour l'environnement. [25]. Il existe un large éventail de technologies physicochimiques, thermiques et biochimiques pour l'utilisation durable de la biomasse du palmier dattier. En outre, le palmier dattier a une forte teneur en matières solides volatiles et une faible teneur en humidité. Ces facteurs font des résidus du palmier dattier une excellente ressource de biomasse dans les pays producteurs des dattes [24].

Le déchet de palmiers dattier est une ressource énergétique renouvelable et durable qui n'est pas très utilisée dans les industries. La datte est riche en sucres biodégradables, fournissant après la fermentation du bioalcool, de l'acide citrique et de l'amylase. En effet, grâce aux biotechnologies modernes, il est possible de valoriser les déchets de palmier dattier par bioconversion et de les commercialiser sur les marchés locaux, nationaux et internationaux sous forme de nouveaux produits à valeur ajoutée acceptable comme le bioéthanol [36–37].

Un produit semblable au café est fabriqué à partir des noyaux de dattes en les séchant, en les torréfiant et en les broyant de la même manière que les graines de café, pour produire un café sans caféine. L'huile de noyaux de datte a été utilisée pour remplacer les portions d'autres huiles végétales ; comme dans les crèmes pour le corps, les shampooings et les formulations de savon à raser, et, en général, la qualité de ces compositions cosmétiques est encourageante [1].

Les noyaux de palmier dattier contiennent une quantité importante de l'huile qu'il faut caractériser pour déterminer les composants constitutifs, les activités biologiques et sa stabilité. Ainsi, les noyaux contiennent de grandes quantités de fibres et, éventuellement, d'amidon résistant qui peuvent avoir des effets bénéfiques potentiels sur la santé. D'autres recherches sont nécessaires pour caractériser les composants isolés et identifier les constituants bioactifs ayant des activités antimicrobiennes, antioxydantes...etc. [28].

Les déchets de palmier dattier comme les palmes sont un résidu agricole abondant et peuvent être utilisés pour le renforcement de plastique. Dans l'étude de Chihaoui *et al.* 2021, la valorisation des résidus du palmier dattier incorporé comme renforcement pour le polypropylène, a été étudiée en employant des procédés à haut rendement suivant des traitements mécaniques, chimiques et enzymatiques [38]. Une autre étude récente de Zrelli *et al.* 2022 visait à valoriser les déchets du palmier dattier par l'extraction de la lignine à partir des noyaux, palmes pétioles, épillets et fibrille de palmier dattier, pour la modification de membranes polymériques. Les lignines extraites ont été ajoutées à la solution polymère, préparée à partir de déchets plastiques, pour produire des membranes [39].

Des études de recherches telles que les travaux de Habchi *et al.* 2020 et Benabderrahim *et al.* 2018 ont évalués le compost de *P. dactylifera* comme engrais organique riche en azote pour la luzerne (*Medicago sativa* L.) [40–41].

I.7- COMPOSITION CHIMIQUE DES DATTES & NOYAUX DU PALMIER DATTIER

L'importance nutritionnelle des dattes, ainsi que les effets bénéfiques de ces merveilles naturelles sur la santé ; prouvent que les fruits contiennent des variétés de composants de stérols et de polyphénols, notamment des acides phénoliques, des hydroxycinnamates, des glycosides flavonoïdes, des coumarines, des alcaloïdes, des oligomères *pro*-anthocyanidines, des caroténoïdes et plus encore (Figure 24). Bien que leurs concentrations et leurs rapports dépendent du stade du ramassage, du type, du lieu et des conditions pédologiques des fruits [6, 31–32, 42].

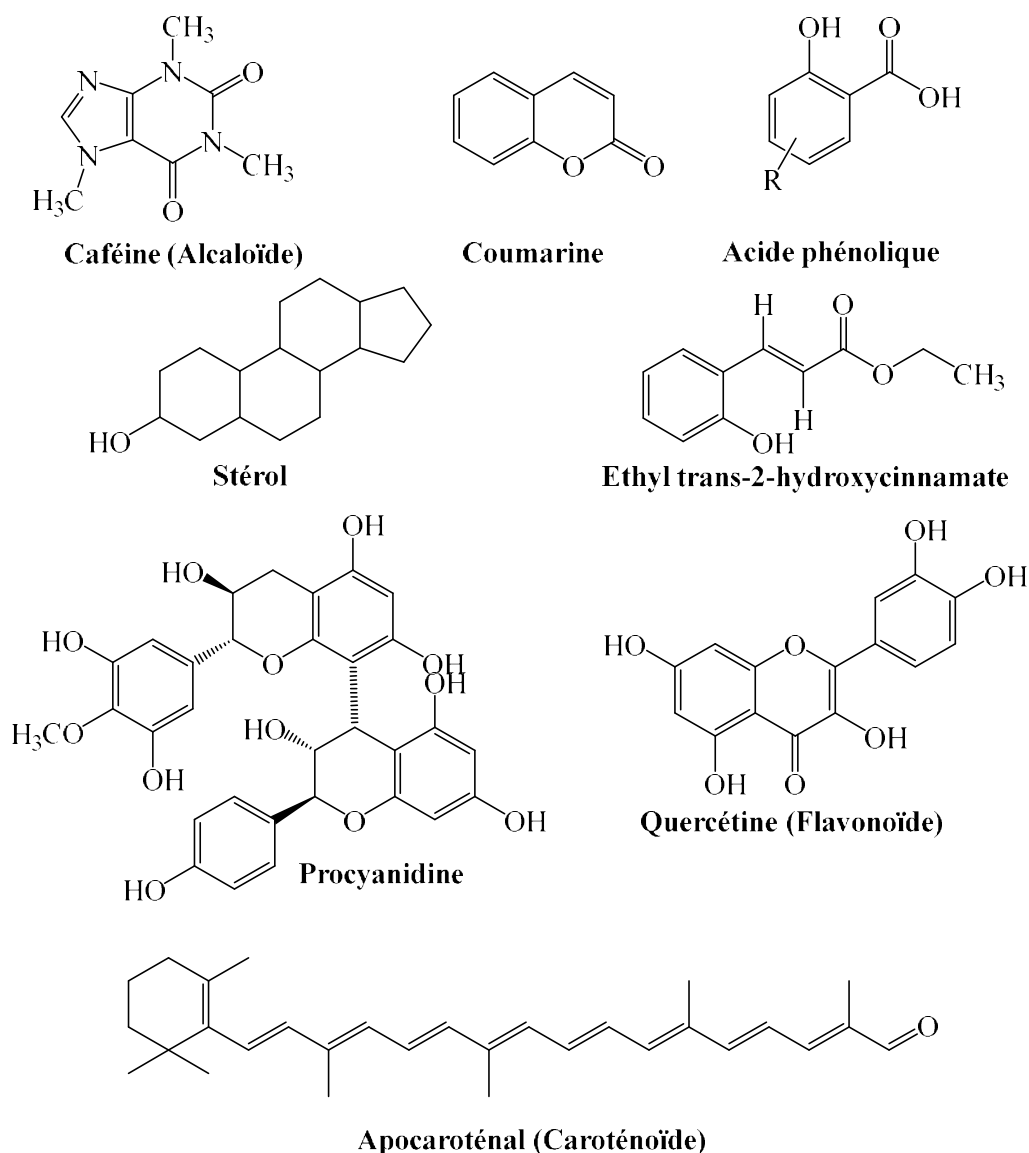


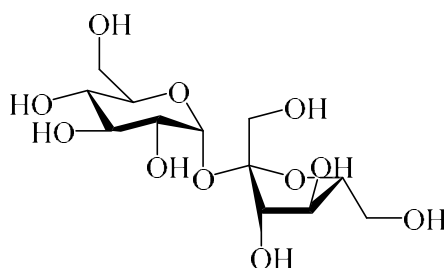
Figure 24 : Structures de quelques composés chimiques présents dans les dattes.

Les fruits de palmier dattier peuvent être consommés avant l'étape finale de maturation ou après une maturation complète. En général, ces dattes fournissent un large éventail de nutriments essentiels, et elles sont bien connues comme étant une très bonne source de potassium alimentaire [6, 32, 43].

Le taux d'humidité des fruits du palmier dattier diminue considérablement à mesure qu'ils mûrissent, et il est d'environ 24,2 % au stade de pleine maturité (stade *Tamar*) et atteint 4–10 % aux dates sèches [32, 43]. En outre, les fruits contiennent des sels minéraux (0,10 à 916 mg/100 g de poids sec) [43].

Les fruits du palmier dattier contiennent une forte concentration de sucre, qui est considérée comme le principal composant. La teneur en sucre des dattes mûres est d'environ 70–80 % ; les 20 % restantes sont constitués de protéines, de fibres et d'oligo-éléments dont le bore, le cobalt, le cuivre, le fluor, le magnésium, le manganèse, le sélénium et le zinc [6, 32, 43].

Il a été noté que les dattes accumulent la plus grande partie de leur sucre, à la fois le type saccharose (Figure 25) et le type sucre réducteur, pendant la phase de coloration, au cours de laquelle la couleur des noyaux passe du blanc au brun à la fin [6, 32].



Saccharose

Figure 25 : Structure chimique de Saccharose.

Les substances responsables du brunissement enzymatique des fruits du palmier dattier sont souvent le glycoside d'acide caféique, l'acide 3-*O*-cafféoylshikimique (communément appelé acide dactylifirique) et ses isomères (Figure 26). Au cours du processus de maturation de ces dattes, les substances solides non solubles sont progressivement décomposées par des enzymes en composés plus solubles, ce qui rend le fruit plus tendre et plus onctueux. Les

polyphénols, y compris les tanins, présents dans les fruits frais du palmier dattier peuvent représenter jusqu'à 3% du poids sec du fruit [6].

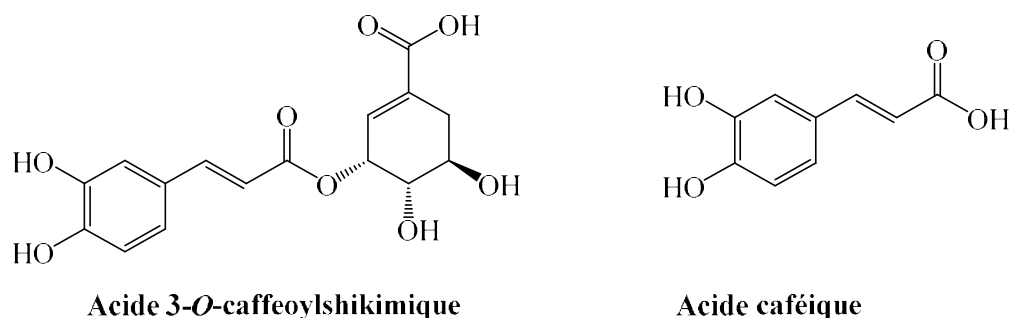


Figure 26 : Structures chimiques de l'acide caffeoylshimique et caféique.

De nombreux auteurs signalent que les dattes de palmiers au stade de maturation – où elles sont normalement et principalement consommées – contiennent deux groupes de substances importantes pour la nutrition (vitamines A, B1, B2 et niacine B3) ; cependant, d'autres vitamines, notamment la vitamine C sont insignifiantes (Figure 27) [6, 32, 43].

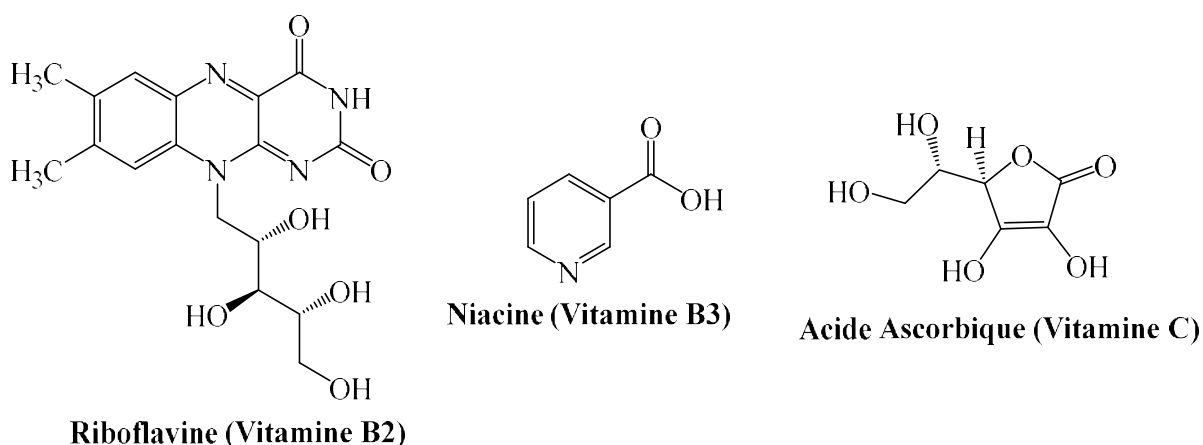


Figure 27 : Structures chimiques de quelques vitamines présentes dans les dattes.

La teneur en protéines de la datte de palmier dattier varie de 2,3 à 5,6 %, avec 23 modèles différents d'acides aminés favorables aux besoins humains, contrairement aux nombreux modèles d'acides aminés présents dans les fruits les plus populaires, comme les bananes, les pommes et les oranges. Des études ont remarqué que l'acide aspartique, la proline, la sérine, l'acide glutamique, la thréonine, l'alanine et la glycine se trouvent dans les dattes (Figure 28), de plus, l'isoleucine est présente dans les dattes à plus de 800 fois la quantité présente dans la pomme. La teneur en lysine des dattes représente près de 2 000 fois celle des

pommes, près de 5 000 fois celle des oranges et plus de 2 000 fois celle des bananes [6, 32, 43].

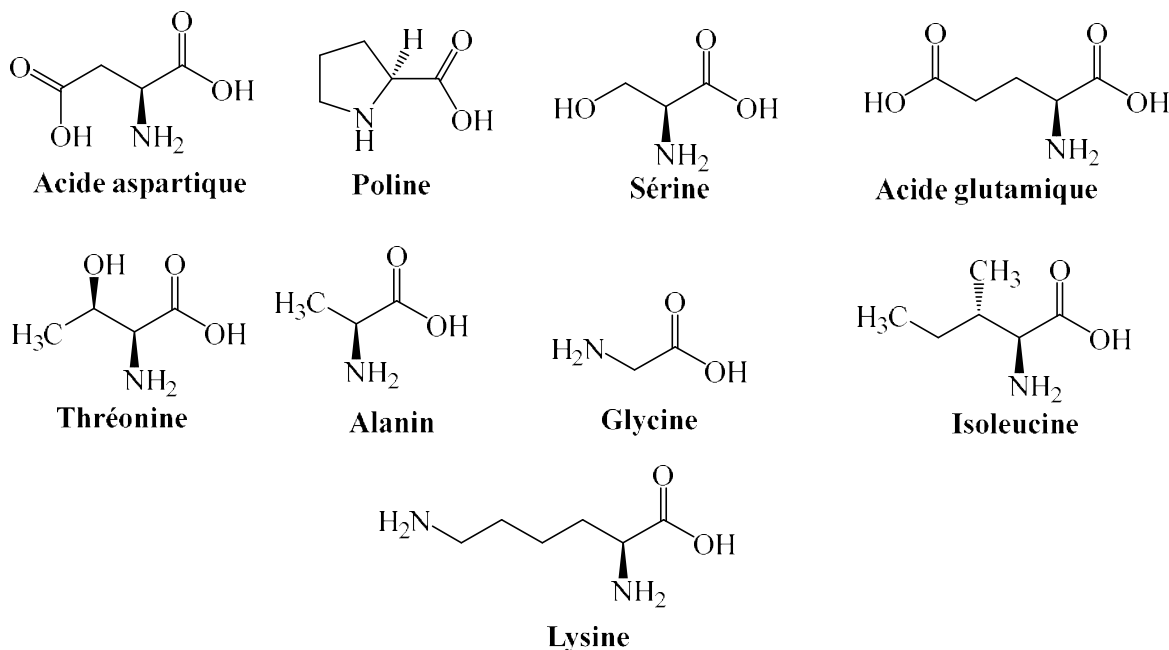


Figure 28 : Structures chimiques de quelques acides aminés présents dans les dattes.

Les noyaux de dattes, font partie intégrante du fruit dattier, qui est composé d'un péricarpe charnu. Les noyaux représentent entre 10 et 15 % du poids de la dattes, selon la variété et la qualité. Ainsi, selon les statistiques de FAO, 2018 ; environ 800 000 tonnes de noyaux de dattes sont produites annuellement. Comme on sait aussi que les noyaux de dattes contiennent des composés bioactifs précieux, l'utilisation de ce sous-produit est hautement souhaitable pour l'industrie des dattes [1].

La pulpe du palmier dattier contient 0,2–0,5 % d'huile et le noyau contient 7,7–12 % d'huile. Les huiles les plus abondantes dans le fruit du palmier dattier étaient les acides : oléique (C18:1 n-9) et laurique (C12:0), suivis des acides : palmitique (C16:0), linoléique (C18:2 n-6) et myristique (C14:0), qui représentent environ 90 % des acides gras totaux (Figure 29) [6, 32]. On sait que l'acide oléique domine près de la moitié des acides gras dans la plupart des noyaux, cependant, la teneur moyenne en huile dans les variétés de palmier dattier est d'environ 6,7 %, avec les pourcentages les plus élevés d'acides gras insaturés et saturés parmi les cultivars qui étaient liés aux acides oléique et laurique [6].

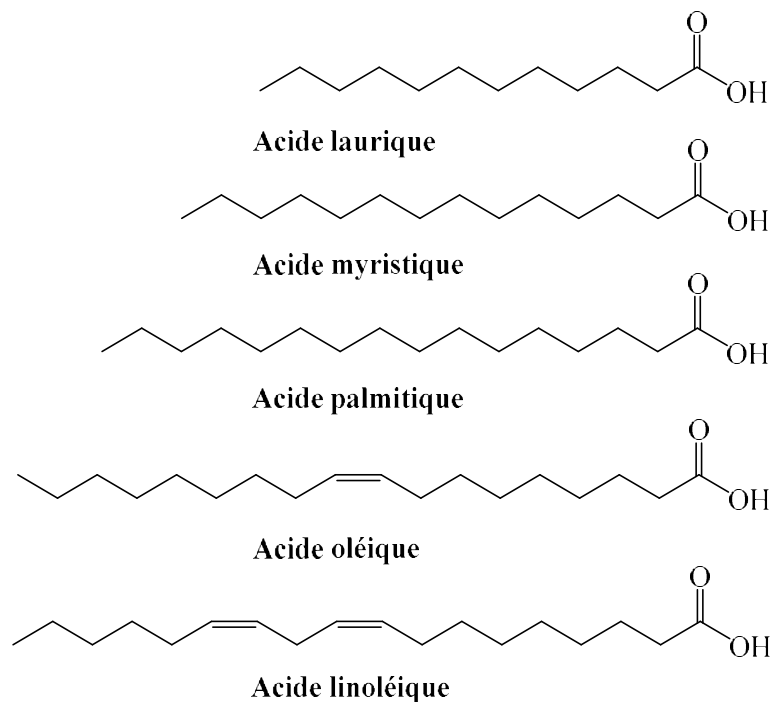


Figure 29 : Structures chimiques de quelques acides gras présents dans les dattes.

Les noyaux de dattes contiennent 7,1–10,3 % d'humidité, 5,0–6,3 % de protéines, 9,9–13,5 % de matières grasses, 46–51 % de fibres de détergents acides, 65–69 % de fibres de détergents neutres et 1,0–1,8 % de cendres. Plus de la moitié des protéines du noyau n'ont pu être extraites consécutivement avec du NaCl, de l'éthanol et de l'acide acétique [28].

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]– Al-Farsi, M.A., and Lee, C.Y. *Usage of Date (Phoenix dactylifera L.) Seeds in Human Health and Animal Feed*. In: Preedy, V.R., Patel, V.B., and Watson, R.R. (eds.) *Nuts and Seeds in Health and Disease Prevention*. Academic Press, USA, **2011**, pp. 447–452.
- [2]– Munier, P. Le Problème de l'Origine du Palmier-Dattier et l'Atlantide *Fruits*, **1974**, 29, 235–240.
- [3]– Allam, A. (Thèse) *Etude de l'Evolution des Infestations du Palmier Dattier (Phoenix dactylifera Linné, 1753) par Parlatoria blanchardi Targ. (Homoptera diaspididae Targ. 1892) dans Quelques Biotopes de la Région de Touggourt*. Institut National Agronomique El-Harrach, Alger, Soutenu en **2008**.
- [4]– Chao, C.T., and Krueger, R.R. The Date Palm (*Phoenix dactylifera L.*): Overview of Biology, Uses, and Cultivation. *HortScience*, **2007**, 42(5), 1077–1082.
- [5]– Khierallah, H.S.M., Bader, S.M., Ibrahim, K.M., and Al-Jboory, I.J. *Date Palm Status and Perspective in Iraq*. In: Al-Khayri, J.M., Jain, S.M. and Johnson, D.V. (eds.) *Date Palm Genetic Resources and Utilization, Volume 2*, Springer, **2015**, pp. 97–152.
- [6]– Amadou, I. *Date Fruits: Nutritional Composition of Dates (Balanites aegyptiaca Delile and Phoenix dactylifera L.)*. In: Simmonds, M.S.J. and Preedy, V.R. (eds.) *Nutritional Composition of Fruit Cultivars*. Academic Press, USA, **2016**, pp. 215–233.
- [7]– Al-Yahyai, R., and Manickavasagan, A. *An Overview of Date Palm Production*. In: Manickavasagan, A., Mohamed Essa, M., and Sukumar, E. (eds.) *Dates: Production, Processing, Food, and Medicinal Values*. CRC Press, **2012**, pp. 3–11.
- [8]– Yahia, E.M. and Kader, A.A. *Date (Phoenix dactylifera L.)*. In: Yahia, E.M. (eds.) *Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits*. Woodhead Publishing, Royaume-Uni, **2011**, pp.41–81.
- [9]– Johnson, D.V., Rivera, D., Alcaraz, F., Carreño, E., Delgadillo, J., Carrillo, M.H., Obón, C., Krueger, R. and Ríos, S. Date Palm (*Phoenix dactylifera*) Dispersal to the Americas: Historical Evidence of the Spanish Introduction. *ActaHorticulturae*, **2013**, 994, 99–104.

- [10]– Carassale, A., Dore, M.N., Castellana, R. and Veziano, P. The Historic Phoeniculture in Italy: Description of the Medieval Palm Grove of *Bordighera (Sanremo-Liguria)* and the Italian Palm Craft. *ActaHorticulturae*, **2013**, 994, 39–52.
- [11]– Bekheet, S.A., and El-Sharabasy, S.F. *Date Palm Status and Perspective in Egypt*. In: Al-Khayri, J.M., Jain, S.M. and Johnson, D.V. (eds.) *Date Palm Genetic Resources and Utilization, Volume 1*, Springer, **2015**, pp. 75–123.
- [12]– Yao, S.; and Al-Redhaiman, K. Date Palm Cultivation in Saudi Arabia: Current Status and Future Prospects for Development. In *Proceedings of the ASHS Annual Conference*, Orlando, FL, USA, 28–31 July **2014**; Volume 49, pp. 139–140.
- [13]– Bouguedoura, N., Bennaceur, M., Babahani, S., and Benziouche, S.E. *Date Palm Status and Perspective in Algeria*. In: Al-Khayri, J.M., Jain, S.M. and Johnson, D.V. (eds.) *Date Palm Genetic Resources and Utilization, Volume 1*, Springer, **2015**, pp. 125–168.
- [14]– Bouguedoura, N., Benkhalifa, A., and Bennaceur, M. *Le Palmier Dattier en Algérie*. In: Aberlenc-Bertossi, F. (eds.) *Biotechnologies du Palmier Dattier*, IRD Éditions, France, **2010**, pp. 15–22.
- [15]– Boulal, A., Atabani, A.E., Mohammed, M.N., Khelafi, M., Uguz, G., Shobana, S., Bokhari, A., and Kumar, G. Integrated Valorization of *Moringa oleifera* and Waste *Phoenix dactylifera* L. Dates as Potential Feedstocks for Biofuels Production from Algerian Sahara: An Experimental Perspective. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, **2019**, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101234>.
- [16]– Chehma, A., and Longo, H.F. Valorisation des Sous-produits du Palmier Dattier en Vue de Leur Utilisation en Alimentation du Betail. *Rev. Energ. Ren. : Production et Valorisation – Biomasse*, **2001**, 59–64.
- [17]– Said Ahmed, H. (Thèse) *Etude de l'alimentation Hydrique du Palmier Dattier (Phoenix dactylifera L.) dans le Contexte Pedoclimatique de la Zone Littorale de la République de Djibouti*. Sciences agricoles. Université d'Orléans, France, Soutenu en **2015**.
- [18]– Oladza, S., Fallah, N., Mahboubi, A., Afsham, N., and Taherzadeh, M.J. Date Fruit Processing Waste and Approaches to its Valorization: A review. *Bioresource Technology*, **2021**, 340, 125r625.
- [19]– Laaboudi, A., Mouhouhe, B., Zaki, A., and Bouabouab-Mossab, K. Impact des Variations Climatiques sur les Rendements du Palmier Dattier dans la Région d'Adrar. *Recherche Agronomique*, **2011**, 24, 61–70.

- [20]– Zaki, A., Tirichine, A., Laaboudi, A., Moussaoui, B., and Kharsi, M. Knowledge of Genetic Resources of Date Palm in the Region of Adrar (Touat, Gourara and Tidikelt). *Acta Horticulturae*, **2013**, 994, 125–131.
- [21]– Boulal, A., Benali, B., Moulai, M., and Touzi, A. Transformation des Déchets de Dattes de la Région d’Adrar en Bioéthanol. *Revue des Energies Renouvelables*, **2010**, 13(3), 455–463.
- [22]– IPGRI, INRAA, INRAM, INRAT, FEM, PUND. *Descripteurs du Palmiers dattiers (Phoenix Dactylifera L.)*. Institut International des Ressources Phytogénétiques, Rome, Italie ; Fonds pour l’Environnement Mondial, Washington, Etats-Unis ; Programme des Nations Unies pour le Développement, New York, Etats-Unis ; Institut National de la Recherche Agronomique, d’Algérie, du Maroc et de Tunisie, **2005**.
- [23]– Pintaud, J.C., Ludeña, B., Aberlenc-Bertossi, F., Zehdi, S., Gros-Balthazard, M., Ivorra, S., and Bouguedoura, N. Biogeography of the Date Palm (*Phoenix dactylifera* L., *Arecaceae*). *Acta Horticulturae*, **2013**, 994, 19–38.
- [24]– Faiad, A., Alsmari, M., Ahmed, M.M.Z., Bouazizi, M.L., Alzahrani, B., and Alrobei, H. Date Palm Tree Waste Recycling Treatment and Processing for Potential Engineering Applications. *Sustainability*, **2022**, 14, 1134.
- [25]– Chandrasekaran, M., and Bahkali, A.H. Valorisation of Date Palm (*Phoenix dactylifera*) Fruit Processing By-products and Wastes Using Bioprocess Technology– Review. *Saudi Journal of Biological Sciences*, **2013**, 20(2), 105–120.
- [26]– Al-Alawi, R.A., Al-Mashiqri, J.H., Al-Nadabi, J.S.M., Al-Shihi, B.I., and Baqi, Y. Date Palm Tree (*Phoenix dactylifera* L.): Natural Products and Therapeutic Options. *Frontiers in Plant Science*, **2017**, 8, 1–12.
- [27]– Bezatot, S.Z.F. (Thèse) *Les Palmiers Dattiers «Phoenix dactylifera» à Toliara: Étude de la Filière, Utilisation et Diversité Variétale*. Université de Toliara, Madagascar. Soutenu en **2013**.
- [28]– Mariod, A.A., Mirghani, M.E.S and Hussein, I. *Phoenix dactylifera* Date Palm Kernel Oil. In: Mariod, A.A., Mirghani, M.E.S and Hussein, I. (eds.) *Unconventional Oilseeds and Oil Sources*. Academic Press, USA, **2017**, pp. 181–185.
- [29]– Abdul-Hamid, N.A., Abas, F., Ismail, I.S., Tham, C.L., Maulidiani, M., Mediani, A., Swarup, S., Umashankar, S., and Zolkeflee, N.K.Z. Metabolites and Biological Activities of *Phoenix dactylifera* L. Pulp and Seeds: A Comparative MS and NMR Based Metabolomics Approach. *Phytochemistry Letters*, **2019**, 31, 20–32.

- [30]– Achoura, A. (Thèse) *Contribution à la Connaissance des Effets des Paramètres Ecologiques Oasiens sur les Fluctuations des Effectifs Chez les Populations de la Cochenille Blanche du Palmier Dattier *Parlatoria blanchardi* Targ.1868, (Homoptera, Diaspididae) dans la Région de Biskra*. Université Mohamed Kheider –Biskra, Algérie, Soutenu en **2013**.
- [31]– Mansouri, A., Embarek, G., Kokkalou, E., and Kefalas, P. Phenolic Profile and Antioxidant Activity of the Algerian Ripe Date Palm Fruit (*Phoenix dactylifera*). *Food Chemistry*, **2005**, *89*(3), 411–420.
- [32]– Biglari, F., AlKarkhi, A.F.M., and Easa, A.M. Antioxidant Activity and Phenolic Content of Various Date Palm (*Phoenix dactylifera*) Fruits from Iran. *Food Chemistry*, **2008**, *107*(4), 1636–1641.
- [33]– Vayalil, P.K. Antioxidant and Antimutagenic Properties of Aqueous Extract of Date Fruit (*Phoenix dactylifera* L. Arecaceae). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **2002**, *50*(3), 610–617.
- [34]– Al-Farsi, M., Alasalvar, C., Morris, A., Baron, M., and Shahidi, F. Comparison of Antioxidant Activity, Anthocyanins, Carotenoids, and Phenolics of Three Native Fresh and Sun-Dried Date (*Phoenix dactylifera* L.) Varieties Grown in Oman. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **2005**, *53*(19), 7592–7599.
- [35]– Barreveld, W.H. (eds.) *Date Palm Products*. Fao Agricultural Services Bulletin No. 101, **1993**.
- [36]– Boulal, A., Kihal, M., Khelifi, C., and Benali, B. Bioethanol Production from Date palm Fruit Waste Fermentation using Solar Energy. *African Journal of Biotechnology*, **2016**, *15*(30), 1621–1627.
- [37]– Acourene, S., Djafri, K., Djidda, A., and Amourache, L. Utilization of Date Wastes as a Substrate for the Production of Citric Acid and α -Amylase. *Acta Horticulturae*, **2013**, *994*, 135–149.
- [38]– Chihaoui, B., Serra-Parareda, F., Tarrés, Q., Mutjé, P., Delgado-Aguilar, M., and Boufi, S. Valorization of Date Palm Waste for Plastic Reinforcement: Macro and Micromechanics of Flexural Strength. *Polymers*, **2021**, *13*(11), 1751.
- [39]– Zerlli, A., Elfalleh, W., Ghorbal, A., and Chaouachi, B. Valorisation of Date Palm Waste by Lignin Extraction to be Used for the Improvement of Polymeric Membrane Characteristics. *Periodica PPolytechnicChemical Engineering*, **2022**, *66*(1), 70–81.
- [40]– Habchi, A., Kalloum, S., and Bradai, L. Follow the Degradation of Organic Matter During Composting of Date Palm (*Phoenix dactylifera* L) Waste by Physicochemical Properties, UV-visible and FT-IR Analysis.

International Journal of Environmental Analytical Chemistry, **2020**, 1–18.

- [41]– Benabderrahim, M.A., Elfalleh, W., Belayadi, H., and Haddad, M. Effect of Date Palm Waste Compost on Forage Alfalfa Growth, Yield, Seed Yield and Minerals Uptake. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, **2018**, 7(1), 1–9.
- [42]– Hong, Y.J., Tomas-barbarian F.A., Kader, A.A., and Mitchell, A.E. The Flavonoid Glycosides and Procyanidin Composition of Deglet Noor Dates (*Phoenix dactylifera*). *J. Agric. Food Chem*, **2006**, 54, 2405–2411.
- [43]– Bouchachia, S. Valorization of Date Waste: Comparative Study between the Dry Variety of Dates Mesch-Degla and the Must of Fermentation. *Journal of Advanced Research in Science and Technology*, **2019**, 6(2), 1078–1089.

Chapitre II :
Biocarburants &
Production du
Biodiesel

II.1- GENERALITE

La rareté des combustibles fossiles classiques, les émissions croissantes de polluants générés par la combustion et leurs coûts croissants rendront les sources de biomasse plus attrayantes. D'autre part, l'utilisation de la biomasse, à laquelle de nombreuses personnes s'intéressent déjà, présente les propriétés d'être une source de biomasse et une source neutre en carbone.

Le biocarburant a été reconnu comme un carburant alternatif potentiel dans le scénario de transport de l'avenir. Le biocarburant pourrait être un remplacement positif du combustible fossile car il pourrait atténuer les demandes excédentaires de ce dernier dans un avenir proche et pourrait également réduire les émissions de carbone [1]. Les biocarburants sont produits à partir de ressources renouvelables issues de la biomasse, comme les plantes, les sous-produits animaux ou les micro-organismes, même si l'huile d'arachide a été utilisée pour la première fois comme carburant diesel il y a environ un siècle [2].

En général, les biocarburants sont des carburants liquides (comme : le méthanol, l'éthanol, l'essence, le biodiesel ou le diesel Fischer Tropsch) gazeux (l'hydrogène, le méthane, et le GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié) et solides (les houilles, le bois ou le charbon du bois), qui sont principalement produits à partir de la biomasse. Les biocarburants renouvelables et neutres en carbone sont nécessaires pour assurer la durabilité environnementale et économique [3]. Les biocarburants ont été mis au point comme un remplacement écologiquement et socialement acceptable des hydrocarbures fossiles [4].

II.2- CONTEXTE HISTORIQUE

Contrairement à la perception générale selon laquelle les biocarburants sont une classe émergente de vecteurs énergétiques, l'histoire de la production de biocarburants remonte au XVI^{ème} siècle, lorsque les Assyriens, puis les Perses,

ont utilisé le biogaz pour le bien de la société urbaine. Un résumé historique de la production de biocarburants est présenté au Tableau 02 [5].

Tableau 02 : Événements initiaux des biocarburants.

Type de biocarburant	Année d'apparition	Pionniers	Région	Autres notes
Biogaz (biométhane)	XVI ^{ème} Siècle	Perses and Assyriens	Moyen-Orient	- Au XVII ^{ème} siècle, Van Helmont rapporte qu'un gaz inflammable est produit à partir de matières organiques décomposées. - John Dalton et Humphrey Davy ont été les premiers scientifiques à réaliser indépendamment la nature du gaz inflammable sous forme de biométhane pendant la première décennie du XIX ^e siècle.
Biobutanol	1861	L. Pastor	France	La production de Biobutanol a augmenté pendant les deux guerres mondiales dans de nombreux pays, mais l'utilisation du biobutanol a ensuite diminué en raison du coût élevé des matières premières.
Biodiesel	1853	E. Duffy and J. Patrick	–	En Allemagne, en 1893, le développement du premier modèle de Rudolf Diesel, un cylindre de fer de 10 pieds de long avec un volant d'inertie à sa base, a également joué un rôle important dans l'introduction mondiale du biodiesel.
Biohydrogène	1939	H. Gaffron	États-Unis	La production de biohydrogène a été signalée pour la première fois dans une algue, <i>Chlamydomonas reinhardtii</i> . Au XX ^{ème} siècle, A. Melis (Université de Californie) a expliqué que les enzymes sont responsables de la production de biohydrogène.
Bioéthanol	1859	E. Drake	États-Unis	- Dans une enquête menée par Eugen Langen, Samuel Morey et Nicholas Otto ont utilisé des mélanges de bioéthanol dans des moteurs à combustion interne. - Henry Ford a également joué un rôle important dans le développement de l'industrie du bioéthanol.

II.3- CLASSIFICATION DES BIOCARBURANTS

L'un des principaux facteurs à considérer dans la production de biocarburants est la matière première, c'est-à-dire les matières premières utilisées dans ce processus (Figure 30). Non seulement le coût final est-il directement

proportionnel au prix des matières premières disponibles, mais une grande partie du processus est liée aux différents prétraitements requis pour différentes matières premières. Cela signifie qu'en choisissant ou en adoptant la bonne matière première, il est possible d'obtenir simultanément des avantages tels qu'un rendement élevé et un faible coût de production, des procédés durables et des problèmes environnementaux moindres [5].

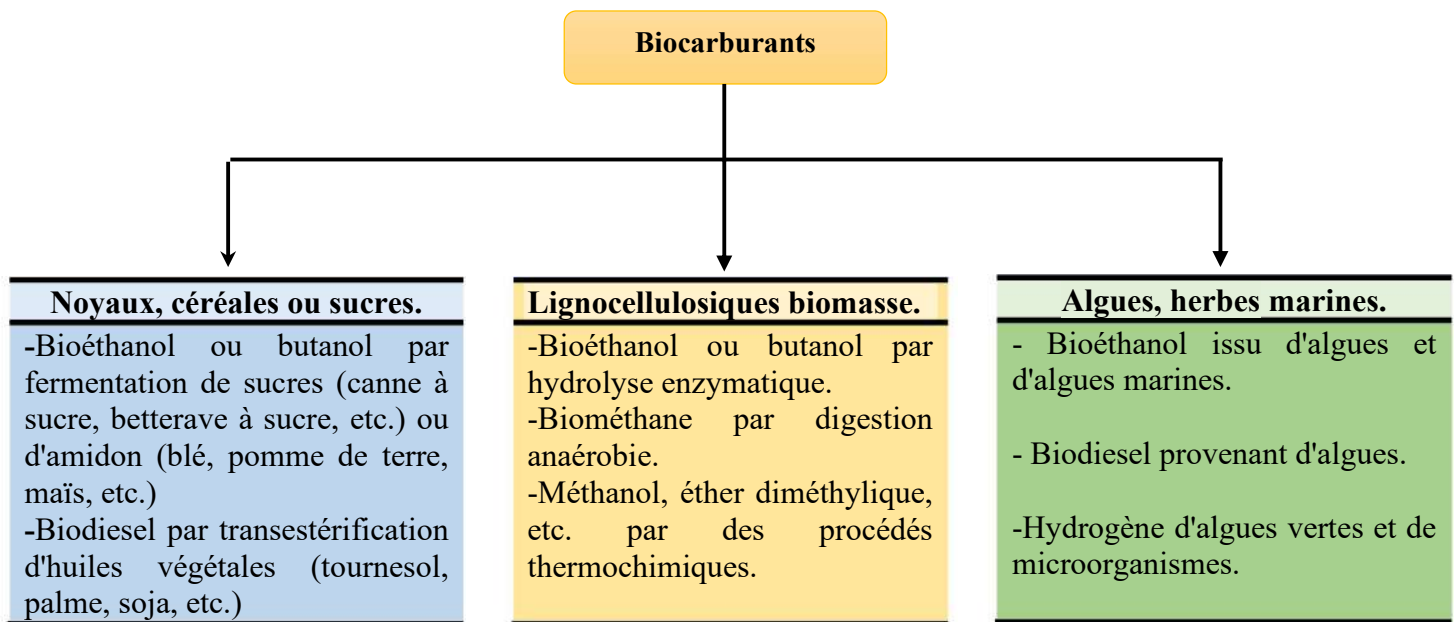


Figure 30 : Différentes matières premières de biocarburants.

Selon les matières premières utilisées dans la production de biocarburants ; on peut les classer en :

II.3.1- Biocarburants de première génération

Les biocarburants de première génération sont produits à partir de semences et de plantes comestibles. Ce groupe comprend principalement le maïs, le blé, la canne à sucre, la betterave à sucre et le manioc, ainsi que le tournesol, le soja, le colza, le palmier. Ces matières premières peuvent être converties en biocarburants : bioalcools et biodiesel ; par des procédés tels que la fermentation et la transestérification, respectivement [5-6].

a) Ressources de bioalcools

➤ **Canne à sucre :** La canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.) appartient à la famille des graminées (*Poaceae*). La canne à sucre est la matière

première la plus importante pour la production de bioéthanol fermenté [5]. Le bioéthanol est produit dans des usines de production mixte sucre-bioéthanol (le type le plus courant d'usines de bioéthanol, produisant à la fois du bioéthanol et du sucre cristallisé) et dans des distilleries autonomes (produisant uniquement du bioéthanol) [7].

➤ **Sorgho** : Le sorgho (*Sorghum bicolor* L.), un genre d'herbe comptant plus de 30 espèces, est une autre plante comestible ; les noyaux produits sont utilisés pour fabriquer des céréales, du pain et ...etc., tandis que les résidus peuvent être utilisés comme aliments pour animaux [5]. Les tiges de sorgho sont riches en sucres solubles (glucose, saccharose et fructose) et en glucides insolubles (cellulose et hémicellulose) (Figure 31) et servent de source d'énergie pour la production de biocarburants. Le jus sucré de la tige de sorgho est fermenté pour produire de l'éthanol, qui est utilisé comme carburant [8].

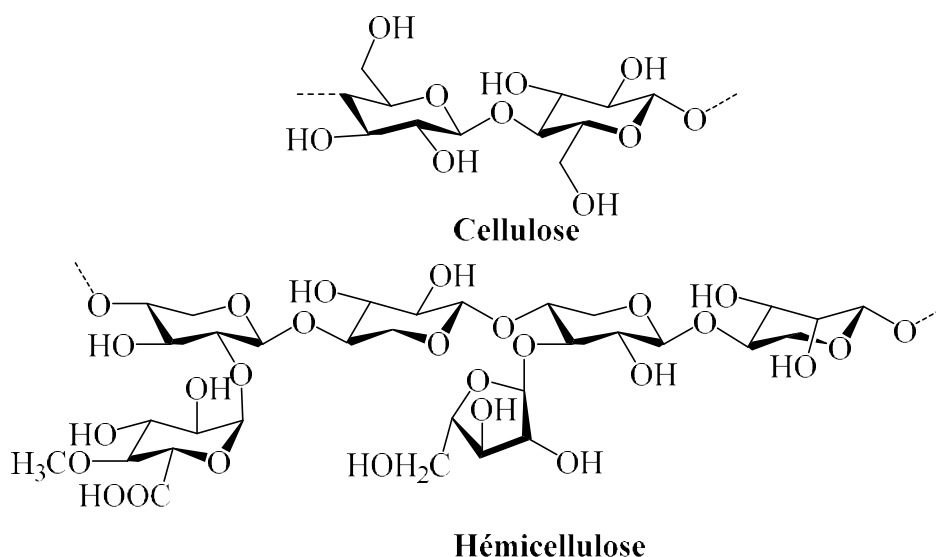


Figure 31 : Structure chimique de la cellulose et de l'hémicellulose.

La bioconversion des hexoses devrait théoriquement donner 51,1 % d'éthanol et 48,9 % de dioxyde de carbone. Le saccharose, le glucose et le fructose sont les sucres fermentescibles du sorgho sucré : il a été suggéré d'utiliser une moyenne des valeurs de ces sucres pour calculer le rendement théorique en alcool. Sur cette base, chaque kilogramme de sucre fermentescible de sorgho sucré produirait 663 mL d'éthanol [9].

➤ **Maïs et blé** : Le maïs et le blé sont cultivés et utilisés non seulement comme produits alimentaires et fourragers, mais aussi comme matières pour la

production des biocarburants dans de nombreux pays, ce qui a suscité la controverse sur la concurrence entre les biocarburants de première génération et le marché alimentaire. La production de bioéthanol par fermentation biologique de sucres extraits de plantes riches en sucre (comme la canne à sucre) et de plantes amylacées (le maïs et le blé) est une technique éprouvée et commercialisée avec succès [10–11].

Le maïs est une ressource importante de bioalcools. Les principaux producteurs d'éthanol à base de maïs sont les États-Unis et le Brésil. La forte teneur en amidon du maïs et le développement rapide des technologies de culture et de transformation font de cette plante une bonne option pour la production de bioalcool [5].

Environ 40 % du maïs total produit aux États-Unis est utilisé pour la production d'éthanol. Le broyage humide et le broyage à sec sont les deux principaux procédés conventionnels utilisés pour la production d'éthanol à partir du maïs. Dans le procédé de broyage humide, le maïs est fractionné en composants de base, tels que l'amidon, le germe, les fibres et les solubles, et seul l'amidon est traité pour la production d'éthanol. Cependant, dans le procédé conventionnel de broyage à sec, le grain de maïs entier est transformé pour la production d'éthanol et les matières non amylacées sont récupérées à la fin du processus en tant que coproduits [12].

Après le maïs et le riz, le blé est la troisième céréale la plus produite. L'amidon dans la structure des noyaux pourrait être hydrolysé en sucre monomère pour la fermentation en bioalcools par des procédés appropriés [5].

b) Ressources de biodiésel

➤ **Soja** : L'huile de soja (*Glycine max* L.) contient cinq acides gras différents : oléique, palmitique, linoléique, linoléinique et stéarique. En raison de sa forte teneur en huile (15–20 %), cette graine est une matière première avec un rendement élevé pour la production de biodiesel [5]. Il s'agit d'un procédé relativement simple par lequel le triacylglycérol est transestérifié en utilisant le méthanol et un catalyseur alcalin. Pour chaque 10 kg d'huile de soja, qui réagit avec 1 kg de méthanol, on produit environ 10 kg de biodiesel (Ester Méthylique d'Acide Gras EMAG) et 1 kg de glycérine brute comme sous-produit [13].

Un degré élevé de biodégradation, une toxicité réduite, de faibles émissions, une augmentation du pouvoir lubrifiant et une amélioration du point d'éclair font du biodiesel dérivé du soja l'une des meilleures options pour les mélanges avec du carburant diesel. Comparativement au colza, on dit que l'huile de soja (presque 86 % des composés insaturés) possède une plus faible stabilité à l'oxydation. Le mélange avec du carburant pétro-diesel est considéré comme une solution pour compenser cet inconvénient du biodiesel de soja [5].

➤ **Tournesol** : Le tournesol (*Helianthus annuus* L.), appartenant à la famille des *Compositae*, est un oléagineux important, utilisé pour la production d'huile comestible, avec une production annuelle de 25,1 millions de tonnes. Le tournesol à haute teneur en huile est l'une des cultures oléagineuses les plus importantes pour la production de biodiesel. La composition des acides linoléique, oléique et linoléique dans l'huile a eu un effet sur la stabilité oxydative. L'huile de tournesol contient environ 70 % d'acide linoléique et elle est très sensible à l'oxydation lipidique [14–15].

➤ **Huile de palme** : L'huile de palme est extraite de fruits de palme, principalement exportés par des pays situés dans des régions tropicales comme les pays d'Asie du Sud-Est (Malaisie, Indonésie et Thaïlande). La production peu coûteuse d'huile de palme comparativement à l'huile de soya et de colza fait de cette matière première une option supérieure d'un point de vue économique (0,26 ha de terres pour produire 1 tonne de l'huile de palme) [5]. Récemment, la plantation de palmiers à huile a été critiquée pour causer plusieurs problèmes environnementaux graves tels que la déforestation et la destruction de l'habitat d'espèces menacées [16–17].

II.3.2- Biocarburants de deuxième génération

Parce qu'il existe des doutes sur l'impact environnemental des biocarburants de première génération, d'une part, et sur leur influence sur la sécurité alimentaire et les prix, d'autre part, les biocarburants de deuxième génération ont été développés. Ces biocarburants sont issus de ressources lignocellulosiques, de biomasse ligneuse et de noyaux non comestibles comme le *Jatropha curcas*, ainsi que les matières premières d'huiles usées, toutes disponibles à bas prix. Les résidus générés dans l'industrie alimentaire et lors de la production de biocarburants de première génération peuvent être utilisés comme

substrats pour la production de biocarburants de deuxième génération ; comme la bagasse de la canne à sucre ou de la paille de blé et de maïs [5].

a) Ressources de bioalcool et de biogaz

➤ **Biomasse lignocellulosique** : La biomasse lignocellulosique est constituée de résidus provenant de l'agriculture et de la foresterie avec une estimation de 10 milliards de tonnes par an. Selon l'opinion conventionnelle, les résidus doivent être éliminés pour prévenir la propagation de la maladie au cours de la prochaine saison agricole. Selon un autre point de vue, les résidus, en tant que biomasse lignocellulosique, constituent une grande réserve de carbone, la clé de voûte de la production d'énergie et de produits chimiques bruts. La structure moléculaire complexe des matériaux lignocellulosiques les rend à une ressource difficile pour la production de biocarburants. Ils se composent généralement de 30 à 56 % de cellulose, de 10 à 27 % d'hémicellulose et de 3 à 30 % de lignine [5; 18].

À l'échelle mondiale, de nombreux résidus agricoles lignocellulosiques comme la paille de riz, la paille de blé, la bagasse de canne à sucre, le sommet de la canne à sucre, la tige de coton et le bambou tendre ont été utilisés pour produire du bioéthanol comme matières premières disponibles en abondance. Les matériaux lignocellulosiques peuvent être classés en quatre groupes selon le type de ressource : (1) les résidus forestiers, (2) les déchets solides municipaux, (3) les déchets de papier et (4) les résidus de récoltes. Ces matériaux pourraient produire jusqu'à 442 milliards de litres de bioéthanol par an. Le coût de production du bioéthanol à partir de cultures agro-alimentaires est très élevé car les matières premières (maïs ou canne à sucre) représentent environ 40–70% du coût de production [3].

La paille de blé est l'un des déchets agricoles les plus abondants au monde. Comme les autres biomasses lignocellulosiques, la paille de blé est un mélange complexe de cellulose (30–40 %), d'hémicellulose (20–30 %) et de lignine (15–20 %). A l'heure actuelle, il est utilisé comme aliment pour les animaux ou comme compost pour nourrir le sol. Néanmoins, la plupart d'entre eux sont jetés négligemment ou brûlés en plein champ, ce qui pose de graves problèmes d'environnement et de sécurité. Il est donc nécessaire de trouver des alternatives

plus durables et plus respectueuses de l'environnement pour la gestion de la paille de blé. La digestion anaérobie est une technique fortement recommandée pour le traitement des déchets organiques parce qu'elle aide à la production de biométhane (biogaz), qui est un carburant écologique et renouvelable [19].

Jaffar *et al*, 2016, ont amélioré la biodégradabilité de la paille de blé pendant la digestion anaérobie, par un traitement avec l'hydroxyde de potassium (KOH) pour réduire le temps de digestion et améliorer la production de biométhane. La production de biogaz et le rendement cumulé en biométhane de 258 mL de CH₄/g de matières solides volatiles ont augmenté de 45 et 41 % respectivement, par rapport à la paille de blé non traitée [20].

Dans le contexte de la production de biohydrogène, les tiges de maïs ou les pailles de blé sont l'une des ressources cellulosiques les plus importantes dans la nature. Zhang *et al*, 2016 ont produit le biohydrogène à partir des pailles ou des tiges de maïs avec un rendement en hydrogène plus élevé de 51,9 L de H₂/kg, avec des procédés de fermentation utilisant un système de co-culture en combinaison avec des *Clostridium cellulolyticum* (bactéries produisant l'hydrogène à partir d'une biomasse lignocellulosique), et *Citrobacter amalonaticus* (bactéries produisant l'hydrogène à partir d'une biomasse non cellulosique) [21].

b) Ressources de biodiesel

➤ **Jatropha** : Le *Jatropha curcas* L., est originaire du Mexique mais on le trouve aussi dans de nombreux pays tropicaux d'Asie et d'Afrique. Le jatropha est un membre de grande et diverse famille des *euphorbiacées*. Le jatropha est une graine non comestible dont l'huile peut être utilisée directement comme carburant dans les moteurs diesel adopté ou transestérifié pour être mélangée au diesel de pétrole jusqu'à 25 %. L'huile produite de cette plante peut être facilement convertie en biocarburant liquide [5 ; 22–23]. La composition de l'huile de *J. curcas* est constituée d'acides gras principaux, tels que l'acide palmitique (13 %), l'acide stéarique (2,53 %), l'acide oléique (48,8 %) et l'acide linoléique (34,6 %). L'huile de jatropha contient un pourcentage élevé d'acides gras insaturés, soit environ 78–84 % [24].

➤ *Déchets d'huiles de cuisson et graisses animales* : Les huiles usagées de cuisson et les graisses animales sont considérées comme une alternative intéressante pour la synthèse du biodiesel, en raison de leur faible coût et de leur disponibilité élevée. En outre, l'utilisation d'huiles usagées réduit la concurrence avec la demande alimentaire. Le coût des huiles usagées, est de deux à trois fois inférieur à celui des huiles végétales raffinées. Leur utilisation réduirait également les coûts d'élimination et de traitement de ces résidus. D'autre part, les huiles usagées contiennent d'autres composés en plus des triacylglycérols, en raison de réactions chimiques pendant le processus de cuisson des aliments. Ces composés comprennent l'eau, les acides gras libres (AGL), les composés polaires et les composés non volatils qui affectent principalement les réactions de transestérification catalytique [25]. D'autre part, ce procédé ne peut être appliqué strictement qu'aux huiles raffinées ou aux graisses très pures. La teneur en acides gras libres AGL ne doit pas dépasser 0,1 à 0,5 % en poids et l'humidité doit être absente. En fait, la présence éventuelle d'AGL dans la matière première huileuse peut créer de graves complications en raison de la formation de savon (comme produit de la réaction avec le catalyseur) [26].

II.3.3- Biocarburants de Troisième génération

Les biocarburants de troisième génération sont produits à partir de microalgues et d'autres microorganismes comme les cyanobactéries, les bactéries, les champignons et les levures. Cela pourrait éviter la concurrence entre les biocarburants et les aliments pour les ressources et la terre. Par conséquent, les préoccupations concernant les inconvénients et l'augmentation des prix des denrées alimentaires s'en trouveraient atténuées [5].

L'utilisation d'algues, de microalgues et de cyanobactéries pour la production de biocarburants de troisième génération présente de nombreux avantages par rapport aux plantes pour la production de biocarburants de 1^{ière} et 2^{ième} génération. Cela est dû à leur croissance plus rapide, à leur capacité de se développer dans plusieurs conditions, y compris dans les eaux usées, à la réduction des besoins en eau et autres ressources et à la possibilité de ne pas occuper de terres arables pour leur culture [27].

Chia *et al.* 2018, ont trouvé que la méthode de culture est l'un des facteurs importants pour obtenir un biocarburant de haute qualité. Si la culture des microalgues se fait avec une utilisation efficace des ressources en termes d'engrais, d'eau et de source de CO₂, la production de combustibles microalgues peut être compétitive par rapport aux combustibles fossiles [28].

a) Ressources de bioalcools

➤ **Algues** : Les algues ont été considérées comme l'une des sources alternatives les plus prometteuses pour la production de biocarburants. Les algues sont un groupe d'organismes eucaryotes, allant des formes unicellulaires aux formes multicellulaires. Les algues désignent à la fois les microalgues et les macroalgues [29].

Les microalgues sont des microorganismes photosynthétiques qui existent sous forme de cellules individuelles ou de chaînes de cellules. Contrairement aux macroalgues, elles ne forment pas divers organismes multicellulaires. Les microalgues vivent dans des milieux salins ou d'eau douce et convertissent la lumière du soleil, le dioxyde de carbone et l'eau en biomasse des algues. Les macroalgues sont plus difficiles à cultiver dans les bioréacteurs et n'ont donc pas encore fait l'objet de recherches aussi vastes que les microalgues. A l'inverse, les microalgues ont des taux de croissance plus rapides, des teneurs en huile plus élevées et des structures moins complexes que les macroalgues [29]. Le potentiel de production de bioéthanol de troisième génération à partir de biomasse alternative comme les microalgues et les macroalgues a suscité un intérêt considérable [30].

Les algues pourraient être exposées à des processus par lesquels les sucres intracellulaires, la cellulose ou l'amidon (Figure 32) pourraient être extraits et fermentés en bioéthanol ou biobutanol. En fait, les algues offrent de nombreux avantages par rapport aux autres cultures énergétiques et cellules microbiennes dans la synthèse enzymatique industrielle, notamment une plus grande productivité de la biomasse, une meilleure efficacité photosynthétique avec une conversion du CO₂, une production d'O₂ plus élevées et une source d'azote, ce qui réduit les coûts [5 ; 31]. Le biobutanol produit à partir de la biomasse des

microalgues est en train de devenir un biocarburant de pointe et devrait remplacer le bioéthanol à un moment donné [32].

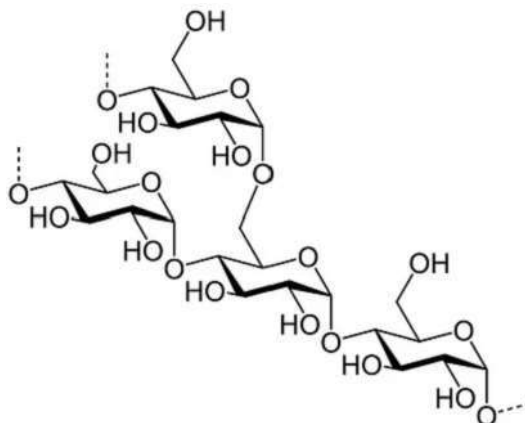


Figure 32 : Structure chimique de l'amidon.

➤ **Cyanobactéries** : Les cyanobactéries sont considérées comme l'un des plus importants producteurs de biomasse sur la terre. Leur rôle dans le cycle biogéochimique des éléments ne peut être exclu. Ils sont maintenant largement utilisés comme organismes modèles pour l'étude des voies photosynthétiques, de la production de biocarburants et de métabolites secondaires [33–34].

Il a été démontré que les souches de cyanobactéries produisent une quantité importante de bioéthanol. Les cyanobactéries comprennent un groupe de bactéries oxygénées qui permettent d'obtenir de l'énergie par photosynthèse. Elles sont communément appelées algues bleu-vert (ancien nom), bien que le terme algues soit généralement associé aux organismes eucaryotes. Ces microorganismes n'ont aucun lien phylogénétique avec les algues eucaryotes. [6; 27]–.

Grâce à leurs propriétés photosynthétiques uniques, les cyanobactéries sont capables de convertir jusqu'à 10 % de l'énergie solaire en biomasse. Ce chiffre est considérablement plus élevé que celui de 1 % enregistré par les cultures énergétiques conventionnelles comme le maïs ou la canne à sucre, ou que celui converti par les algues (5 %). Par conséquent, ces microorganismes photosynthétiques pourraient être considérés comme des matières premières écologiquement durables et économiquement efficaces pour la production de différents types de biocarburants, dont les bioalcools [5]. Elles jouent un rôle important dans la séquestration biologique globale du carbone, la production

d'oxygène et le cycle de l'azote. Les cyanobactéries peuvent être développées comme une excellente usine de cellules microbiennes capables de capter l'énergie solaire et de convertir le CO₂ atmosphérique en produits utiles [35].

b) Ressources de biodiesel

Les microorganismes oléagineux sont des micro-organismes ayant une teneur en lipides supérieure à 20 % ; dont certains accumulent des lipides intracellulaires jusqu'à 70 % en poids de leur masse. Ils sont utiles pour l'extraction de l'huile et la production de biodiesel. Le potentiel de ces organismes apparaît exceptionnel : les capacités de production de lipides ont été calculées entre 100 et 300 fois supérieures à celles du soja [36], qui en résulte pourraient être classés dans un certain nombre de groupes, dont les plus importants sont les suivants :

➤ **Algues et cyanobactéries:** Les algues et les cyanobactéries présentent des avantages potentiels pour les biocarburants dérivés des lipides, en particulier la production de biodiesel, en raison de leur grande capacité à transformer le dioxyde de carbone en lipides sans se disputer les terres arables nécessaires aux cultures agricoles oléagineuses [5 ; 37–38].

Elles sont considérées comme la meilleure source de production de biodiesel, car d'autres sources peuvent causer des problèmes alimentaires, car elles comprennent principalement les plantes qui sont utilisées pour la production alimentaire. Leur rôle d'assainissement dans le traitement des eaux usées et la richesse des sources de biodiesel les rendent aptes à être cultivées à grande échelle. Le biocarburant des algues ne contient pas de produits chimiques nocifs, de sorte que l'environnement peut être maintenu propre après leur combustion. [39]. Comparativement, les cyanobactéries sont des organismes plus avantageux en raison de leur croissance cellulaire plus rapide et du fait qu'elles sont naturellement transformables [5].

➤ **Bactéries :** Atteindre une biomasse volumineuse en seulement 12–24 h fait de cette espèce bactérienne un microorganisme à croissance rapide pour la production de biodiesel, tout comme les algues. Les bactéries produisent des hydrocarbures ainsi que des lipides. Le biodiésel (en forme des EMAG) est formé après la transestérification des lipides en présence de méthanol et d'un acide

comme catalyseur. La composition en acides gras (saturés ou insaturés) joue un rôle important dans la détermination des propriétés du biodiesel comme carburant [40].

Il y a peu de bactéries disponibles qui sont intrinsèquement capables de produire des lipides par une voie biologique ou métabolique. Par exemple, *Arthrobacter sp.* est une bactérie dont la teneur en huile peut aller jusqu'à 40 %. Dans l'ensemble, certaines souches bactériennes produisent de grandes quantités de lipides, mais comme ces lipides sont générés dans la membrane externe, ils sont difficiles à extraire. Par conséquent, la production de biodiesel à partir de ressources lipidiques bactériennes n'est toujours pas réalisable industriellement [5].

➤ **Levure** : Sous certaines conditions de culture, différentes levures telles que *Cryptococcus albidus*, *Lipomyces lipofera*, *Lipomyces starkeyi*, *Rhodospiridium toruloides*, *Rhodotorula glutinis*, *Trichosporon pullulan*, et *Yarrowia lipolytica* sont capables de produire des lipides [5]. Ces levures peuvent accumuler des lipides de plus de 20 % de leur biomasse, alors que la levure de bière ou de boulangerie et la levure alimentaire sont généralement incapables d'accumuler des lipides de plus de 5 à 10 % de leur biomasse. Par rapport à d'autres espèces oléagineuses comme les microalgues et les champignons, les levures sont les plus avantageuses en raison de leur croissance rapide, de leur teneur élevée en lipides et de leur capacité à utiliser des milieux de fermentation peu coûteux comme les résidus agricoles et industriels [41–42].

L'analyse des huiles extraites de ces souches de levure a révélé que les principaux acides gras dans leur structure sont l'acide myristique, l'acide palmitique, l'acide stéarique, l'acide oléique, l'acide linoléique et l'acide linoléique. Cela signifie que la qualité du biodiesel produit pourrait être équivalente à celle obtenue à partir d'huiles de noyaux catalysées chimiquement ou enzymatiquement [5].

II.4- CARACTERISTIQUES DES BIOCARBURANTS

Aujourd'hui, seuls les biocarburants de première génération, produits à partir de cultures alimentaires, sont commercialisables. Le marché de l'éthanol est fortement concentré. En effet, le Brésil et les États-Unis produisent et

consomment environ 80 % de l'éthanol mondial. Le marché du biodiesel est surtout développé dans l'Union européenne. À l'heure actuelle, seul l'éthanol brésilien est compétitif par rapport au pétrole. En effet, l'éthanol brésilien bénéficie d'un meilleur rendement énergétique grâce à la forte productivité par hectare de la canne à sucre et à un meilleur taux de conversion de la canne à sucre en éthanol. De ce fait, produire un litre d'éthanol à partir de maïs est deux fois plus onéreux que produire un litre d'éthanol au Brésil (Tableau 03) [43].

Tableau 03 : Caractéristiques des biocarburants de première génération [43].

Ethanol			
Culture Type	Maïs	Sucre de canne	
Rendement (tonnes/hectare)	9,68	73,5	
Coefficient de conversion (litres/tonne)	403	82,4	
Rendement énergétique (litres/hectare)	3 904	6 200	
Efficacité énergétique (MJ/litre)	21,27	21,27	
Coût de production (US\$/litre)	0,27	0,15	
Gaz à Effet de Serre (gCO₂/MJ)	60,96	26,07	
Biodiesel			
Culture type	Colza	Huile de palme	
		Indonésie	Malaisie
Rendement (tonnes/hectare)	3,8	17,8	20,6
Coefficient de conversion (litres/tonne)	251	230	230
Rendement énergétique (litres/hectare)	954	4 092	4 736
Efficacité énergétique (MJ/litre)	31,96	31,96	31,96
Coût de production (US\$/litre)	0,54	0,18	0,18
Gaz à Effet de Serre (gCO₂/MJ)	62	55	55

Les biocarburants de seconde génération sont élaborés à partir de cultures non alimentaires (*jatropha*) ou graminées (*miscanthus*, *switchgrass*), de paille ou de bois mais aussi de déchets agricoles ou alimentaires. Plus généralement, sont regroupés sous ce vocable tous les biocarburants qui ne sont pas commercialisables à grande échelle à cause de technologies de conversion de la plante en biocarburants immatures et trop coûteuses. Leur capacité mondiale de production est limitée à 5 milliards de litres en 2013. Ces biocarburants présentent

deux avantages majeurs par rapport à ceux de première génération (Tableau 04). D'une part, ils bénéficient de meilleurs rendements. L'écart de rendement entre l'éthanol lignocellulosique et l'éthanol de première génération est d'un pour deux aux États-Unis. D'autre part, les terres nécessaires à leur production ne sont pas exploitées pour la production alimentaire et sont des terres de faible qualité. Enfin, ils bénéficient d'une meilleure empreinte carbone. En effet, ils permettent une économie moyenne de 84 % des émissions de carbone par rapport au pétrole. Malgré leurs performances productives et environnementales, ils restent onéreux [43].

Tableau 04 : Caractéristiques des biocarburants de deuxième génération [43].

Ethanol cellulosique		
Culture Type	Miscanthus <i>(Miscanthus sinensis)</i>	Switchgrass <i>(Panicum virgatum)</i>
Rendement (tonnes/hectare)	23,5	9,04
Coefficient de conversion (litres/tonne)	330	330
Rendement énergétique (litres/hectare)	7 759	2 988
Efficacité énergétique (MJ/litre)	21,27	21,27
Coût de production (US\$/litre)	0,60	0,70
Gaz à Effet de Serre (gCO₂/MJ)	6,02	15,96
Biodiesel		
Culture type	Miscanthus <i>(Miscanthus sinensis)</i>	Switchgrass <i>(Panicum virgatum)</i>
Rendement (tonnes/hectare)	23,5	9,04
Coefficient de conversion (litres/tonne)	179	179
Rendement énergétique (litres/hectare)	4 211	1 622
Efficacité énergétique (MJ/litre)	35,80	35,80
Coût de production (US\$/litre)	1,18	1,34
Gaz à Effet de Serre (gCO₂/MJ)	4,55	16,02

Le développement des biocarburants de troisième génération produits à partir d'algues est déjà engagé mais reste au stade expérimental.

II.5- PROCÉDES DE PRODUCTION DE BIODIESEL

Le biodiesel (BD) est un biocarburant renouvelable qui peut être utilisé en mélange avec le diesel dans les moteurs diesel. Il est produit par transestérification d'une huile végétale (HV) ou d'une graisse animale et d'un alcool à chaîne courte. Le résultat est un mélange d'esters méthyliques d'acides gras (EMAG) et de glycérine, ainsi que de méthanol et d'autres substances en faibles concentrations, sous forme de mono- et di-glycérides. Après la purification, l'EMAG peut être appelé biodiesel s'il est conforme aux normes internationales ASTM D6751 et EN 14214 (Tableau 05) [44]. Comparé au diesel dérivé du pétrole, le biodiesel diminue les émissions de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures et réduit la formation de fumée. De plus, le biodiesel présente un pouvoir lubrifiant et une biodégradabilité supérieure à ceux du pétrodiesel, il est un biocarburant non toxique et sans soufre [45–46].

Tableau 05 : Les normes internationales (Biodiesel) [47–48].

Propriétés	Unité	Méthode d'essai	Limite	
			ASTM D6751	EN 14214
Densité à 15 °C	kg/m ³	ASTM D1298	–	860-900
Viscosité cinématique à 40 °C	mm ² /sec	ASTM D445	1.9–6.0	3,5–5,0
Indice de réfraction	–	–	–	–
Indice d'iode	g I ₂ /100 g	EN 14111	–	120 (max)
Indice de Saponification	mg KOH/g	–	–	–
Indice d'acide	mg KOH/g	ASTM D664	0,5 (max)	0,5 (max)
Nombre de Cétane	–	–	48–65	51 (min)
Pouvoir Calorifique Supérieur	MJ/kg	–	35 (min)	36 (min)

Le biodiesel s'est imposé comme une alternative prometteuse au gasoil et possède les propriétés attractives suivantes : [49]

- ✓ Peut brûler jusqu'à 75 % moins polluant que le diesel conventionnel, surtout à partir de combustibles fossiles ;
- ✓ Peut réduire la quantité d'hydrocarbures imbrûlés, de monoxyde de carbone et de particules dans les gaz d'échappement ;
- ✓ Sans soufre ;
- ✓ Réduire le potentiel de formation d'ozone ;

- ✓ Réduire les émissions d'oxyde nitreux (NO_x) en ajustant le temps de calage du moteur ;
- ✓ L'odeur n'est pas désagréable et ne cause pas d'irritation oculaire ;
- ✓ Une énergie respectueuse de l'environnement et renouvelable ;
- ✓ Peut être utilisé dans n'importe quel moteur diesel et l'économie de carburant est la même que celle d'un carburant diesel conventionnel ;
- ✓ Meilleur lubrifiant que le carburant diesel conventionnel et permet de prolonger la durée de vie du moteur ;
- ✓ Capable d'améliorer les performances du moteur ;
- ✓ Peut-être mélangé avec du carburant diesel ordinaire dans n'importe quelle proportion.

Chimiquement, les huiles végétales HV sont des molécules de triglycérides TG avec des différences structurelles dans leur groupement alkyle lié au glycérol. Bien que l'huile végétale, puisse être utilisée directement comme carburant dans les moteurs diesel, la limitation la plus importante réside dans le fait que la viscosité élevée des huiles végétales entraîne une mauvaise atomisation dans la chambre de combustion du moteur, ce qui entraîne d'autres problèmes de fonctionnement. Parmi les méthodes trouvées pour résoudre ce problème, la transestérification, elle a été signalée comme étant plus favorable en raison de la dilution simultanée de l'huile et de l'amélioration de ses autres propriétés comme carburant. La transestérification est une voie catalytique pour obtenir du biodiesel BD et le catalyseur peut être un acide, une base ou les deux sous forme homogène et hétérogène, ou des enzymes [5 ; 50–51].

Les catalyseurs alcalins homogènes tels que le méthanolate de sodium, le méthanolate de potassium, l'hydroxyde de sodium et l'hydroxyde de potassium sont favorables en raison de leur rendement élevé et de leur faible temps de séjour [5].

En bref, le mécanisme d'une réaction catalysée par une base, commence par l'attaque d'une espèce négative RO^- telle que CH_3O^- un groupe carbonyle $\text{C}=\text{O}$, formant un intermédiaire tétraèdre. Ensuite, le R_1COOCH_3 s'en va et la nouvelle liaison O-H se forme. Le cycle se poursuit encore deux fois pour que tous les groupes carbonyles se reconstruisent. La transestérification d'une molécule de triglycéride TG nécessite trois molécules d'alcool, tandis que la

réaction entraîne la formation de trois composés à chaîne plus courte : esters d'acides gras et glycérol par une molécule de TG. En résumé, le processus de synthèse du biodiesel est décrit par la Figure 33 [5 ; 50 ; 52].

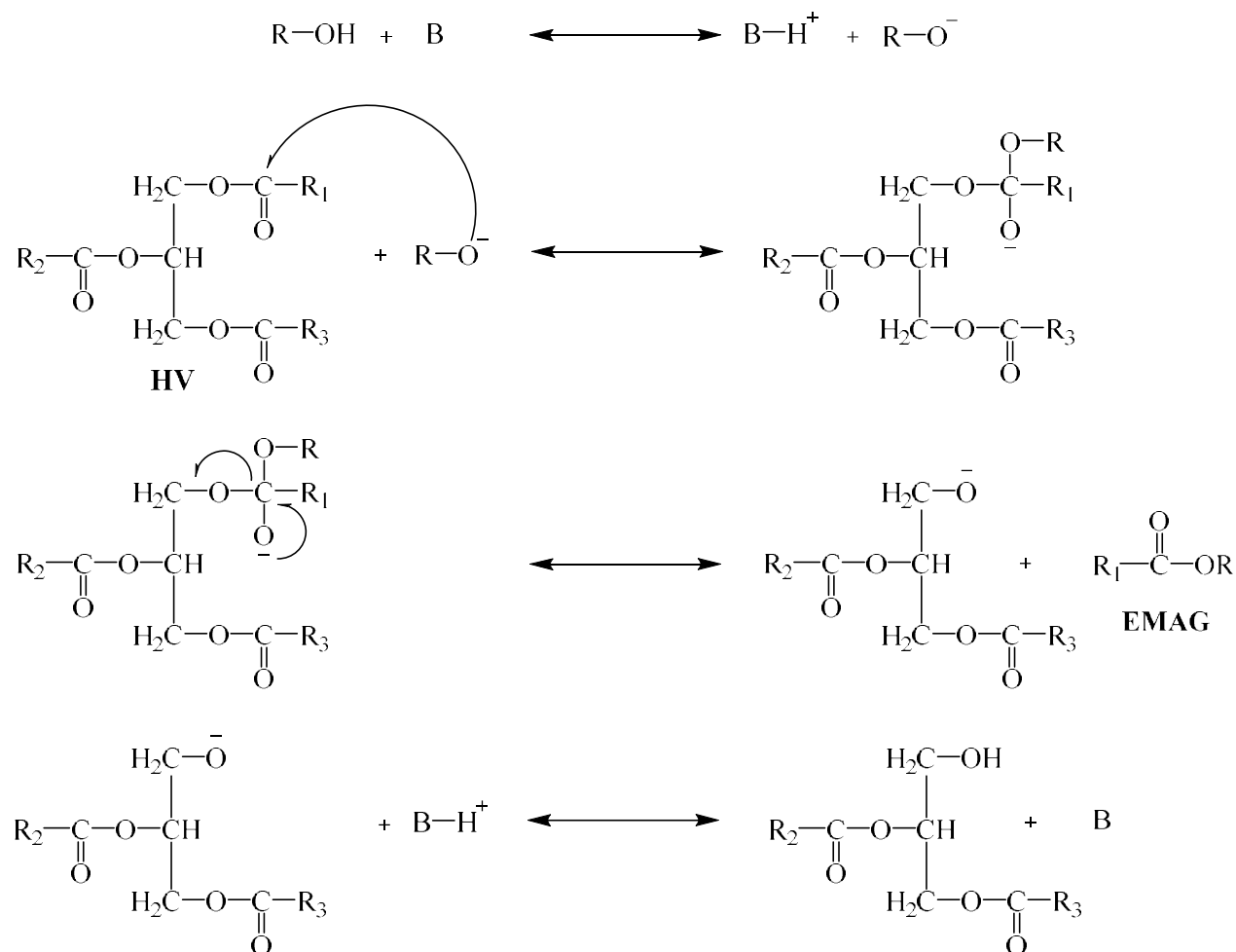


Figure 33 : Étapes schématiques de la transestérification catalysée par la base.

Les catalyseurs acides homogènes, par contre, résistent à la forte teneur en AGL de la matière première et pourraient catalyser simultanément les réactions de transestérification et d'estérification. Parmi la vaste gamme d'acides utilisés, l'acide sulfurique H_2SO_4 et l'acide chlorhydrique HCl sont les plus courants. Le mécanisme d'une réaction catalysée par un acide est illustré dans la Figure 34. En bref, H^+ attaque les groupes carbonyles des triglycérides TG. Ensuite, l'attraction nucléophile de l'alcool utilisé dans la réaction a entraîné la formation d'un intermédiaire tétraédrique. L'étape finale est la migration des protons et la décomposition de la grosse molécule. Cette procédure a lieu trois fois afin que toutes les ramifications carbonylées du triglycéride soient reconstituées [5]. Ceci est principalement dû au fait qu'il n'y a pas d'étape de prétraitement supplémentaire nécessaire pour réduire l'AGL, et que la séparation et la

purification du produit peuvent se faire par de simples étapes de procédé car il n'y a pas de formation de savon [53].

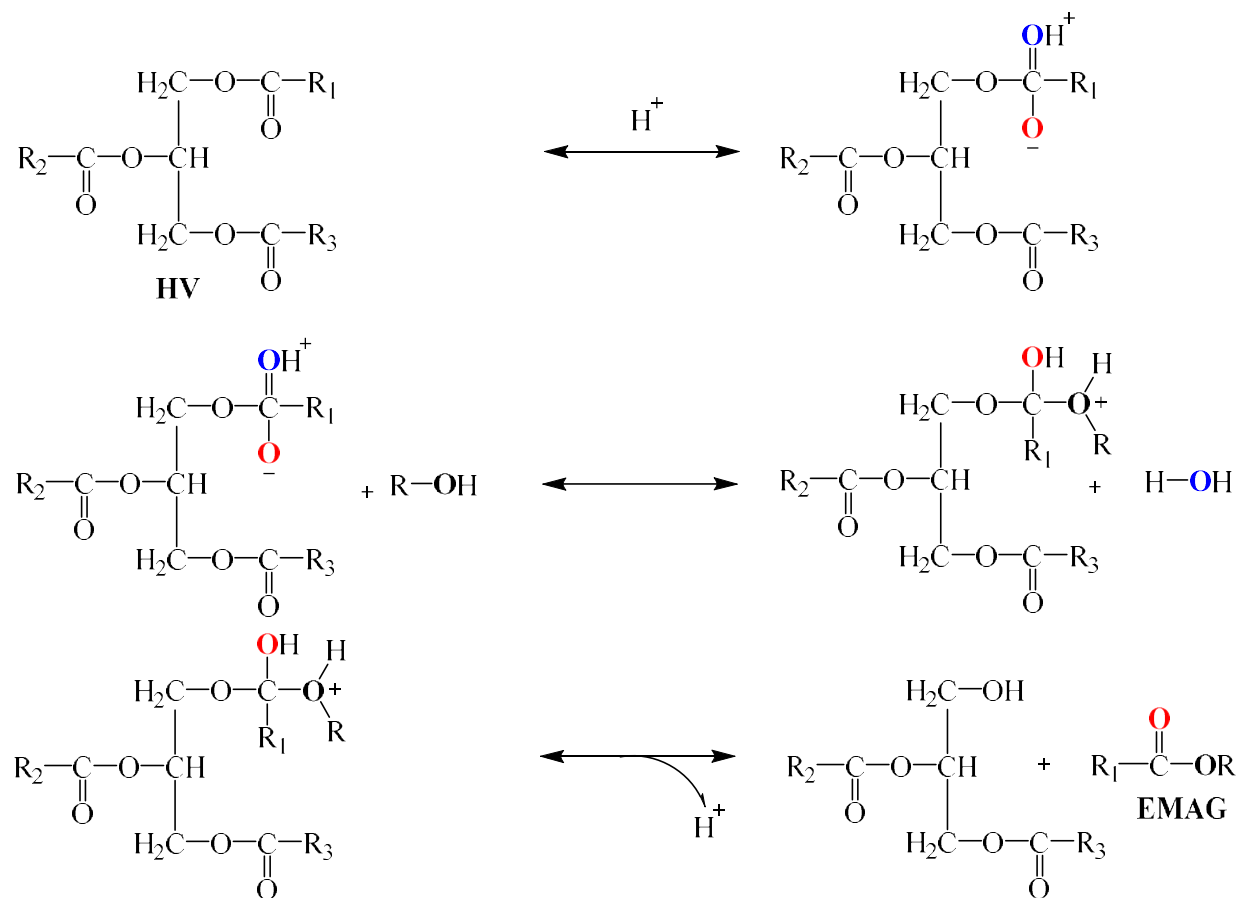


Figure 34 : Étapes schématisées de la transestérification catalysée par un acide.

De nombreux procédés traditionnels basés sur une catalyse homogène ont été revus afin de minimiser la production de déchets. En outre, de nombreux chercheurs ont montré que les catalyseurs hétérogènes comme, les hydroxydes métalliques, les complexes métalliques, les oxydes métalliques et les catalyseurs sur support ; sont d'excellentes alternatives pour générer moins de flux de déchets et aussi pour améliorer la qualité des coproduits, ce qui peut contribuer à des revenus supplémentaires pour le processus de production global. Les catalyseurs hétérogènes sont également relativement tolérants à une teneur élevée en AGL et en eau [5 ; 54–55].

L'autre voie catalytique est la transestérification enzymatique qui utilise la lipase principalement dans un bioréacteur ou un bioréacteur à membrane. Les lipases ont été utilisées comme biocatalyseurs polyvalents et très efficaces pour une grande variété de réactions chimiques. En raison de leur haute activité et de

leur sélectivité, ils ont un grand potentiel d'utilisation comme biocatalyseurs dans des applications industrielles [56]. Les enzymes peuvent être disséminées dans le milieu solvant du réacteur ou immobilisées sur un support d'interaction avec les substrats. Dans le cas d'un bioréacteur à membrane, l'immobilisation des catalyseurs biochimiques peut également être réalisée à la surface de la membrane [5 ; 57].

Le mécanisme de conversion des triglycérides en biodiesel avec enzyme (lipase) suit le modèle ping pong Bi-Bi (Figure 35). Les sites actifs contenant des groupes acides ou basiques effectuent la réformation de l'espèce en donnant ou acceptant des protons. Pour les enzymes telles que la lipase, les réactions sont effectuées en utilisant des groupes hydroxyle -OH comme accepteurs de protons ou de sites nucléophiles tandis que les groupes amine sont tenus d'accepter et de libérer des protons [5].

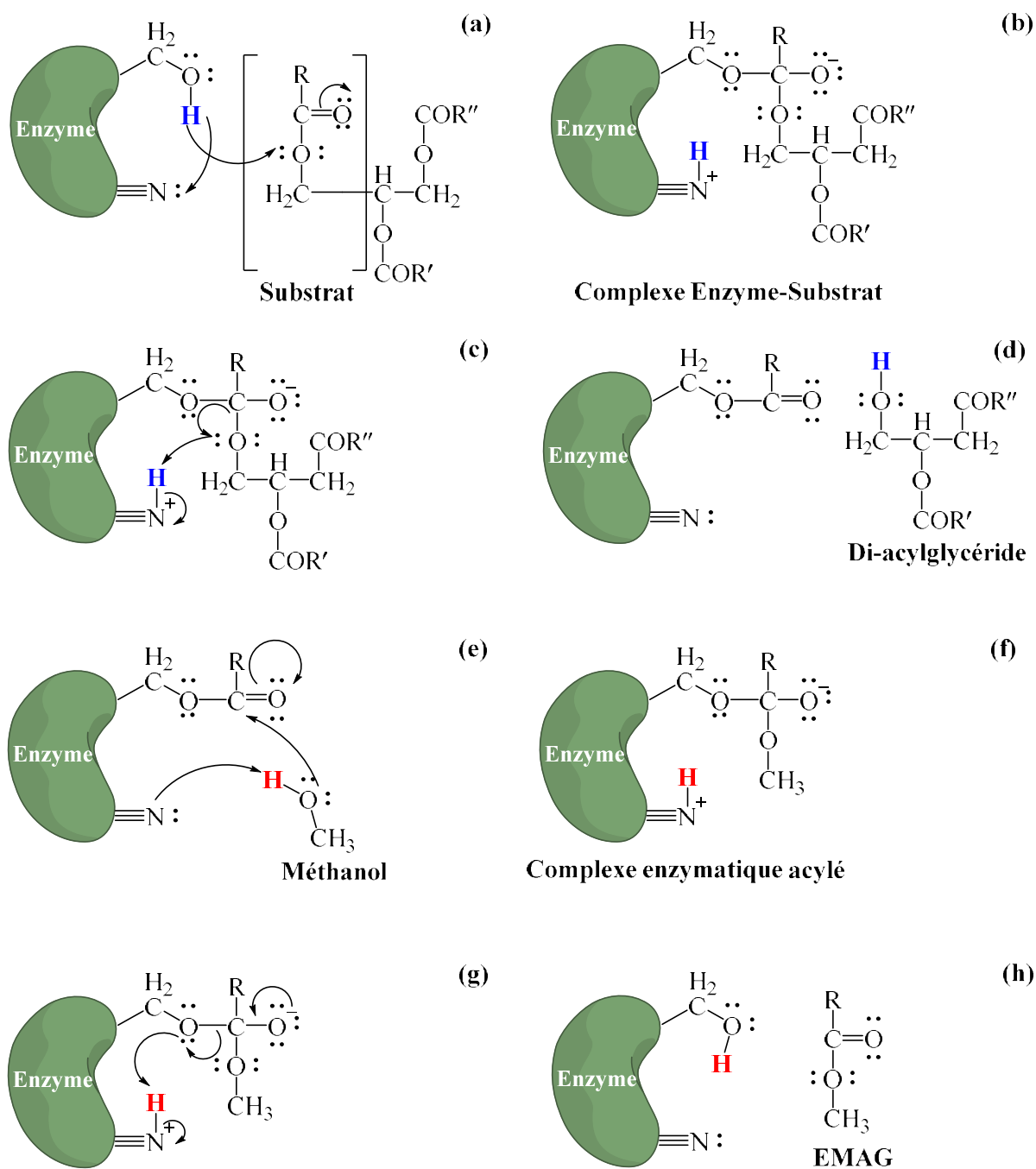


Figure 35 : Étapes schématiques de la transestérification enzymatique.

En dehors des procédés catalytiques, il existe d'autres méthodes de transestérification, comme l'irradiation par micro-ondes [58–60], l'ultrason assisté [61–62] et le méthanol supercritique [63–65], qui peuvent être utilisées individuellement ou couplées dans un procédé. La Figure 36 présente schématiquement les différentes étapes de la transestérification conventionnelle des huiles d'une matière première en biodiesel. Une autre alternative au procédé

de transestérification est le craquage des huiles en présence ou en absence de catalyseur [5 ; 66–67].

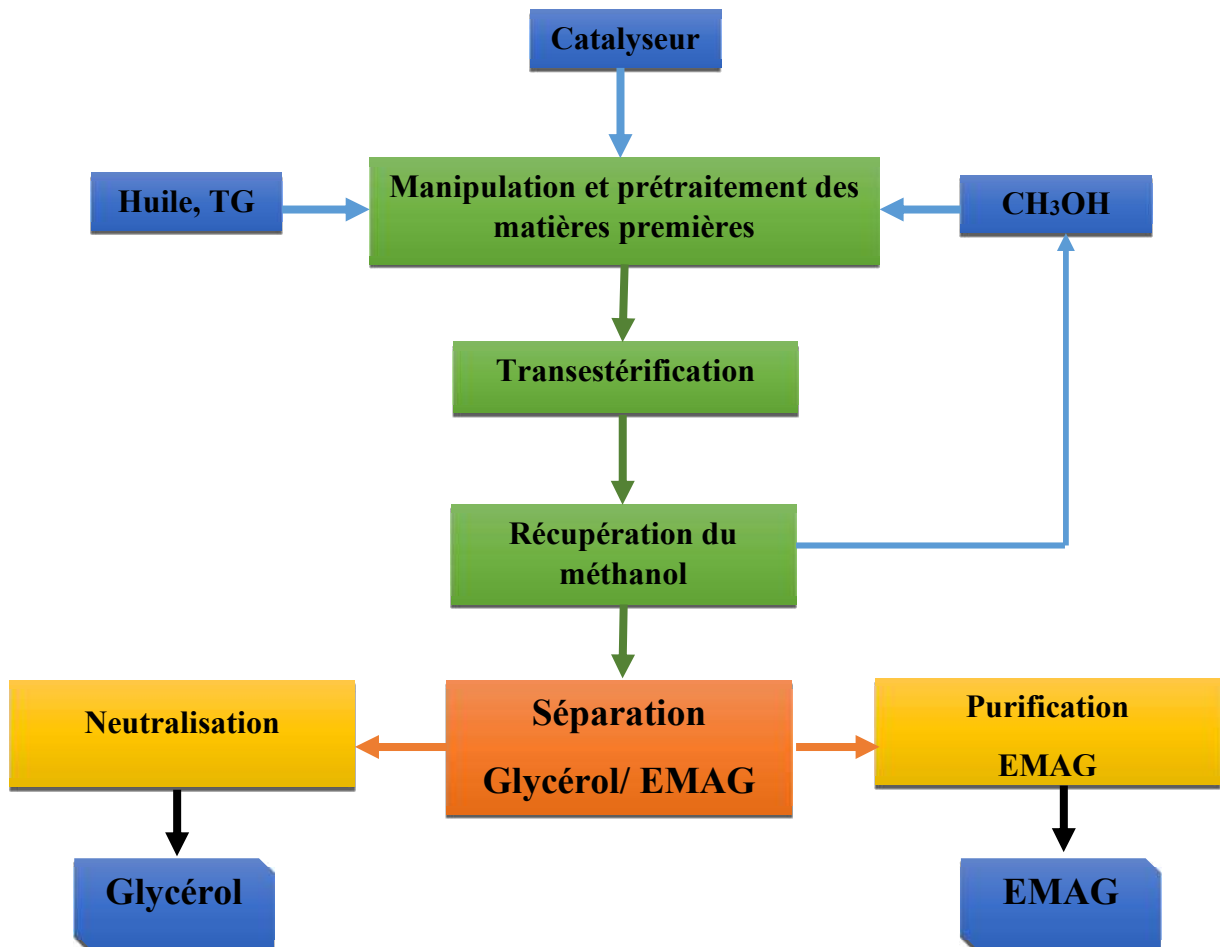


Figure 36 : Diagramme schématisé de la production de biodiesel.

L'option non catalysée est habituellement une réaction de transestérification du méthanol supercritique qui a lieu à une pression et une température plus élevées. Cependant, ses exigences plus élevées en matière de pression et de température entraînent des coûts d'utilisation plus élevés, ce qui rend cette option coûteuse [53].

II.6- PRODUCTION & CONSOMMATION MONDIALE DE BIODIESEL

Le biodiesel essentiellement commercial utilise des huiles comestibles raffinées dont le coût de production des ressources est supérieur de 60 à 75 % au coût des huiles non raffinées (matière première). Il en résulte des coûts de production élevés pour le biodiesel par rapport au pétro-diesel et il n'est pas raisonnable d'utiliser de l'huile raffinée si elle peut être utilisée comme aliment.

L'utilisation des huiles non comestibles (déchets agricoles) est une ressource alternative pour réduire le coût de production du biodiesel. Pour les pays développés, les biocarburants présentent l'avantage de réduire leur dépendance à l'égard des importations de pétrole, d'offrir une autre solution alternative aux carburants fossiles et d'utiliser des sous-produits dans la production de biodiesel [49].

À une époque où la demande mondiale d'énergie s'envole et où les préoccupations concernant le changement climatique grandissent, les biocarburants issus de l'agriculture, suscitent un intérêt croissant. De nombreux gouvernements se sont employés à promouvoir activement leur développement. Au début des années 2000, la production mondiale en biocarburants était quasi-inexistante. Elle est passée de 17 à 110 milliards de litres entre 2000 et 2009. Aujourd'hui, les biocarburants fournissent 5 % de l'énergie mondiale dans le secteur des transports. Avec l'explosion de la production des biocarburants, la part de la production des cultures destinées à la filière agro-alimentaire a décliné progressivement au profit de la filière énergétique. Aux États-Unis, 40 % de la production annuelle de maïs est aujourd'hui destinée à la production d'éthanol alors que cette proportion ne s'élevait qu'à 15 % en 2006 [68].

Selon l'Organisation de Coopération et de développement économiques (OCDE), la production mondiale de biodiesel est d'environ 36 milliards de litres en 2017, et l'Union européenne UE est toujours le principal producteur, avec 13,5 milliards de litres de biodiesel, suivie des États-Unis avec 6,9 milliards de litres de biodiesel, et de la Malaisie avec 490 millions de litres. Les matières premières servant à la production de biodiesel ont varié dans chaque région. Par exemple, l'huile de palme est la principale source de biodiesel dans les pays tropicaux comme la Malaisie, tandis que l'huile de soja et l'huile de colza ont été utilisées aux États-Unis et dans l'UE, respectivement [69].

La production de biodiesel a connu sa croissance la plus rapide en Europe occidentale, en Amérique du Nord et en Asie, et son marché est resté stable depuis quelques décennies. En 2000, l'Europe a exploité 80 % de la part de marché mondiale, mais cette part a considérablement diminué, de 40 % actuellement. Récemment, l'Asie, l'Amérique du Nord et l'Amérique centrale et

du Sud occupaient le premier rang sur le marché mondial du biodiesel et leur part devrait croître à un taux annuel moyen de plus de 5 % en 2011–2016. La consommation mondiale de biodiesel est illustrée dans la Figure 37 [49].

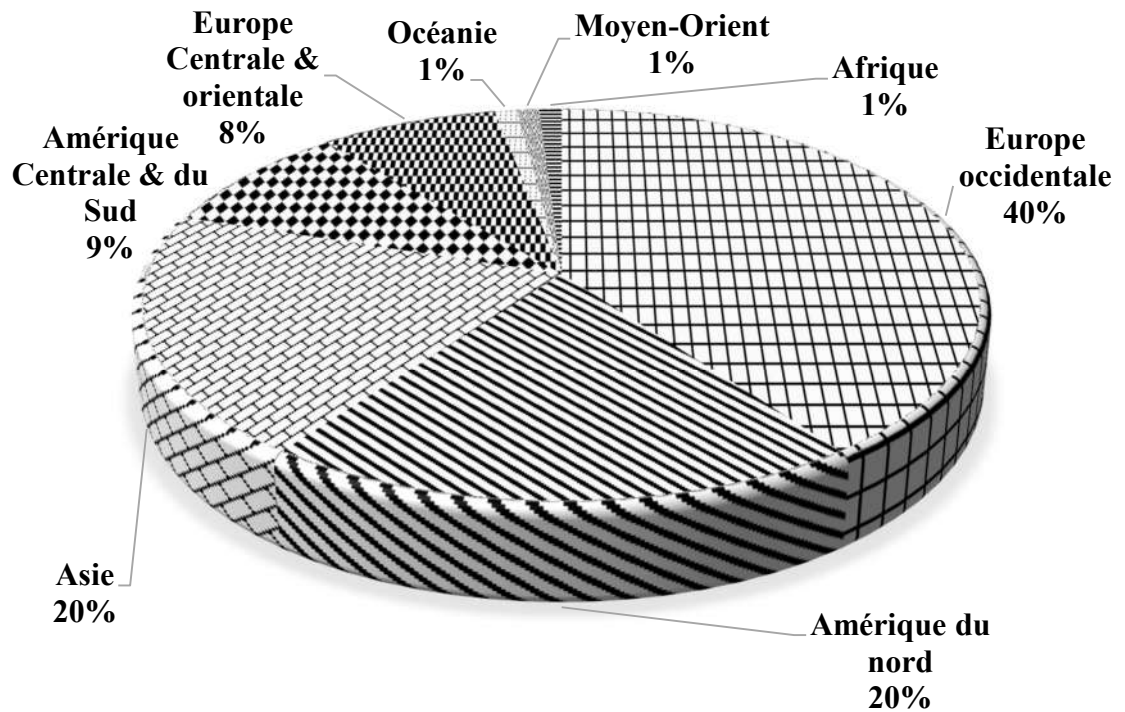


Figure 37 : Consommation mondiale de biodiesel.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]– Surendhiran, D., and Sirajunnisa, A.R. *Role of Genetic Engineering*. In: Ray, R.C., and Ramachandran, S. (eds.) *Bioethanol Production from Algae. Bioethanol Production from Food Crops*, Academic Press, **2019**, 361–381.
- [2]– Roberts, L.G., and Patterson, T.J. Biofuels. *Encyclopedia of Toxicology*, **2014**, 469–475.
- [3]– Ghasemzadeh, K., Jalilnejad, E., and Basile, A. *Production of Bioalcohol and Biomethane*. In: Dalena, F., Basile, A., and Rossi, C. (eds.) *Bioenergy Systems for the Future*, Woodhead Publishing, **2017**, pp: 61–86.
- [4]– Da Silva César, A., Conejero, M.A., Barros Ribeiro, E.C., and Batalha, M.O. Competitiveness Analysis of “Social Soybeans” in Biodiesel Production in Brazil. *Renewable Energy*, **2018**. doi:10.1016/j.renene.2018.08.108
- [5]– Najafpour, G.D. *Biofuel Production*. In: Najafpour, G.D. (eds.) *Biochemical Engineering and Biotechnology*, Elsevier Science, **2015**, pp: 597–630.
- [6]– Karvonen, M., and Klemola, K. Identifying Bioethanol Technology Generations from the Patent Data. *World Patent Information*, **2019**, 57, 25–34.
- [7]– De Carvalho, A.L., Antunes, C.H., and Freire, F. Economic-energy-Environment Analysis of Prospective Sugarcane Bioethanol Production in Brazil. *Applied Energy*, **2016**, 181, 514–526.
- [8]– Visarada, K.B.R.S., and Aruna, C. *Sorghum: A Bundle of Opportunities in the 21st Century*. In: Aruna, C., Visarada, K.B.R.S., Venkatesh, B.B., Tonapi, V.A. (eds.) *Breeding Sorghum for Diverse End Uses*, Woodhead Publishing, **2019**, pp: 1–14.
- [9]– Ratnavathi, C.V., Komala, V.V., and Lavanya, U. *Sorghum Uses—Ethanol*. In: Ratnavathi, C.V., Patil, J.V. and Chavan, U.D. (eds.) *Sorghum Biochemistry*, Academic Press, **2016**, pp: 181–252.
- [10]– Mohanty, S.K., and Swain, M.R. *Bioethanol Production from Corn and Wheat: Food, Fuel, and Future*. In: Ray, C.R., and Ramachandran, S. (eds.) *Bioethanol Production from Food Crops*, Academic Press, **2019**, pp: 45–59.
- [11]– Melikoglu, M., Singh, V., Leu, S.-Y., Webb, C., and Lin, C.S.K. *Biochemical Production of Bioalcohols*. In: Luque, R., Lin, C.S.K.,

- Wilson, K., Clark, J. (eds.) *Handbook of Biofuels Production*, Woodhead Publishing, **2016**, pp: 237–258.
- [12]– Kumar, D., and Singh, V. *Bioethanol Production from Corn*. In: Serna-Saldivar, S.O. (eds.) *Corn*, Woodhead Publishing, **2019**, pp: 615–631.
- [13]– Gaonkar, V., and Rosentrater, K.A. *Soybean*. In: Pan, Z., Zhang, R., and Zicari, S. (eds.) *Integrated Processing Technologies for Food and Agricultural By-Products*, Academic Press, **2019**, pp: 73–104.
- [14]– Saydut, A., Erdogan, S., Kafadar, A.B., Kaya, C., Aydin, F., and Hamamci, C. Process Optimization for Production of Biodiesel from Hazelnut Oil, Sunflower Oil and Their Hybrid Feedstock. *Fuel*, **2016**, *183*, 512–517.
- [15]– Kaya, Y. *Sunflower*. In: Gupta, S.K. (eds.) *Breeding Oilseed Crops for Sustainable Production*, Academic Press, **2016**, 55–88.
- [16]– Lam, M.K., Jamalluddin, N.A., and Lee, K.T. *Production of Biodiesel Using Palm Oil*. In: Pandey, A., Larroche, C., Dussap, C.G., Gnansounou, E., Khanal, S.K., and Ricke, S. (eds.) *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels*, Academic Press, **2019**, pp: 539–574.
- [17]– Ahmad, F.B., Zhang, Z., Doherty, W.O.S., and O’Hara, I.M. The Prospect of Microbial Oil Production and Applications from Oil Palm Biomass. *Biochemical Engineering Journal*, **2018**. doi:10.1016/j.bej.2018.12.003
- [18]– Nguyen, L.N., Nguyen, A.Q., Hasan Jahir, M.A., Guo, W., Ngo, H.H., Chaves, A.V., and Nghiem, L.D. Application of Rumen and Anaerobic Sludge Microbes for Bio-harvesting from Lignocellulosic Biomass. *Chemosphere*, **2019**, *228*, 702–708.
- [19]– Liu, T., Zhou, X., Li, Z., Wang, X., and Sun, J. Effects of Liquid Digestate Pretreatment on Biogas Production for Anaerobic Digestion of Wheat Straw. *Bioresource Technology*, **2019**, *280*, 345–351.
- [20]– Jaffar, M., Pang, Y., Yuan, H., Zou, D., Liu, Y., Zhu, B., and al. Wheat Straw Pretreatment with KOH for Enhancing Biomethane Production and Fertilizer Value in Anaerobic Digestion. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **2016**, *24(3)*, 404–409.
- [21]– Zhang, S.-C., Lai, Q.-H., Lu, Y., Liu, Z.-D., Wang, T.-M., Zhang, C., and Xing, X.-H. Enhanced Biohydrogen Production from Corn Stover by the Combination of *Clostridium cellulolyticum* and Hydrogen Fermentation Bacteria. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, **2016**, *122(4)*, 482–487.

- [22]– Lin, J.J., and Chen, Y.W. Production of Biodiesel by Transesterification of Jatropha Oil with Microwave Heating. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **2017**, 75, 43–50.
- [23]– Ntaribi, T., and Paul, D.I. Status of Jatropha Plants Farming for Biodiesel Production in Rwanda. *Energy for Sustainable Development*, **2018**, 47, 133–142.
- [24]– Mariod, A.A., Mirghani, M.E.S., and Hussein, I. *Jatropha curcas L. Seed Oil*. In: Mariod, A.A., Mirghani, M.E.S and Hussein, I. (eds.) *Unconventional Oilseeds and Oil Sources*. Academic Press, **2017**, pp: 199–207.
- [25]– Fonseca, J.M., Teleken, J.G., de Cinque Almeida, V., and da Silva, C. Biodiesel from Waste Frying Oils: Methods of Production and Purification. *Energy Conversion and Management*, **2019**, 184, 205–218.
- [26]– Di Bitonto, L., and Pastore, C. Metal Hydrated-salts as Efficient and Reusable Catalysts for Pre-treating Waste Cooking Oils and Animal Fats for an Effective Production of Biodiesel. *Renewable Energy*, **2019**, 143, 1193–1200.
- [27]– De Farias Silva, C.E., and Bertucco, A. Bioethanol from Microalgae and Cyanobacteria: A Review and Technological Outlook. *Process Biochemistry*, **2016**, 51(11), 1833–1842.
- [28]– Chia, S.R., Ong, H.C., Chew, K. W., Show, P.L., Phang, S.-M., Ling, T.C., et al. Sustainable Approaches for Algae Utilisation in Bioenergy Production. *Renewable Energy*, **2018**, 129, 838–852.
- [29]– Saber, M., Nakhshiniev, B., and Yoshikawa, K. A Review of Production and Upgrading of Algal Bio-oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **2016**, 58, 918–930.
- [30]– Doan, Q.C., Moheimani, N.R., Mastrangelo, A.J., and Lewis, D.M. Microalgal Biomass for Bioethanol Fermentation: Implications for Hypersaline Systems with an Industrial Focus. *Biomass and Bioenergy*, **2012**, 46, 79–88.
- [31]– Brasil, B. dos, S.A.F., de Siqueira, F.G., Salum, T.F.C., Zanette, C.M., and Spier, M.R. Microalgae and Cyanobacteria as Enzyme Biofactories. *Algal Research*, **2017**, 25, 76–89.
- [32]– Martín-Juárez, J., Markou, G., Muylaert, K., Lorenzo-Hernando, A., and Bolado, S. *Breakthroughs in Bioalcohol Production from Microalgae*. In: Gonzalez-Fernandez, C., and Muñoz, R. (eds.) *Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts*, Woodhead Publishing, **2017**, pp: 183–207.

- [33]– Baroukh, C., Muñoz-Tamayo, R., Steyer, J.P., and Bernard, O.A. State of the Art of Metabolic Networks of Unicellular Microalgae and Cyanobacteria for Biofuel Production. *Metabolic Engineering*, **2015**, *30*, 49–60.
- [34]– Kumar, J., Singh, D., Tyagi, M.B., and Kumar, A. *Cyanobacteria: Applications in Biotechnology*. In: Mishra, A.K., Tiwari, D.N., Rai, A.N. (eds.) *Cyanobacteria*. Academic Press, **2019**, pp: 327–346.
- [35]– Parmar, A., Singh, N.K., Pandey, A., Gnansounou, E., and Madamwar, D. Cyanobacteria and Microalgae: A Positive Prospect for Biofuels. *Bioresource Technology*, **2011**, *102(22)*, 10163–10172.
- [36]– Gerpen, J.V., Knothe, G., Krahl, J. *Basics of the Transesterification Reaction*. In: Gerpen, J.V., and Knothe, G., Krahl, J. (eds.) *Biodiesel Production*. Academic Press and AOCS Press, **2010**, pp: 31–96.
- [37]– Knothe, G., Dunn, R.O., Moser, B.R., Peterson, C.L., Möller, G., Bringe, N.A., Calabotta, B.J., and Morgenstern, D.A. *Fuel Properties*. In: Gerpen, J.V., and Knothe, G., Krahl, J. (eds.) *Biodiesel Production*. Academic Press and AOCS Press, **2010**, pp: 137–251.
- [38]– Omirou, M., Tzovenis, I., Charalampous, P., Tsaousis, P., Polycarpou, P., Chantzistroutsou, X., and Ioannides, I.M. Development of Marine Multi-algae Cultures for Biodiesel Production. *Algal Research*, **2016**, *33*, 462–469.
- [39]– Khan, S., Siddique, R., Sajjad, W., Nabi, G., Hayat, K.M., Duan, P., and Yao, L. Biodiesel Production From Algae to Overcome the Energy Crisis. *HAYATI Journal of Biosciences*, **2017**, *24(4)*, 163–167.
- [40]– Kumar, M., and Thakur, I.S. Municipal Secondary Sludge as Carbon Source for Production and Characterization of Biodiesel from Oleaginous Bacteria. *Bioresource Technology Reports*, **2018**. doi:10.1016/j.biteb.2018.09.011
- [41]– Louhasakul, Y., Cheirsilp, B., Maneerat, S., and Prasertsan, P. Potential Use of Flocculating Oleaginous Yeasts for Bioconversion of Industrial Wastes into Biodiesel Feedstocks. *Renewable Energy*, **2018**. doi:10.1016/j.renene.2018.10.002.
- [42]– Chebbi, H., Leiva-Candia, D., Carmona-Cabello, M., Jaouani, A., and Dorado, M.P. Biodiesel Production from Microbial Oil Provided by Oleaginous Yeasts from Olive Oil Mill Wastewater Growing on Industrial Glycerol. *Industrial Crops and Products*, **2019**, *139*, 111535.
- [43]– Hubert, M.H. Nourriture Contre Carburant: Quels sont les Éléments du Débat? *Revue Tiers Monde*, **2012**, *211*, 35–50.

- [44]– Corach, J., Galván, E.F., Sorichetti, P.A., and Romano, S.D. Estimation of the Composition of Soybean Biodiesel/Soybean Oil Blends from Permittivity Measurements. *Fuel*, **2019**, *235*, 1309–1315.
- [45]– Dueso, C., Muñoz, M., Moreno, F., Arroyo, J., Gil-Lalaguna, N., Bautista, A., and al. Performance and Emissions of a Diesel Engine Using Sunflower Biodiesel with a Renewable Antioxidant Additive from Bio-oil. *Fuel*, **2018**, *234*, 276–285.
- [46]– Zabaruddin, N.H., Mohamed, N.H., Abdullah, L.C., Tamada, M., Ueki, Y., Seko, N., and Choong, T.S.Y. Palm Oil-based Biodiesel Synthesis by Radiation-induced Kenaf Catalyst Packed in a Continuous Flow System. *Industrial Crops and Products*, **2019**, *136*, 102–109.
- [47]– Allami, H. A., Tabasizadeh, M., Rohani, A., Farzad, A., and Nayebzadeh, H. Precise Evaluation the Effect of Microwave Irradiation on the Properties of Palm Kernel Oil Biodiesel Used in a Diesel Engine. *Journal of Cleaner Production*, **2019**, 117777.
- [48]– Acevedo, J.C., Hernández, J.A., Valdés, C.F., and Khanal, S.K. Analysis of Operating Costs for Producing Biodiesel from Palm Oil at Pilot-scale in Colombia. *Bioresource Technology*, **2015**, *188*, 117–123.
- [49]– Zaidel, D.N.A., Muhamad, I.I., Daud, N.S.M., Muttalib, N.A.A., Khairuddin, N., and Lazim, N.A.M. *Production of Biodiesel from Rice Bran Oil*. In: Verma, D., Fortunati, E., Jain, S., and Zhang, X. (eds.) *Biomass, Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy*, Woodhead Publishing, **2019**, pp: 409–447.
- [50]– McCarthy, S.M., Melman, J.H., Reffell, O.K., and Gordon-Wylie, S.W. *Synthesis and Partial Characterization of Biodiesel via Base Catalyzed Transesterification*. In: Dahiya, A. (eds.) *Bioenergy: Biomass to Biofuels*, Academic Press, **2015**, pp: 361–365.
- [51]– Mumtaz, M.W., Adnan, A., Mukhtar, H., Rashid, U., and Danish, M. *Biodiesel Production through Chemical and Biochemical Transesterification*. In: Rasul, M.G., Azad, A.K., and Sharma, S.C. (eds.) *Clean Energy for Sustainable Development*, Academic Press, **2017**, pp: 465–485.
- [52]– Makareviciene, V., and Skorupskaite, V. *Transesterification of microalgae for biodiesel production*. In: Basile, A., and Dalena, F. (eds.) *Second and Third Generation of Feedstocks*, Elsevier Science, **2019**, pp: 469–510.
- [53]– Gebremariam, S.N., and Marchetti, J.M. Biodiesel Production through Sulfuric Acid Catalyzed Transesterification of Acidic Oil: Techno-Economic Feasibility of Different Process Alternatives. *Energy Conversion and Management*, **2018**, *174*, 639–648.

- [54]– Ramos, L.P., Cordeiro, C.S., Cesar-Oliveira, M.A.F., Wypych, F., and Nakagaki, S. *Applications of Heterogeneous Catalysts in the Production of Biodiesel by Esterification and Transesterification*. In: Gupta, V.K., Tuohy, M.G., Kubicek, C.P., Saddler, J., and Xu, F. (eds.) *Bioenergy Research: Advances and Applications*, Elsevier Science, **2014**, pp: 255–276.
- [55]– Chaveanghong, S., Smith, S.M., Smith, C.B., Luengnaruemitchai, A., and Boonyuen, S. Simultaneous Transesterification and Esterification of Acidic Oil Feedstocks Catalyzed by Heterogeneous Tungsten Loaded Bovine Bone Under Mild Conditions. *Renewable Energy*, **2018**, *126*, 156–162.
- [56]– El Rassy, H., Perrard, A., and Pierre, A.C. Application of Lipase Encapsulated in Silica Aerogels to a Transesterification Reaction in Hydrophobic and Hydrophilic Solvents: Bi-Bi Ping-Pong Kinetics. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, **2004**, *30(3-4)*, 137–150.
- [57]– Pessoa, F.L.P., Magalhães, S.P., and Falcão, P.W.C. Kinetic Study of Biodiesel Production by Enzymatic Transesterification of Vegetable Oils. *10th International Symposium on Process Systems Engineering Part A*, **2009**, 1809–1814.
- [58]– Falowo, O.A., Oloko-Oba, I.M., and Betiku, E. Biodiesel Production Intensification Via Microwave Irradiation-assisted Transesterification of Oil Blend Using Nanoparticles from Elephant-ear Tree Pod Husk as a Base Heterogeneous Catalyst. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, **2019**. doi:10.1016/j.cep.2019.04.010
- [59]– Yu, G.W., Nie, J., Lu, L.G., Wang, S.P., Li, Z.G., and Lee, M.R. Transesterification of Soybean Oil by Using the Synergistic Microwave-Ultrasonic Irradiation. *Ultrasonics Sonochemistry*, **2017**, *39*, 281–290.
- [60]– Ding, H., Ye, W., Wang, Y., Wang, X., Li, L., Liu, D., and al. Process Intensification of Transesterification for Biodiesel Production from Palm Oil: Microwave Irradiation on Transesterification Reaction Catalyzed by Acidic Imidazolium Ionic Liquids. *Energy*, **2018**, *144*, 957–967.
- [61]– Ho, W.W.S., Ng, H.K., and Gan, S. Advances in Ultrasound-assisted Transesterification for Biodiesel Production. *Applied Thermal Engineering*, **2016**, *100*, 553–563.
- [62]– Yellapu, S.K., Kaur, R., and Tyagi, R.D. Detergent Assisted Ultrasonication Aided *in situ* Transesterification for Biodiesel Production from Oleaginous Yeast Wet Biomass. *Bioresource Technology*, **2017**, *224*, 365–372.

- [63]– Son, J., Kim, B., Park, J., Yang, J., and Lee, J.W. Wet *in situ* Transesterification of Spent Coffee Grounds with Supercritical Methanol for the Production of Biodiesel. *Bioresource Technology*, **2018**, 259, 465–468.
- [64]– Lamba, N., Gupta, R., Modak, J.M., and Madras, G. ZnO Catalyzed Transesterification of *Madhuca indica* Oil in Supercritical Methanol. *Fuel*, **2019**, 242, 323–333.
- [65]– Andreo-Martínez, P., García-Martínez, N., Durán-del-Amor, M. del M., and Quesada-Medina, J. Advances on Kinetics and Thermodynamics of Non-catalytic Supercritical Methanol Transesterification of Some Vegetable Oils to Biodiesel. *Energy Conversion and Management*, **2018**, 173, 187–196.
- [66]– Laksmono, N., Paraschiv, M., Loubar, K., and Tazerout, M. Biodiesel Production from Biomass Gasification Tar Via Thermal/Catalytic Cracking. *Fuel Processing Technology*, **2013**, 106, 776–783.
- [67]– Ramkumar, S., and Kirubakaran, V. Biodiesel from Vegetable Oil, as Alternate Fuel for C-I Engine, and Feasibility Study of Thermal Cracking: A Critical Review. *Energy Conversion and Management*, **2016**, 118, 155–169.
- [68]– Tangermann, S. Biocarburants et Sécurité Alimentaire. *Economie Rural*, **2007**, 300, 100–104.
- [69]– Quah, R.V., Tan, Y.H., Mubarak, N.M., Khalid, M., Abdullah, E.C., and Nolasco-Hipolito, C. An Overview of Biodiesel Production Using Recyclable Biomass and Non-biomass Derived Magnetic Catalysts. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **2019**. doi:10.1016/j.jece.2019.103219

Chapitre III :
Matériels & Méthodes

III.1- ÉCHANTILLONNAGE

Les dattes utilisées dans ce travail pour l'extraction de bio-huile ; ont été collectés à partir des marchés locaux situés dans la wilaya d'Adrar (27°52'00"N ; 0°17'00"O) (Figure 38), au sud-ouest de l'Algérie durant l'automne 2018 et l'hiver 2019. H'mira ou Tilemsou (Hm) à partir de la commune de Zaouit Kounta (27°13'00"N ; 0°12'00"O), Takerbouchet (Tk) à partir de la commune de Bouda (28°00'51"N ; 0°30'09"O), Teggaza (Tg) et Tinaceur (Tn) à partir de la commune de Reggane (26°43'12"N ; 0°10'16"O).

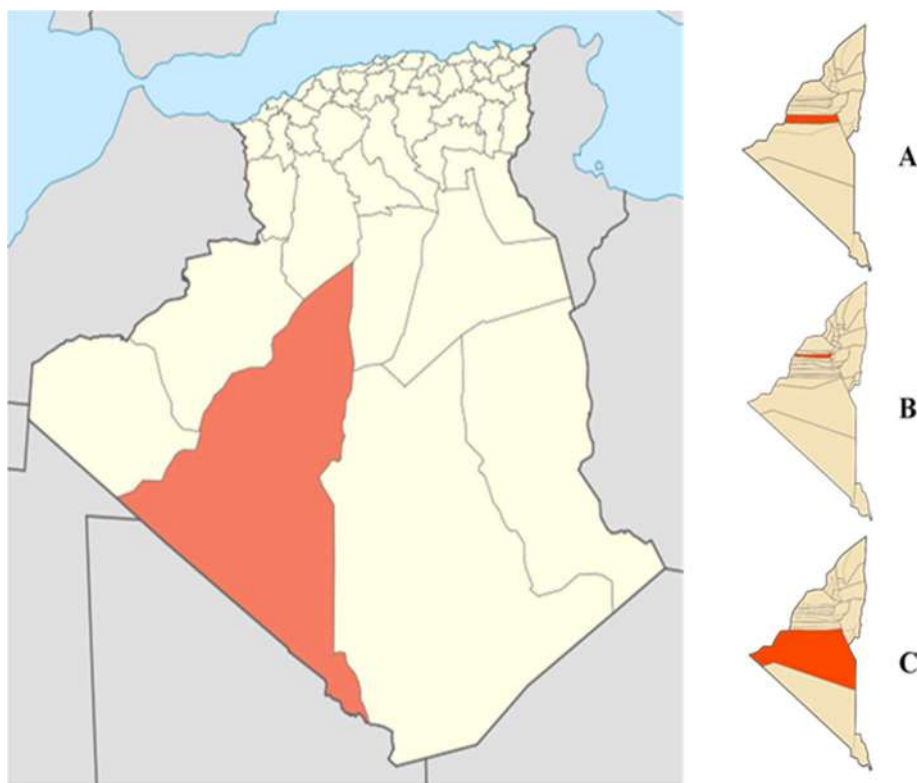


Figure 38 : Localisation géographique de la Wilaya d'Adrar. Régions d'échantillonnage :
A) Zaouit Kounta ; B) Bouda ; C) Reggane.

Le Tableau 06 récapitule les différents caractères généraux et morphologiques de ces quatre variétés utilisées.

Tableau 06 : Caractéristiques des variétés utilisées [1].

	Hm	Tk	Tg	Tn
Caractère	Palme			
Longueur	306 cm	405 cm	330 cm	320 cm
Largeur	102 cm	70 cm	66 cm	63 cm
Densité des pennes sur 50 cm	34	35	34	28
Densité des épines sur 50 cm	19	15	36	18
Longueur des épines	11 cm	8 cm	11 cm	8 cm
	Fruit			
Forme	Droite	Ronde	Droite	Droite à ovoïde
Taille	Moyenne	Petite	Petite à Moyenne	Moyenne
Poids de 20 fruits	87 à 220 g	110 à 235 g	109 à 220 g	85 à 167 g
Couleur (stade : Bser/ Tamar)	Jaune/Rouge ou Marron	Jaune/Ambrée	Jaune/ Rouge ou Marron	Jaune/Ambrée
Aspect de l'épicarpe	Plissé	Plissé	Gaufré ou Cloqué	Plissé ou Ridé
Altération	Aucune	Aucune	Aucune	Souvent marbré
Consistance	Molle à Demi-molle	Demi-molle à sèche	Molle à Demi-molle	Sèche à Demi-molle
Plasticité	Tendre ou Elastique	Tendre	Tendre	Variable
Texture	Fibreuse ou Farineuse	Fibreuse	Fibreuse	Farineuse
Goût	Parfumé	Parfumé	Parfumé	Acidulé
Forme du calice	Proéminent	Aplatie	Proéminent	Proéminent
	Noyau			
Forme	Droite	Ovoïde	Droite	Variable
Taille	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Rapport Noyau/Fruit	1/2 à 2/3	1/2 à 2/3	1/2 à 2/3	1/2 à 2/3
Poids de 20 noyaux	13 à 24 g	12 à 37 g	17 à 25 g	13 à 22 g
Couleur	Marron	Beige	Beige	Grise ou Beige
Surface	Lisse	Lisse	Lisse	Lisse
	Générale			
Distribution géographique	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Touat et Gourara (Abondant) ; ▪ Tidikelt (Rare). 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tidikelt (Abondant) ; ▪ Touat et Gourara (Fréquent) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Touat, Gourara et Tidikelt (Abondant à Fréquent) ; 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Touat, Gourara et Tidikelt (Abondant) ;
Date de maturité	Juillet à Septembre	Septembre à Octobre	Juin à Août	Juillet à Août
Date de récolte	Septembre à Octobre	Novembre et Décembre	Juillet à Septembre	Août à Octobre
Utilisation de la datte	Fraîche et Conservée	Fraîche et Conservée	Fraîche et Conservée	Fraîche et Conservé, parfois donnée au bétail
Mode de conservation	Ecrasé ou dans des sacs ou le sable	Ecrasé, plié ou dans des sacs	Ecrasé, plié ou dans des sacs	Pilé, dans les sacs ou dans le sable
Observation Supplémentaire	Commercialisé vers les Hauts plateaux et vers les pays du Sud	-	-	-

Le choix de ces quatre variétés (Figure 39) a été affermi par leur abondance dans la région d'Adrar et par leur importance socioéconomique.



a) – H'mira (Hm)



b) – Takerbouchet (Tk)



c) – Teggaza (Tg)



d) – Tinaceur (Tn)

Figure 39 : Aperçu des dattes utilisées.

III.2- PREPARATION DES NOYAUX DE DATTES

Avant d'utiliser les différents noyaux de dattes collectés pour la production de bio-huile et de biodiesel. Les noyaux étaient immergés dans l'eau bouillante avec une agitation vigoureuse pendant 3 heures pour éliminer la poussière et les résidus des dattes. Par la suite, les noyaux séparés ont été lavés plusieurs fois avec de l'eau afin d'éliminer les impuretés collées aux noyaux. Les noyaux de dattes nettoyées ont été séchés à 105 °C pendant environ 05 heures et conservés pour un usage ultérieur.

III.3- EXTRACTION DE L'HUILE

Les noyaux séchés ont été broyés dans une meuleuse robuste. Le processus d'extraction de l'huile a été effectué dans un appareil Soxhlet. 100 g de poudre des noyaux de dattes a été mélangée avec 250 mL de *n*-hexane (68-69 °C) pendant 04 heures. Après la filtration, et pour éliminer les particules en suspension et les impuretés, la bio-huile était séparée du solvant par un évaporateur rotatif (de marque *Nahita*). Les teneurs en huile ont été mesurés en triplicata ($n=3$) pour calculer l'écart type. Les rendements de chaque extraction ont été calculés par la formule suivante :

$$\textit{Teneur en huile}; \% = \frac{\textit{masse de l'huile obtenue}}{\textit{masse initiale de noyaux de dattes}} \times 100 \quad (1)$$

Les bio-huiles obtenues ont été étiquetées et conservées dans des flacons sombres à 4 °C pour un usage ultérieur.

III.4- SYNTHÈSE & PRODUCTION DE BIODIESEL

Une quantité de 20 g de l'huile a été chauffée dans un ballon *tri*-cols à fond rond équipé d'un condenseur à reflux et d'un thermomètre. Après 30 minutes de chauffage, une quantité de 0,1 g de potasse KOH (utilisée comme catalyseur) dissout dans 60 g de méthanol, a été ajoutée au ballon. La réaction a eu lieu pendant 90 minutes à la température de réaction spécifiée (55 ± 5 °C) à reflux pendant que le mélange était agité simultanément à 600 tr/min. A la fin de réaction, les EMAG synthétisés ont été séparés à l'aide d'une ampoule à décanter. La couche d'esters méthyliques a été débarrassée de l'excès de méthanol par l'évaporateur rotatif, suivie d'un lavage à l'eau tiède (3×20 mL). Les EMAG lavés sont ensuite séchés par passage sur sulfate de sodium (Na_2SO_4). Les expériences ont été réalisées en triplicata, et les résultats sont la moyenne de ces trois essais. Les rendements de production de biodiesel ont été calculés par la formule suivante :

$$\textit{Rendement}; \% = \frac{\textit{masse de biodiesel obtenue}}{\textit{masse de l'huile utilisée}} \times 100; \quad (2)$$

Les biodiesels obtenus ont été étiquetées et conservées dans des flacons sombres à 4 °C pour un usage ultérieur.

III.5- CARACTERISATION PHYSICOCHIMIQUE

La caractérisation du biodiesel est nécessaire pour vérifier la qualité des carburants, car chaque carburant doit répondre aux normes de qualité avant d'être considéré comme un carburant automobile. Par conséquent, le biodiesel produit, quel que soit la source, doit répondre aux normes mondiales reconnues pour être utilisé comme carburant pour les moteurs. Actuellement, les normes mondiales sur le biodiesel sont ASTM D6751 et EN 14214 [2] (voir Tableau 05).

Les aspects clés pour évaluer les propriétés des huiles et des biodiesels ; sont l'Indice de saponification (I_S), l'indice d'Acide (I_A), l'Indice d'Iode (I_I), l'indice de peroxyde (I_P) la densité (d), la viscosité cinématique, le point d'éclair, le point d'écoulement, le Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS) et l'Indice de Cétane (I_C). Les indices d' I_S , I_I , I_A et I_P sont les paramètres les plus couramment utilisés pour caractériser la qualité des huiles et des graisses. Ces paramètres sont largement utilisés pour déterminer la pureté (Avec I_S), le nombre de composés insaturés (Avec I_I) et la teneur en Acides Gras Libres AGL (acidité). L'indice d'acide I_A indique la corrosivité de l'huile ; les indices d'iode I_I se réfèrent au Degré d'Insaturation (DI). De même, la gravité et la densité spécifique énuméraient l'efficacité énergétique d'un biocarburant [3].

III.5.1- Densité (Gravité spécifique) ; d

Définition : La gravité spécifique est définie comme le rapport entre la densité de la substance en question et la densité d'une substance de référence dans des conditions de température et de pression déterminées [4–5]. La gravité spécifique des huiles ou des biodiesels est une propriété liée à la structure des molécules qui composent l'huile (ou biodiesel) et sa valeur augmente proportionnellement à la longueur de la chaîne carbonée et inversement au nombre de doubles liaisons [6].

Bien que les deux termes soient souvent utilisés de façon interchangeable, il existe une différence technique entre la densité et la gravité spécifique. La densité est définie comme la masse par unité de volume d'une substance. L'eau a une densité de 1 kg/L à 4 °C. Lorsque la densité est définie sur la base de l'eau à 4°C, alors la gravité spécifique est égale à la densité du liquide. Cependant, si la gravité spécifique est exprimée à des températures différentes, il ne sera plus égal

à la densité. Bien qu'il y ait une différence entre la gravité spécifique et la densité, la plupart des valeurs sont suffisamment similaires pour être utilisées de façon interchangeable dans la plupart des situations [7].

Mode opératoire : Les valeurs de la densité sont mesurées à l'aide d'un pycnomètre de type *IsoLab* d'un volume d'environ 10 mL. Avec une balance de précision, nous avons réalisé trois pesées : M_v : Masse de pycnomètre vide et sec ; M_{ec} : Masse de pycnomètre rempli de l'échantillon jusqu'au trait de jauge, tandis que M_e : Masse de pycnomètre rempli d'eau jusqu'au trait de jauge. L'expression des valeurs de la densité de nos échantillons est donc :

$$d = \frac{m_{ec}}{m_e}; \quad (3)$$

Avec :

m_{ec} : c'est la masse de l'échantillon contenu dans le pycnomètre se déduit par différence : $m_{ec} = M_{ec} - M_v$;

m_e : c'est la masse d'eau contenu dans le pycnomètre : $m_e = M_e - M_v$;

III.5.2- Indice de réfraction ; n_D^{20}

Définition : L'indice de réfraction (n_D^{20}) est le rapport entre la célérité de la lumière d'une longueur d'onde spécifiée dans l'air et sa célérité dans la substance à examiner. Lorsque le principe de mesure est utilisé, il peut être défini comme le sinus de l'angle d'incidence divisé par le sinus de l'angle de réfraction [8]. Quand la lumière traverse une interface entre deux milieux ayant des indices de réfraction différents, elle se déforme comme le montre la Figure 40 [9].

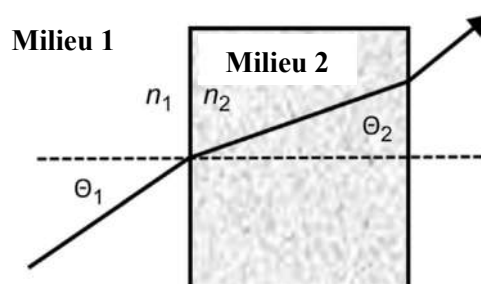


Figure 40 : Géométrie typique de l'indice de réfraction [9].

Selon la loi de Snell-Descartes, l'indice de réfraction n_D^{20} pourrait être calculé comme suit :

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}; \quad (4)$$

Où n_1 et n_2 sont des indices de réfraction du milieu 1 et 2 respectivement, θ_1 est l'angle d'incidence, et θ_2 est l'angle de réfraction [9].

L'indice de réfraction est mesuré par une méthode standard qui couvre les liquides transparents et de couleur claire ayant un indice de réfraction compris entre 1,33 et 1,50 [10]. L'indice de réfraction est généralement mesuré à l'aide d'un réfractomètre commercial, tel qu'un réfractomètre Abbe ou un réfractomètre Pulfrich. Les deux instruments sont basés sur la mesure de l'angle d'incidence critique entre l'échantillon et un prisme standard fourni avec les instruments. Dans les deux cas, l'échantillon requis est un type de plaque avec une surface polie à plat et un bord vertical adjacent capable de transmettre la lumière [11].

Mode opératoire : La valeur de l'indice de réfraction de nos échantillons est mesurée à l'aide d'un réfractomètre de type Abbe. 2 ou 3 gouttes de l'échantillon ont été placés sur la plaque de réfractomètre. Dans l'interface réservée à l'angle d'incidence ; nous ajustons le bouton pour le rendre distinct et nous lisons directement le résultat. L'indice de réfraction a été mesuré en triplicata ($n=3$). La valeur d'indice de réfraction est calculée par la formule suivante :

$$n_D^{20} = n_D^T + 0,00045(T - 20); \quad (5)$$

Avec :

n_D^{20} : Indice de réfraction à 20 °C ;

n_D^T : Indice de réfraction mesuré à la température ambiante T.

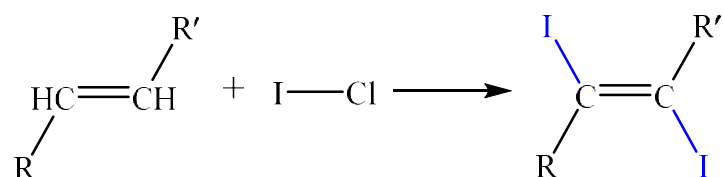
III.5.3- Indice d'Iode ; I_I

Définition : L'indice d'iode (I_I) est un degré d'insaturation d'une huile ou un carburant, qui est la caractéristique analytique la plus importante de l'huile. I_I représente le pourcentage de la masse d'iode absorbée par la masse d'un

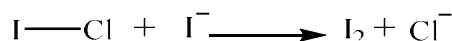
échantillon [12–13]. C'est un indicateur de la quantité d'iode absorbée par les doubles liaisons des acides gras AG dans 100 g de l'échantillon (huile ou carburant). I_I n'a pas de relation avec la position des doubles liaisons qui sont disponibles pour l'oxydation. Il a également été constaté que I_I est également relié au nombre de cétane (CN) et à la viscosité du biodiesel [14]. Une augmentation de la valeur d' I_I est principalement attribuable à un nombre croissant de doubles liaisons. Pour cette raison, la distribution des acides gras dans les sources de matières premières brutes, a une influence sur la valeur d' I_I dans les carburants. Toutefois, l'indice d'iode dépend du degré de conversion puisque le degré de transestérification n'affecte pas le nombre de doubles liaisons. Une valeur d' I_I plus élevée détermine l'instabilité des substances chimiques puisque les doubles liaisons sont des zones entièrement réactives dans les molécules du carburant [12].

L'indice d'iode I_I a été déterminée en traitant l'échantillon avec un excès de solutions de monochlorure d'iode (ICl) dans de l'acide acétique glacial (Réactif de Wijs). Ensuite, le monochlorure d'iode non traité a réagi avec l'iodure de potassium (KI), le convertissant en diiode, dont la concentration a été déterminée par le titrage au thiosulfate de sodium ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) [13]. Selon le mécanisme suivant : [15]

- D'abord, ICl est introduit en excès et réagit sur les doubles liaisons des huiles ou des carburants selon la réaction d'addition suivante :



- Ensuite, l'excès d'ICl est transformé en I_2 selon la réaction suivante :



- Le diiode (I_2) formé est alors titré par le thiosulfate de sodium selon la réaction :



Mode opératoire : la méthode de Wijs (ASTM D5554–96) a été suivie pour déterminer l'indice d'iode I_I des huiles et des biodiésels préparés [16]. 0,2 g de chaque échantillon a été introduite dans un erlenmeyer ; avec 20 mL de *n*-Hexane et 10 mL de réactif de Wijs. Après l'agitation ; le mélange est laissé reposer pendant 45 minutes à l'obscurité. Nous ajoutons ensuite 100 mL d'eau distillée et 15 mL d'iodure de potassium 10%, et on laisse le mélange a reposé encore une fois une minute à l'obscurité. Enfin, l'iode formé a été dosé par le thiosulfate de sodium (0,1 mol/L). L'empois d'amidon a été utilisé comme indicateur (2 à 3 gouttes). Nous refaisons les mêmes étapes pour le témoin en excluant l'échantillon. L'indice d'iode I_I de chaque échantillon a été mesuré en triplicata ($n=3$). La valeur de cet indice est calculée par la formule suivante :

$$I_I = \frac{(V_0 - V_t) \times C_T \times M_I \times 100}{m_e}; \quad (6)$$

Sachant que :

V_0 : Volume de témoin (en mL) ;

V_t : Volume titré de l'échantillon bio-huile ou biodiésel (en mL) ;

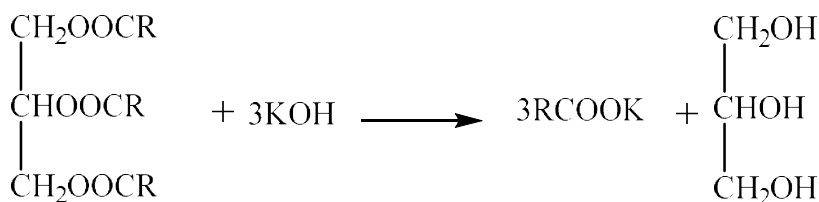
C_T : Concentration de Thiosulfate de Sodium utilisée (en mol/L) ;

M_I : Masse molaire de l'iode : $M_I = 0,1269 \text{ g} \cdot \text{mmol}^{-1}$;

m_e : Masse de l'échantillon (en g).

III.5.4- Indice de saponification ; I_s

Définition : L'indice de saponification (I_s) est la quantité de KOH en milligrammes nécessaire pour saponifier un gramme d'un échantillon [17]. Ce paramètre se rapporte au poids moléculaire moyen lorsque le poids moléculaire augmente avec une diminution de la valeur d' I_s de l'huile. Cependant, les acides des triglycérides sont semblables à ceux qui forment les EMAG ou le biodiesel. Par conséquent, il n'y a pas de changement significatif dans la moyenne du poids moléculaire. Les sources de matières premières utilisées pour le biodiesel ont fortement influencé l' I_s pour chaque carburant [12, 14]. Le schéma suivant montre le principe de saponification d'un triglycéride.



Mode Opérateur : La méthode ASTM D5558-95 a été utilisée pour mesurer l'indice de saponification des échantillons préparés [18]. Dans un ballon de 50 mL, près de 0,01 g, une quantité appropriée de l'échantillon (1 g) a été ajoutée à 25 mL d'une solution éthanolique de KOH (0,5 mol/L). Après 60 minutes à reflux (chauffage doux jusqu'à ce que l'échantillon soit complètement saponifié), on ajoute 2 ou 3 gouttes de phénolphtaléine comme indicateur coloré et le mélange est titré ensuite avec une solution éthanolique de HCl (0,5 mol/L) jusqu'à ce que la couleur rose soit disparue. Nous refaisons les mêmes étapes pour le témoin en excluant l'échantillon. L'indice de saponification I_S de chaque échantillon a été mesuré en triplicata ($n=3$). La valeur de l'indice de saponification est calculée par la formule suivante :

$$I_S = \frac{(V_0 - V_t) \times C_{HCl} \times M_{KOH}}{m_e}; \quad (7)$$

Sachant que :

V_0 : Volume de témoin (en mL) ;

V_t : Volume titré de l'échantillon bio-huile ou biodiésel (en mL) ;

C_{HCl} : Concentration de solution éthanolique de HCl utilisée (en mol/L) ;

M_{KOH} : Masse molaire de la potasse : $M_{KOH} = 56,11 \text{ g.mol}^{-1}$;

m_e : Masse de l'échantillon (en g).

III.5.5- Indice d'acide ; I_A

Définition : L'indice d'acide (I_A) est le milligramme d'hydroxyde de potassium KOH nécessaire pour neutraliser les AGL dans un gramme d'huile. Cette valeur est utilisée pour déterminer la quantité de catalyseur basique pour neutraliser l'acidité d'un gramme de matière première. Il est indépendant du poids moléculaire et, par coïncidence, il est presque deux fois plus élevé que l'acidité (en %) lorsque cette dernière est exprimée par rapport à l'acide oléique [19–20]. La méthode de titrage est généralement utilisée pour mesurer la concentration

d'AGL et déterminer la conversion des acides gras pendant l'estérification [20–21]. L'indice d'acide des huiles végétales de bonne qualité est inférieur à 10 mg KOH/g, et pour les huiles de qualité inférieure se situe entre 20 et 25 mg KOH/g [22]. Dans la pratique, le KOH peut être remplacé par le NaOH [23].



Mode opératoire : La méthode ASTM D664-18e2 a été utilisée pour déterminer l'indice d'acide de nos échantillons [24]. Dans un erlenmeyer de 100 mL ; 10 g de l'échantillon sont pesés avec précision (près de 0,1 g) et ajoutés à 50 mL d'éthanol neutralisé (avec le KOH d'une concentration de 0,1 mol/L). Le mélange agité (et chauffé si nécessaire pour assurer la dissolution totale de l'échantillon) est ensuite titré avec une solution de KOH (0,1 mol/L) jusqu'à ce que le point d'équivalence soit atteint (coloration rose persistante). La phénolphthaléine a été utilisée comme indicateur coloré. L'indice d'acide I_A de chaque échantillon a été mesuré en triplicata ($n=3$). La valeur de l'indice d'acide est calculée par la formule suivante :

$$I_A = \frac{V_t \times C_{\text{KOH}} \times M_{\text{KOH}}}{m_e}; \quad (8)$$

Sachant que :

V_t : le volume titré de l'échantillon (en mL) ;

C_{KOH} : la concentration de la solution de KOH utilisée (en mol/L) ;

M_{KOH} : la masse molaire de la potasse : $M_{\text{KOH}} = 56,11 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$;

m_e : la masse de l'échantillon (en g).

Si le pourcentage de l'acidité (A%) est exprimé en Acide Oléique C18 :1 (le plus dominant dans les huiles végétales ; de masse molaire de 282.46 g/mol), sa valeur est calculée par la formule suivante :

$$A, \% = \frac{28,246 \times V_t \times C_{\text{KOH}}}{m_e}; \quad (9)$$

III.5.6- Nombre de Cétane ; N_C

Le nombre de cétane N_C évalue la capacité d'un carburant à s'enflammer sur une échelle de 0 à 100. Il est particulièrement important pour les moteurs

Diesel où le carburant doit s'auto-enflammer sous l'effet de la compression. Le nombre de cétane d'un carburant diesel indique alors ses caractéristiques d'allumage. Plus le nombre de cétane est élevé, plus ses propriétés d'allumage sont meilleures. Le nombre de cétane est un paramètre empirique associé au temps de retard de l'allumage des carburants diesel, qui est déterminé au moyen d'essais standard basés sur la norme ASTM D613. Le N_C affecte un certain nombre de paramètres de performance du moteur comme la combustion, la stabilité, la motricité, la fumée blanche, le bruit et les émissions de CO. La valeur de N_C du biodiesel est plus élevée que celui du carburant diesel classique. Il en résulte un meilleur rendement de combustion et une consommation d'énergie plus faible [25–26].

La mesure du nombre de cétane N_C d'un mélange d'esters méthyliques EMAG provenant d'un grand nombre de sources lipidiques est coûteuse. Il en est résulté un indice de cétane I_C estimé par une équation proposée dérivée de trois équations simultanées, appelée l'indice de cétane (I_C) dans la littérature [27].

L'indice de cétane I_C est utilisé comme substitut de N_C du carburant diesel. I_C est calculé généralement en fonction de la densité du combustible et de la plage de distillation. Deux méthodes sont utilisées, ASTM D976 et ASTM D4737. L'ancienne D976, ou "équation à deux variables", est dépassée et ne devrait plus être utilisée pour l'estimation de l'indice de cétane. Toutefois, elle est toujours exigée par l'Agence de Protection de l'Environnement (EPA) des États-Unis comme méthode de rechange pour satisfaire à ses exigences en matière d'aromaticité pour le carburant diesel. ASTM D4737 est la méthode la plus récente et est parfois appelée "l'équation à quatre variables" [28].

Toutefois, pour contourner les coûts de mesure du N_C par les méthodes de l'ASTM, pour un grand nombre d'échantillons d'EMAG provenant de diverses sources lipidiques, l'équation 10 décrite ci-dessous, proposée par Krisnangkura, 1986, pour estimer l'indice de cétane I_C , est déclarée comme N_C dans la documentation [27].

$$I_C = 46,3 + \frac{5458}{I_S} - 0,225I_I; \quad (10)$$

D'où :

I_s : c'est l'indice de Saponification de l'échantillon traité ;

I_I : c'est l'indice d'iode du même échantillon.

III.5.7- Pouvoir Calorifique Supérieur ; PCS

Le Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS) est défini comme la quantité de chaleur dégagée par la masse ou le volume unitaire de combustible (initialement à 25 °C) après sa combustion et le retour à une température de 25 °C des produits. Il inclut la chaleur latente de vaporisation de l'eau. La valeur de PCS peut être mesurée dans un calorimètre à bombe en utilisant la norme ASTM D-2015 (retirée par ASTM 2000, et non remplacée). Il est également appelé la Valeur Calorifique Brute (VCB). En Amérique du Nord, l'efficacité thermique d'un système est habituellement exprimée en termes de PCS, il est donc important de connaître le PCS du combustible de conception. La valeur de PCS d'un combustible permet aussi d'avoir une compréhension générale de ses caractéristiques de combustion [29–30].

Dans une étude antérieure, en étudiant la dépendance du PCS observé par rapport aux teneurs en carbone (C), en hydrogène (H) et en oxygène (O) des combustibles lignocellulosiques, ils ont suggéré l'expression 11 pour calculer le PCS [31].

$$PCS = 33,5(C) + 142,3(H) - 15,4(O); \quad (11)$$

De plus ; l'indice de saponification I_s d'une huile diminue avec l'augmentation de son poids moléculaire. D'autre part, les pourcentages de carbone et d'hydrogène dans une huile augmentent avec la diminution du poids moléculaire. D'autre part ; l'augmentation de l'indice d'iode I_I (c.-à-d. double liaison carbone-carbone ; -C=C-) entraîne une diminution de la teneur en chaleur de l'huile. Par conséquent, pour le calcul des PCSs des huiles végétales, l'équation empirique 12 a été utilisée : [31]

$$PCS = 49,43 - [0,041(I_s) + 0,015(I_I)]; \quad (12)$$

Dans cette étude, l'équation 12 a été utilisée pour le calcul des pouvoirs calorifiques supérieurs PCS des huiles extraites à partir des noyaux de dattes et pour leurs biodiésels.

III.6- ANALYSE PAR SPECTROSCOPIE INFRAROUGE

La spectroscopie infrarouge IR est une méthode de caractérisation intéressante pour une analyse rapide, peu coûteuse, sensible et à haut débit des composés organiques et ne nécessite pas de compétences particulières de la part des utilisateurs. La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) est une méthode physique qui peut être utilisée pour caractériser les groupes fonctionnels des huiles végétales et les biodiésels. Les progrès de l'instrument FTIR et les techniques de reconnaissance de formes ont permis d'extraire des informations des spectres liés à la composition et à la conformation des molécules organiques [32].

La spectroscopie infrarouge moyenne ($4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$) permet une discrimination chimique des constituants organiques, produisant des empreintes biochimiques distinctes et reproductibles qui résultent de vibrations de groupe avec des affectations connues dans la plupart des cas. La région comprise entre $1500\text{--}800\text{ cm}^{-1}$ dans la région IR-moyenne a été nommée région d'empreinte digitale, où les absorptions comprenaient des contributions de vibrations complexes en interaction qui ont donné à chaque composé des informations uniques [32–33]. L'IR-moyenne représente d'absorption de toutes les liaisons chimiques ; telles que la liaison O–H, N–H, C=O C–H,...etc. Actuellement, la spectroscopie IR-moyenne est largement utilisée pour l'analyse du biodiesel, en raison des bandes spectrales d'incidence plus élevées dans cette région ainsi que de l'intensité et de la spécificité plus élevées du signal [33].

Les analyses spectroscopiques FTIR de nos huiles extraites à partir de différents noyaux de palmiers dattiers de la région d'Adrar, ainsi leurs biodiésels, ont été acquises en utilisant un spectromètre Cary 660 FTIR (Agilent® ; USA) sur la plage d'ondes $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$, avec une résolution de 4 cm^{-1} . La réalisation de ces spectres a été faite dans une chambre avec des conditions ordinaires.

III.7- ANALYSES CHROMATOGRAPHIQUES CPG–DIF

Le CPG–DIF signifie la Chromatographie en Phase Gazeuse couplée avec un Détecteur à Ionisation de Flamme (on dit CG–FID en Anglais). La détection par ionisation à flamme (FID) est un bon détecteur général pour les composés organiques en GC qui détecte la quantité de carbone dans un échantillon. Après la colonne, les échantillons sont brûlés dans une flamme chaude, hydrogène-air. Les ions carbonés sont produits par la combustion. Le FID est plus couramment utilisé, notamment en raison d'instruments moins coûteux, mais aussi parce que le FID s'est avéré plus fiable pour l'analyse quantitative, produisant des écarts types plus faibles [34].

Préparation de l'échantillon : Environ 50 mg de chaque EMAG, a été prélevée dans un flacon en verre de 4 mL, puis mélangé avec 1 mL de *n*-Hexane et 0.5 mL de Méthanolate de sodium. Après la décantation, le mélange a été ajouté à une quantité de sulfate de sodium pour éliminer toute trace de l'humidité.

La composition en acide gras des huiles Hm, Tk, Tg et Tn, a été déterminée par la chromatographie en phase gazeuse de type GC TRACE 1300 (Thermo Scientific®, USA), équipée d'un détecteur à ionisation de flamme. 1 µL de chaque EMAG a été injectée dans le GC avec un rapport de partage de 1:18. Les températures de l'injecteur et du Détecteur étaient de 250 °C et 270 °C respectivement. La colonne capillaire utilisée est de type Restek® Rt–2560, elle avait une longueur de 100 m, une épaisseur de film de 0.20 µm, et un diamètre interne de 0,25 mm. Le gaz vecteur est l'Hydrogène et il est fourni à une vitesse de 1,5 mL/min. La température était de 175 °C pendant 5 min et de 2 °C/min à 185 °C pendant 30 min. La durée de chaque analyse est de 40 min. Les chromatogrammes ont été intégrés dans la gamme qui comprend les pics de C8:0 à C22:1.

La composition en acides gras dans un échantillon quelconque ; a été considérée comme le pourcentage d'aire (%A) en fonction de l'aire totale des pics (A) de tous les acides gras présents dans l'échantillon.

$$\%A = \frac{A_s}{\sum A}; \quad (13)$$

Tel que ;

A_s : c'est l'aire d'un pic sélectionné ;

ΣA : est la somme de tous aires dans le spectre.

Comme indiqué dans la section III.2.7 précédente, l'Indice d'iode I_I est la valeur qui indique le nombre des doubles liaisons dans les huiles, par conséquent, il est également lié au Degré d'Insaturation DI du biodiesel [2].

$$DI = \sum [Total\ AG\ Monosaturés + 2 \times (Total\ AG\ Polysaturés)]; \quad (14)$$

Dans des études antérieures, ils ont trouvé que lorsque le DI augment, l'indice d'iode I_I augment aussi, ce qui indique que l'insaturation dans l'échantillon sera plus élevée. L'équation suivante a été développée pour prédire l'indice d'iode I_I : [2]

$$I_I = (0,9076 \times DI) - 0,0527; \quad R^2 = 0,9983; \quad (15)$$

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]– Hannachi, S., Benkhalifa, A., Khitri, D & Brac de la Perrière, R.A. (eds.) *Inventaire Variétal de la Palmeraie Algérienne*. ANEP, Rouiba, **1998**.
- [2]– Mofijur, M., Rasul, M.G., Hassan, N.M.S., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., and Mahmudul, H.M. *Assessment of Physical, Chemical, and Tribological Properties of Different Biodiesel Fuels. Clean Energy for Sustainable Development*. In: Rasul, M.G., Azad A.K and Sharma S.C. (eds.) *Clean Energy for Sustainable Development: Comparisons and Contrasts of New Approaches*. Academic Press, **2017**, pp: 441–463.
- [3]– Mohan, S.V., Rohit, M.V., Subhash, G.V., Chandra, R., Devi, M.P., Butti, S.K., and Rajesh, K. *Algal Oils as Biodiesel. Biofuels from Algae*. In: Pandey, A., Chang, J-S., Ricardo, S.C., Lee, D-J., Chisti, Yusuf. (eds.) *Biofuels from Algae Sustainable Platform for Fuels, Chemicals and Remediation: A Volume in Biomass, Biofuels, Biochemicals*. Elsevier, **2019**, p: 287–323.
- [4]– Torosian, G.T., and Ashley Mac Millan, P.E. *Physical Properties, Behavior, and Testing of Geotextiles*. In: Koerner, R.M. (eds.) *Geotextiles*, Woodhead Publishing, **2016**, p: 105–113.
- [5]– Kirkham, M.B. *Tensiometers*. In: Kirkham, M.B. (eds.) *Principles of Soil and Plant Water Relations*, Academic Press, **2014**, p: 53–69.
- [6]– Fernandes, D.M., Santos, D.Q., Vieira, D.F., and Munoz, R.A.A. Development of an Algorithm for Correction of Specific Gravity of Biodiesel. *Renewable Energy*, **2014**, *63*, 507–510.
- [7]– Stauffer, E., Dolan, J.A., and Newman, R. *Chemistry and Physics of Fire and Liquid Fuels*. In: Stauffer, E., Dolan, J.A., and Newman, R. (eds.) *Fire Debris Analysis*, Academic Press, **2008**, p: 85–129.
- [8]– Silla, E., Arnau, A., and Tuñón, I. *Solvent Effects on Chemical Systems*. In: Wypych, G. (eds.) *Handbook of Solvent*. ChemTec Publishing, **2014**, p: 11–72.
- [9]– Shrivastava, A. *Plastic Properties and Testing. Introduction to Plastics Engineering*. In: Shrivastava, A. (eds.) *Introduction to Plastics Engineering*. William Andrew, **2018**, p: 49–110.
- [10]– Wypych, G. *Methods of Solvent Detection and Testing*. In: Wypych, G. (eds.) *Handbook of Solvent*. ChemTec Publishing, **2014**, p: 263–330.

- [11]– Varshneya, A.K., and Mauro, J.C. *Optical Properties. Fundamentals of Inorganic Glasses*. In: Varshneya, A.K., and Mauro, J.C. (eds.) *Fundamentals of Inorganic Glasses*. Elsevier, **2019**, p: 537–594.
- [12]– Yasin, M.H.M., Ali, M.A., Mamat, R., Yusop, A.F., and Ali, M.H. *Physical Properties and Chemical Composition of Biofuels. Second and Third Generation of Feedstocks*. In: Basile, A., and Dalena, F. (eds.) *Second and Third Generation of Feedstocks*. Elsevier Science, **2019**, p: 291–320.
- [13]– He, D., and Liu, L. *Analytical Aspects of Rice Bran Oil*. In: (eds.) Cheong, L-Z., and Xu, X. *Rice Bran and Rice Bran Oil*, Academic Press and AOCS Press, **2019**, p: 169–181.
- [14]– Singh, D., Sharma, D., Soni, S.L., Sharma, S., and Kumari, D. Chemical Compositions, Properties, and Standards for Different Generation Biodiesels: A Review. *Fuel*, **2019**, 253, 60–71.
- [15]– Zovi, O. (Thèse) *Fonctionnalisation et Photopolymérisation de l’Huile de Lin en Vue d’Elaboration de Nouveaux Matériels sans Emission de Composés Organiques Volatils (COV)*. Institut Nationale des Sciences Appliquées de ROUEN, France, Soutenu en **2009**.
- [16]– ASTM D5554-96. *Standard Test Method for Determination of the Iodine Value of Fats and Oils*. American Society for Testing and Materials International. Conshohocken, PA, **2006**.
- [17]– Toscano, G., Riva, G., Foppa Pedretti, E., and Duca, D. Vegetable Oil and Fat Viscosity Forecast Models Based on Iodine Number and Saponification Number. *Biomass and Bioenergy*, **2012**, 46, 511–516.
- [18]– ASTM D5558-95. *Standard Test Method for Determination of the Saponification Value of Fats and Oil*. American Society for Testing and Materials International. Conshohocken, PA, **2017**.
- [19]– Patterson, H. B. W. Quality and Control. *Hydrogenation of Fats and Oils*. In: List, G.R., and King, J.W. (eds.) *Hydrogenation of Fats and Oils*, Academic Press and AOCS Press, **2011**, p: 329–350.
- [20]– Win, S.S., and Trabold, T. A. *Sustainable Waste-to-Energy Technologies: Transesterification*. In: Trabold, T.A., and Babbitt, C.W. (eds.) *Sustainable Food Waste-To-Energy Systems*, Academic Press, **2018**, p: 89–109.
- [21]– Spitz, L. *Glossary*. In: Spitz, L. (eds.) *Soap Manufacturing Technology*, Academic Press and AOCS Press, **2016**, p: 267–280.
- [22]– Bart, J.C.J., Palmeri, N., and Cavallaro, S. *Processes for Biodiesel Production from Unrefined Oils and Fats. Biodiesel Science and Technology*. In: Bart, J.C.J., Palmeri, N., and Cavallaro, S. (eds.)

- Biodiesel Science and Technology*, Woodhead Publishing, **2010**, p: 386–433.
- [23]– Bockisch, M. *Analytical Methods*. In: Bockisch, M. (eds.) *Fats and Oils Handbook*, Academic Press and AOCS Press, **1998**, p: 803–808.
- [24]– ASTM D664-18e2. *Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration*. American Society for Testing and Materials International. Conshohocken, PA, **2019**.
- [25]– Bhatia, S.C. *Biodiesel*. In: Bhatia, S.C. (eds.) *Advanced Renewable Energy Systems*. Woodhead Publishing, India, **2014**, p: 573–626.
- [26]– Cataluña, R., and da Silva, R. Effect of Cetane Number on Specific Fuel Consumption and Particulate Matter and Unburned Hydrocarbon Emissions from Diesel Engines. *Journal of Combustion*. **2012**, 2012, 1–6.
- [27]– Iyer, R. Comments on Reporting Cetane Index as Cetane Number for Biodiesel. *Biofuels*, **2014**, 5(5), 565–568.
- [28]– Owen, K. (eds.) *Automotive Fuels Reference Book*, Trevor Coley SAE, **1995**.
- [29]– Tillman, D.A., Duong, D.N.B., and Harding, N.S. *Blending Coal with Biomass*. In: Tillman, D.A., Duong, D.N.B., and Harding, N.S. (eds.) *Solid Fuel Blending*, **2012**, p: 125–200.
- [30]– Basu, P. *Biomass Characteristics*. In: Basu, P. (eds.) *Biomass Gasification Design Handbook*, Academic Press, **2010**, p: 27–63.
- [31]– Demirbas, A. Fuel Properties and Calculation of Higher Heating Values of Vegetable Oils. *Fuel*, **1998**, 77(9-10), 1117–1120.
- [32]– Koca, N., Rodriguez-Saona, L.E., Harper, W.J., and Alvarez, V.B. Application of Fourier Transform Infrared Spectroscopy for Monitoring Short-Chain Free Fatty Acids in Swiss Cheese. *Journal of Dairy Science*, **2007**, 90(8), 3596–3603.
- [33]– Zhang, W.-B. Review on Analysis of Biodiesel with Infrared Spectroscopy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **2012**, 16(8), 6048–6058.
- [34]– Niemi, C., Lage, S., and Gentili, F.G. Comparisons of Analysis of Fatty Acid Methyl Ester (FAME) of Microalgae by Chromatographic Techniques. *Algal Research*, **2019**, 39, 101449.
- [35]– Aminata, K (Thèse). *Etude de Trois Plantes Utilisées dans le Traitement Traditionnel de l'ulcère Gastroduodéal dans le District de Bamako: Borassus aethiopum Mart (Palmeae), Sclerocarya birrea (A. Rich.) Hochst. (Anacardiacee) et Ximenia americana L. (Olacacee)*. Université de Bamako, Mali. Soutenu en **2005**.

- [36]– Park, H.J.; Kim, M.J., Ha, E & Chung, J.H. Apoptotic Effect of Hesperidin through Caspase3 Activation in Human Colon Cancer Cells, SNU-C4. *Phytomedicine*, **2008**, *15*, 147–151;
- [37]– Bentabet, N., Boucherit-Otmani, Z., Boucherit, K. Composition Chimique et Activité Antioxydante d'extraits Organiques des Racines de *Fredolia aretioides* de la Région de Béchar en Algérie. *Phytothérapie*, **2014**, *12(6)*, 364–371.
- [38]– Kedare, S.B., & Singh, R.P.J. Genesis and development of DPPH Method of Antioxidant Assay. *Food Sci Technol.*, **2011**, *48(4)*, 412–422.
- [39]– Laghouiter, O.K., Benalia, M., Gourine, N., Djeridane, A., Bombarda, I., and Yousfi, M. Chemical Characterization and *in vitro* Antioxidant Capacity of Nine Algerian Date Palm Cultivars (*Phoenix dactylifera* L.) Seed Oil. *Mediterranean Journal of Nutrition and Metabolism*, **2018**, *11(2)*, 103–117.

Chapitre IV:

Résultats & Discussions

IV.1- EXTRACTION, COMPOSITION & PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DES HUILES

IV.1.1- Teneur en huile :

Les différentes teneurs en huiles obtenues à partir de l'extraction par la méthode de Soxhlet avec le *n*-hexane de nos échantillons : H'mira (Hm), Takerbouchet (Tk), Tegazza (Tg) et Tinaceur (Tn); sont mentionnées dans le tableau 07.

Tableau 07 : Teneurs en huile.

Echantillon	Teneur en huile (%)
Hm	<i>8,41±0,25</i>
Tk	<i>11,25±2,39</i>
Tg	<i>9,49±0,89</i>
Tn	<i>7,97±1,09</i>

D'après les résultats du tableau 07, les teneurs en huile obtenues (sur la base d'un poids sec) pour tous les cultivars Hm, Tk, Tg et Tn sont comprises entre 8 et 11 %. Ces résultats obtenus sont du même ordre avec les teneurs des huiles extraites d'autres cultivars, tels que *P. dactylifera* irakien (5 et 13%) [1] et *P. Canariensis* saoudien (10,36 %) [2]. D'autre part, la majorité des cultivars saoudiens : Barhi, Khalas, Manifi, Ruzai, Sala et Soukari ont des teneurs en huile inférieures à 8% [2–3]. Les résultats donnés par Laghouiter *et al.* 2018, ne dépassent pas 7 % (max de 6,7 % du cultivar Bint qbala dans la région de Laghouat au sud-est de l'Algérie) [4].

Dans ce travail, nous remarquons aussi une différence dans les teneurs en huile obtenues (sur la base du poids sec), entre les variétés étudiées. La teneur en huile la plus élevée est enregistrée dans les noyaux de Tk (11,25 %), tandis que les noyaux de Tn avaient la faible teneur en huile (7,97 %) parmi les noyaux de dattes étudiées. Nous citons aussi que, les teneurs en huile dans les noyaux des variétés Hm et Tg sont 8,41 et 9,49 % respectivement.

IV.1.2-Analyses Chromatographiques CG-FID.

Le Tableau 08 montre le profil des esters méthyliques des acides gras (EMAG) de Hm, Tk, Tg et Tn. Ces acides gras ont un impact direct sur les propriétés chimiques et physiques du biocarburant.

Tableau 08 : Composition en acide gras (%) dans les huiles Hm, Tk, Tg et Tn.

Acide Gras	Nomenclature	Notation	MM	Hm	Tk	Tg	Tn	HP ^a
Caprylique	Octanoïque	C8 :0	144,21	0,287	0,136	0,212	0,230	–
Caprique	Décanoïque	C10 :0	172,27	0,405	0,251	0,347	0,320	0,35
Laurique	Dodécanoïque	C12 :0	200,32	19,803	15,297	17,959	17,197	0,12
Myristique	Tétradécanoïque	C14 :0	228,38	11,393	11,512	11,221	10,663	1,36
Palmitique	A Hexadécanoïque	C16 :0	256,43	11,285	13,251	11,590	11,399	42,75
Palmitoléique	Z-Hexadéca-9- énoïque	C16 :1	254,41	0,0	0,181	0,033	0,0	0,0
Stéarique	Octadécanoïque	C18 :0	284,48	3,041	3,152	3,509	3,282	4,64
Oléique	Z-Octadéca-9- énoïque	C18 :1	282,46	44,736	45,975	45,579	47,994	39,33
Linoléique	Z, Z-Octadéca-9, 12-diénoïque	C18 :2	280,45	7,676	8,955	7,881	7,585	10,37
α -Linoléique	Z, Z, Z-Octadéca-9, 12, 15-triénoïque	C18 :3	278,43	0,0	0,0	0,0	0,0	0,41
AGS				46,215	43,599	44,838	43,090	49,22
AGMI				44,736	46,155	45,612	47,994	39,22
AGPI				7,674	8,955	7,881	7,585	10,78
Autres				1,375	1,291	1,670	1,330	0,78
Totale				100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
DI				60,084	67,065	61,374	63,164	60,78
I_I Calculé				54,473	60,815	55,650	57,275	55,11
I_I Mesuré				53,54	58,39	54,27	55,48	-

MM : Masse Molaire (g/mol) ; Hm : H'mia ; Tk : Takerbouchet, Tg : Teggaza, Tn : Tinaceur, AGS : Acides Gras Saturés, AGMI : Acides Gras Mono-Insaturés, AGPI : Acides Gras Poly-Insaturés, DI : Degré d'Insaturation, I_I : Indice d'Iode.

^aHP : Huile de Palm [5].

Le Tableau 08 montre la composition en acides gras des quatre cultivars Hm, Tk, Tg et Tn, où 10 acides gras ont été identifiés, représentant 71,43% du total des acides gras identifiés dans les noyaux de dattes des cultivars cités dans la littérature (au nombre de 14 [6]). Tous les échantillons EMAG contiennent des AGS, des AGMI et des AGPI. Le total des acides gras saturés de Hm, Tk, Tg et Tn s'est avéré être de 46,21 ; 43,60 ; 44,84 et 43,09 % respectivement, tandis que le total des acides gras insaturés s'est avéré être de 52,41 ; 55,11 ; 53,49 et 55,58 % respectivement.

Les principaux acides gras présents dans les noyaux des cultivars Hm, Tk, Tg et Tn sont l'acide laurique C12:0 (15,2-19,8 %), l'acide myristique C14:0 (10,6-11,5 %) et l'acide palmitique C16:0 (11,2-13,2 %). Ces acides gras saturés ont plusieurs effets sur la santé selon diverses études médicales [7]. L'acide oléique C18:1 (44,7-47,99 %), qui est un AG-oméga 9, a des effets bénéfiques apparents sur les risques cardiovasculaires en diminuant le taux de lipoprotéines LDL (mauvais cholestérol) et en augmentant le taux de HDL (bon cholestérol) [8]. Cet acide est par ailleurs considéré comme une source importante pour remplacer les graisses animales, qui sont riches en AGS [5]. D'autres acides ont été identifiés avec des taux variant entre 7,5 et 8,9 % attribués à la présence de Z,Z-Octadéca-9,12-diénoïque (AG-Omega 6). La présence de ces acides montre l'intérêt nutritionnel des huiles extraites des noyaux de dattes, qui sont considérées comme des déchets non valorisables.

Dans ce travail, nous avons notés que les taux d'acides gras saturés (43,09 et 46,21%) sont inférieurs aux taux d'acides gras insaturés (52,41–55,58 %), ce qui donne une valeur ajoutée à ces huiles extraites des cultivars H'mira, Takerbouchet, Teggaza et Tinaceur. Ces résultats sont en accord avec les valeurs du DI (60,08–67,06), ainsi que les valeurs calculées (54,47–60,81 g I₂/100g) et mesurées (53,54–58,39 g I₂/100g) de l'indice d'iode. Les taux d'acides gras insaturés sont similaires à ceux des huiles extraites des cultivars Deglet-nour, Allig et Bellah, cités par Ben-youcef *et al.* 2017 [6].

IV.1.3-Propriétés Physico-chimiques des huiles extraites :

Les différentes propriétés physicochimiques tel que : la densité, l'indice de réfraction, les indice d'iode et de saponification, l'acidité, etc. des huiles extraites de variétés *P. dactylifera* Hm, Tk, Tg et Tn, ont été analysés et présentés dans le Tableau 09.

Tableau 09 : Propriétés physicochimiques des huiles extraites.

Propriété	Hm	Tk	Tg	Tn
Densité à 20°C (g/cm ³)	0,9117±0,0032	0,9176±0,0012	0,9117±0,0105	0,9128±0,0002
Indice de Réfraction	1,4623±0,0005	1,4605±0,0003	1,4597±0,0051	1,4596±0,0003
Indice d'iode (gI ₂ /100 g)	53,19±1,32	57,79±2,85	55,73±2,38	56,28±2,11
Indice de Saponification (mg KOH/g)	249,69±2,8	237,53±4,3	230,10±2,9	254,83±4,5
Indice d'acide (mg KOH/g)	0,996±0,070	0,910±0,036	0,761±0,129	2,137±0,015
Acidité, AGL%	0,507±0,035	0,458±0,018	0,383±0,065	1,076±0,007
Indice de cétane ^a	56,191	56,275	57,481	55,055
Pouvoir Calorifique Supérieure ^b (MJ/kg)	38,395	38,824	39,160	38,138

^a L'indice de cétane a été calculé par une formule donnée par Krisnangkura, 1986 [9] ;

^b Le pouvoir calorifique supérieur a été calculé par la formule donnée par Demirbas, 2008 [10].

a)- Densité ; d

D'après le tableau 09 ci-dessus, la densité des huiles extraites dans cette étude varie entre 0,9117 et 0,9176 g/cm³, ce qui les place dans la même gamme de valeurs de densité des huiles végétales, telles que le tournesol (0,916 g/cm³), le colza (0,912 g/cm³), le soja (0,914 g/cm³), le jatropha (0,914 g/cm³) [11–12]. L'huile issue des noyaux de la variété irakienne *P. dactylifera*, a une densité de 0,9211 g/cm³ ; hors de cette fourchette [1]. Sur la base des résultats de l'analyse, nous avons constaté que les noyaux de Tk et Tn ont la densité la plus élevée, soit respectivement 0,9176 g/cm³ et 0,9128 g/cm³, la valeur la plus faible de cette propriété a été enregistrée pour les noyaux des variétés Hm et Tg (0,9117 g/cm³) (Figure 41).

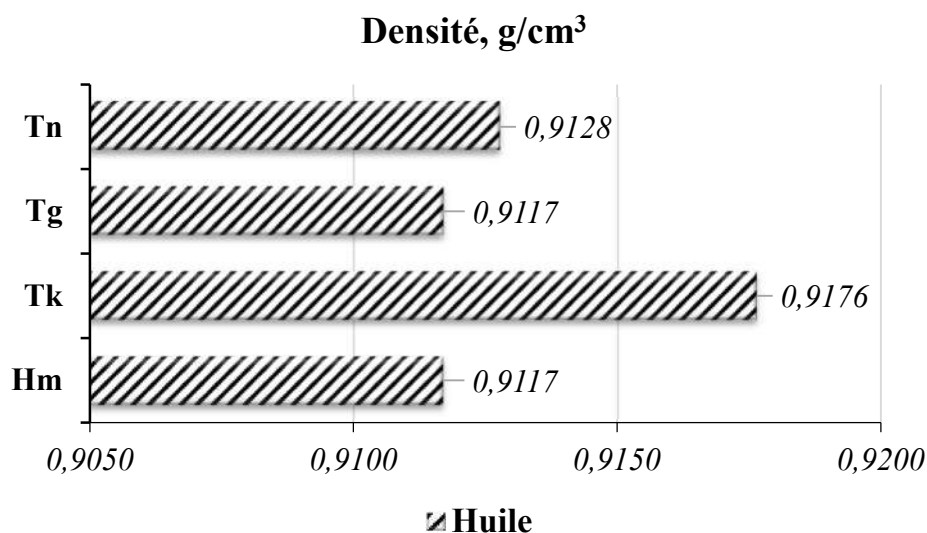


Figure 41 : Valeurs de densité des huiles Hm, Tk, Tg et Tn.

La densité des huiles végétales dépend proportionnellement de la teneur, la composition en acides gras, et de la pureté des matières premières utilisées. Les valeurs élevées de densité trouvées dans cette étude indiquent que les huiles de noyaux des variétés *P. dactylifera* Hm, Tk, Tg et Tn contiennent de nombreux acides gras insaturés.

b)- Indice de réfraction ; n_D^{20}

L'indice de réfraction est le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide par rapport à la vitesse de la lumière à travers un matériau donné. Cette propriété physique a été largement utilisée dans de nombreuses applications pour identifier et caractériser les matériaux, y compris les lipides [13–14].

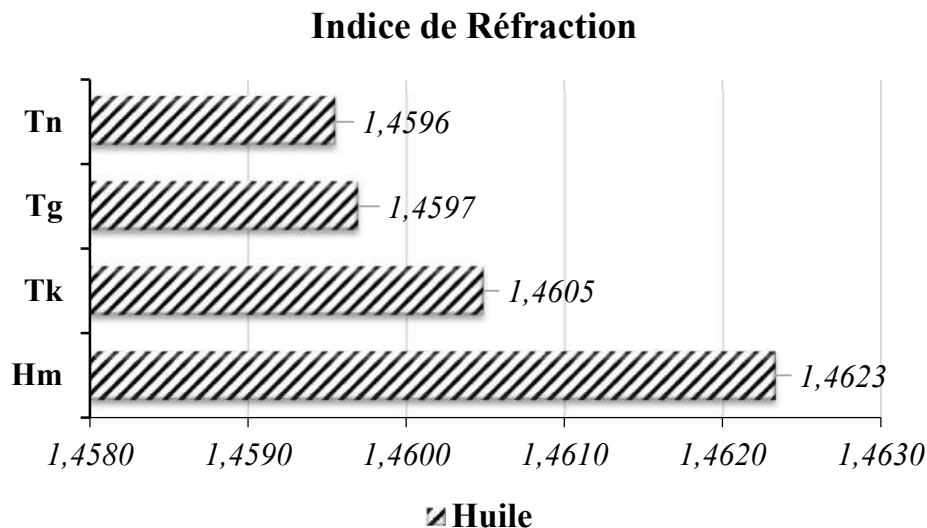


Figure 42 : Valeurs des indices de réfraction des huiles Hm, Tk, Tg et Tn.

D'après la figure 42, l'indice de réfraction des huiles de noyaux des dattes Hm, Tk, Tg et Tn s'est avéré être entre 1,459 à 1,462. Ces valeurs de l'indice de réfraction sont également comparables aux résultats antérieurs qui ont été montrés un indice de réfraction de 1,468 (soja) [15], 1,466 (citrouille) [16], 1,480 (Degla-Baidha) [17] et 1,467 (palm) [18]. L'indice de réfraction élevé de ces huiles Hm, Tk Tg et Tn est dû au nombre élevé d'atomes de carbone dans leur composition en acides gras.

c)- Indice d'iode, I_I

Les valeurs de l'indice d'iode I_I sont mesurées selon la méthode de Wijs. La figure 43 représente les différents résultats de l'indice d'iode de ces huiles.

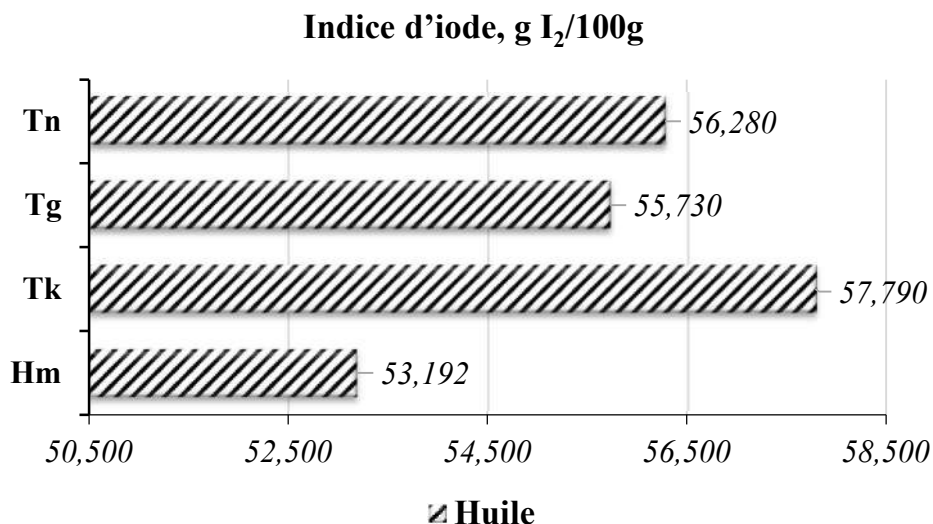


Figure 43 : Valeurs des indices d'iode des huiles Hm, Tk, Tg et Tn.

Les résultats relatifs à la détermination de l'indice d'iode I_I ont montré des valeurs comprises entre 53,19 et 57,79 g I₂/100 g d'huile. Ces valeurs sont très inférieures à celles mentionnées dans d'autres travaux tels que le soja (*Glycine max*: 134,9 g I₂/100g) [19], le moringa (*Moringa oleifera*: 79,23 g I₂/100g) [20] et les noyaux de citrouille (*Cucurbita maxima*: 113,2 g I₂/100g) [21]. Cette différence est un indicateur de la texture des huiles, qui est similaire à celle du suif de bœuf ($I_I = 40-55$ g I₂/100g) [22]. Par ailleurs, et par rapport à la valeur citée par Fadhil *et al.* 2017 [1], qui concernait l'extraction de l'huile des noyaux de dattes irakiennes ($I_I = 47,66$ g I₂/100g), la qualité de l'huile des noyaux de dattes algériennes Hm, Tk, Tg et Tn semble meilleure.

d)- Indice de saponification, I_s

L'indice ou le nombre de saponification I_s se rapporte à tous les acides gras présents dans l'échantillon (libres et estérifiés). L'indice de saponification dépend du poids moléculaire et du pourcentage de concentration des composants en acides gras présents dans les EMAG de l'huile. I_s est utilisé efficacement pour déterminer la masse moléculaire relative moyenne des huiles [23].

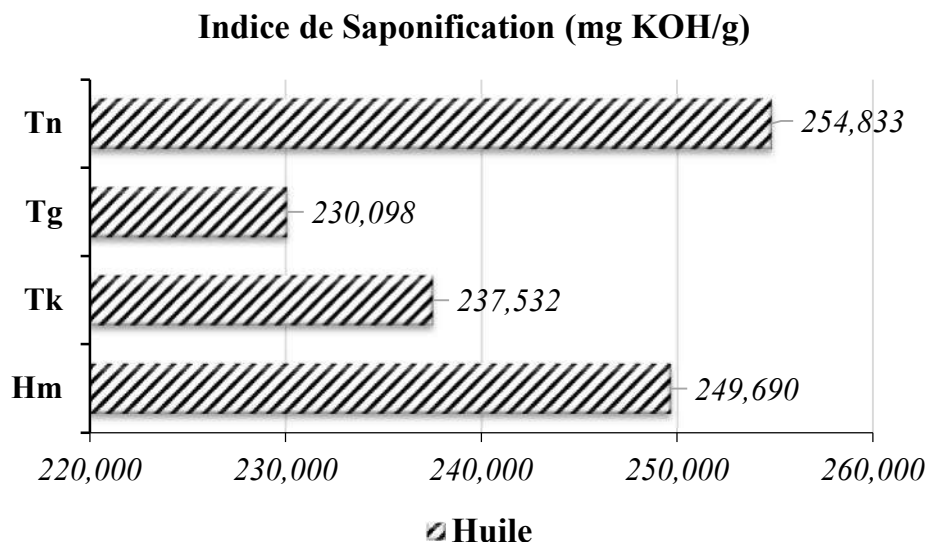


Figure 44 : Valeurs des indices de saponification des huiles Hm, Tk, Tg et Tn.

D'après la figure 44, les indices de saponification étaient de 230,1–254,83 mg KOH/g, ce qui indique que les huiles Hm, Tk, Tg et Tn contiennent des acides gras insaturés en grande proportion, cela a été confirmé par les résultats trouvés dans la Section IV.1.2. La valeur élevée de I_s indique que les huiles sont des triglycérides normaux et qu'elles sont très utiles pour la production de savon liquide et de shampoing. La séparation des produits sera donc extrêmement difficile. Cela conduirait à un faible rendement du biodiesel [24]. Les valeurs obtenues dans cette étude sont supérieures à celles trouvées pour les huiles : de *P. dactylifera* (212 mg KOH/g) [1], de *Jatropha Curcas* (175,12–208,50 mg KOH/g) [25–29] et de *Moringa oleifera* (164,0–190,4 mg KOH/g) [30–32]. En outre, les résultats de I_s indiquent que les huiles extraites Hm, Tk, Tg et Tn sont de qualité acceptable.

e)- L'acidité libre et l'Indice d'acide, I_A

L'acidité libre (Acides Gras Libres AGL ; en %) peut être définie comme le pourcentage en poids, des groupes AGL présents dans les huiles et les graisses. Cette mesure est normalement corrélée avec la quantité d'acides gras hydrolysés à partir des *tri*-acylglycéroles. L'acidité libre est le pourcentage en poids d'un acide gras spécifique (acide oléique, par exemple). L'indice d'acide (I_A) est défini comme le milligramme de KOH nécessaire pour neutraliser les AGL présents

dans un gramme de graisse ou d'huile [33]. La méthode ASTM D664-18e2 a été utilisée pour déterminer l' I_A et l'AGL dans ce travail. Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau 09 ci-dessus.

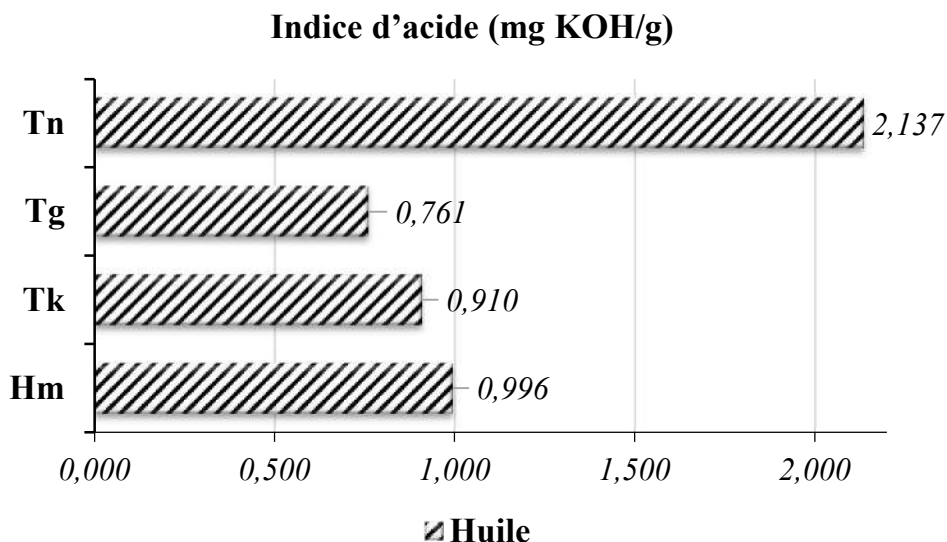


Figure 45 : Valeurs des indices d'acide des huiles Hm, Tk, Tg et Tn.

D'après la figure 45, Les valeurs de l'indice d'acide I_A allant de 0,761 à 2,137 mg KOH/g indiquent que les *tri*-acylglycéroles n'ont pas été hydrolysés. Lorsque la qualité de l'huile est prise en compte, la quantité d'AGL s'avère être un bon indicateur. En effet, les huiles dont la teneur en AGL est plus élevée sont de mauvaise qualité.

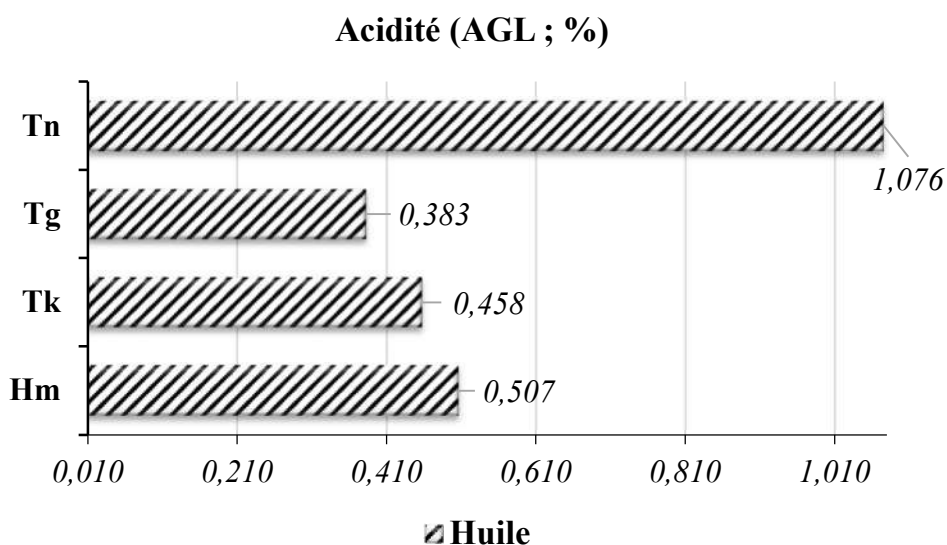


Figure 46 : Valeurs de l'acidité (AGL %) des huiles Hm, Tk, Tg et Tn.

Dans la figure 46, nous observons que les valeurs d'AGL, exprimées en % d'acide oléique, variaient entre 0,383 et 1,076 %, ce qui suggère une bonne qualité des huiles extraites des cultivars Hm, Tk et Tg, par rapport aux huiles obtenues à partir de colza (0,3–1,2 %) [34], d'olive (0,66–2,17 %) [35] et de tournesol (1,19–1,35 %) [36], la valeur d'AGL d'une huile comestible ne devant pas dépasser 0,4 % [37]. En fait, les valeurs d'AGL des huiles Hm et Tn sont en dehors de la limite nutritionnelle (0,4 %).

f)- Indice de cétane, Ic

L'indice de cétane d'un produit indique la facilité de son auto-inflammation. La plupart des moteurs diesel pour véhicules ordinaires ont un indice de cétane compris entre 45 et 55. Cependant, l'éther diméthylque ($\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$) est un carburant de haute qualité pour les moteurs diesel, il a un indice de cétane élevé (55–60), qui peut être utilisé comme carburant [38].

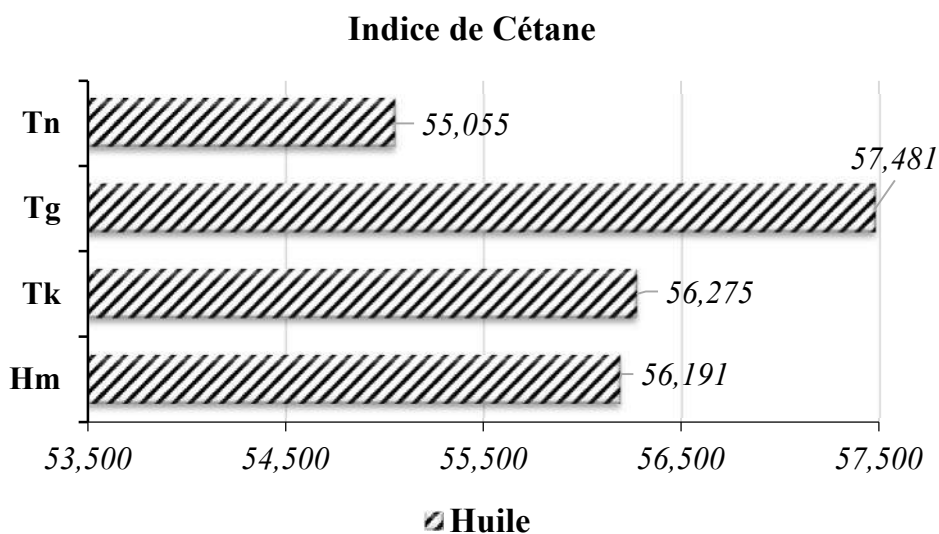


Figure 47 : Valeurs des indices de cétane des huiles Hm, Tk, Tg et Tn.

Les indices de cétane calculés (55–58) pour les huiles de noyaux de variétés *P. dactylifera* Hm, Tk, Tg et Tn sont présentés dans la figure 47. Les huiles de ces noyaux avaient des indices de cétane élevés par rapport à la norme EN 14214 (51 *min.*) pour les carburants diesel. Il a été conclu que les noyaux utilisés dans ce travail ; pourraient servir comme des matières premières non comestibles pour la production de biodiesel.

g)- Pouvoir Calorifique Supérieur, PCS

Le pouvoir calorifique supérieur (PCS ; en MJ/kg), qui est l'une des propriétés les plus importantes d'un combustible, est la quantité de chaleur libérée lors de la combustion d'un gramme de combustible pour produire du CO₂ et H₂O à sa température et sa pression initiales [39].

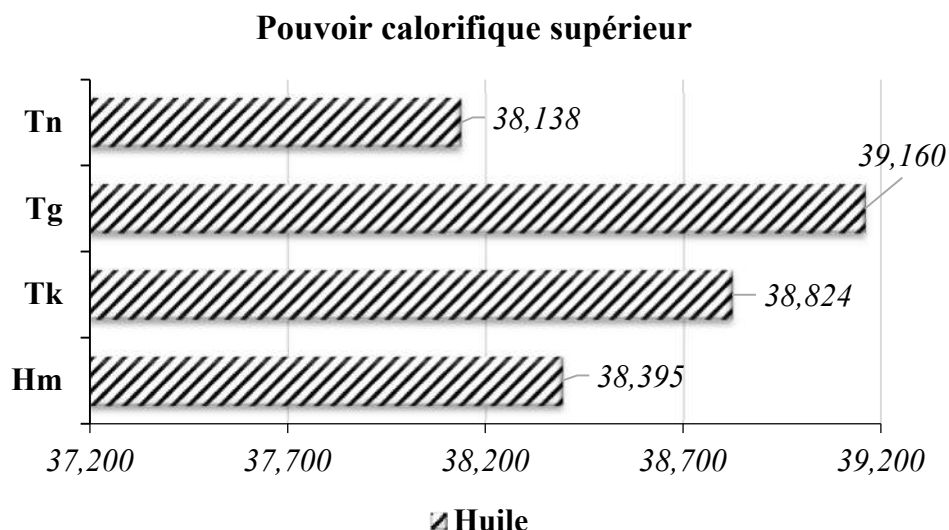


Figure 48 : Valeurs de pouvoir calorifique supérieur des huiles Hm, Tk, Tg et Tn.

D'après la figure 48, nous constatons que, lorsque ces huiles sont brûlées, elles libèrent de l'énergie dans une fourchette de 38,14 à 39,16 MJ/kg, ce qui est acceptable comparé aux autres huiles telles que : le maïs (39,5 MJ/kg), le colza (39,7 MJ/kg), le tournesol (39,5 MJ/kg) et le palme (38,6 MJ/kg) [40].

IV.1.4-Analyses Spectroscopiques FTIR

Le récapitulatif des bandes d'absorption FTIR pour les groupes fonctionnels des huiles extraites Hm, Tk, Tg et Tn ; est répertorié dans le Tableau 10 ci-dessous.

Tableau 10 : Groupes fonctionnels et modes de vibration des huiles extraites (en cm^{-1}).

	Hm	Tk	Tg	Tn	HP ^a
Vibration d'élongation de la liaison (H-C=)	3005	3005	2985	3003	3005
Vibration d'élongation Symétrique et Asymétrique des groupes (-CH ₂) et (-CH ₃)	2920-2850	2922-2852	2922-2852	2922-2852	2924-2852
Vibration d'élongation de groupe fonctionnel (C=O) de Triglycérides	1743	1745	1745	1743	1743
Vibration de déformation des groupes aliphatiques (-CH ₂) et (-CH ₃)	1464	1464	1464	1464	1465
Vibration de déformation de groupe (-CH ₂)	1375	1377	1377	1377	1377
Vibration d'élongation de liaison (C-O) _{Asy}	1234-1159	1234-1162	1230-1157	1232-1159	1236-1160
Vibration d'élongation de liaison (C-O) _{Sym}	1115	1115	1115	1115	1117 and 1098
Chevauchement de la vibration de balancement du groupe méthylène (-CH ₂) _{n>4}	721	721	723	721	721

^aHP : Huile de Palm [5].

D'après le Tableau 10, on observe que le groupe carbonyle est présent dans toutes nos différentes huiles extraites à partir des noyaux de variétés Hm, Tk, Tg et Tn, avec une bande d'absorption forte due à la vibration d'élongation de la liaison C=O observée entre 1745 cm^{-1} et 1743 cm^{-1} . En raison de son intensité dans la région des nombres d'onde moyens $2000\text{--}1500 \text{ cm}^{-1}$, relativement sans interférence dans laquelle elle se produit.

Les spectres de ces huiles nous ont montré aussi que les bandes qui se produisent dans la plage de $1230\text{--}1162 \text{ cm}^{-1}$; sont dues à la vibration d'élongation asymétrique de la liaison ester C-O. La vibration d'élongation symétrique de faible intensité de la liaison C-O de ces huiles; est observée à 1115 cm^{-1} . Dans la littérature, la bande due à la vibration d'élongation asymétrique de la liaison ester C-O-C se produit à $1275\text{--}1185 \text{ cm}^{-1}$ et celle due à la vibration d'élongation symétrique se produit à $1160\text{--}1050 \text{ cm}^{-1}$. Ces deux bandes sont fortes, la première bande étant généralement plus intense que l'autre; due à la vibration d'élongation de la liaison ester C=O [41].

Concernant la bande qui apparaît à 3005–3003 cm^{-1} dans les spectres des huiles Hm, Tk, Tg et Tn, avec une faible intensité, correspond aux vibrations d'élongation de la liaison H-C=. Quant aux bandes observées dans la plage de 2920–2852 cm^{-1} , elles sont produites à cause de la vibration d'élongation asymétrique et symétrique des groupes méthylènes ($-\text{CH}_2$). Ces derniers groupes aliphatiques méthylènes (avec les groupes aliphatiques $-\text{CH}_3$) ont aussi deux vibrations de déformation, l'une est apparaît à 1464 cm^{-1} (vibration de *Cisaillement*), et l'autre est observée dans la région de 1377–1375 cm^{-1} (Vibrations de *Torsion* et de *Balancement*) dans ces spectres.

L'analyse spectrale de ces huiles extraites a montrés ainsi l'existence d'une bande à 721 cm^{-1} et 723 cm^{-1} , cette bande résultant de la *Rotation plane* des groupes méthylène pour des alcanes linéaires de quatre atomes de carbone et plus. Les résultats d'analyse IR obtenus dans cette étude (Figure 49) sont similaires à ceux rapportés par Fadhil *et al.*, 2017 [1], et Rohman et Man, 2010 [5].

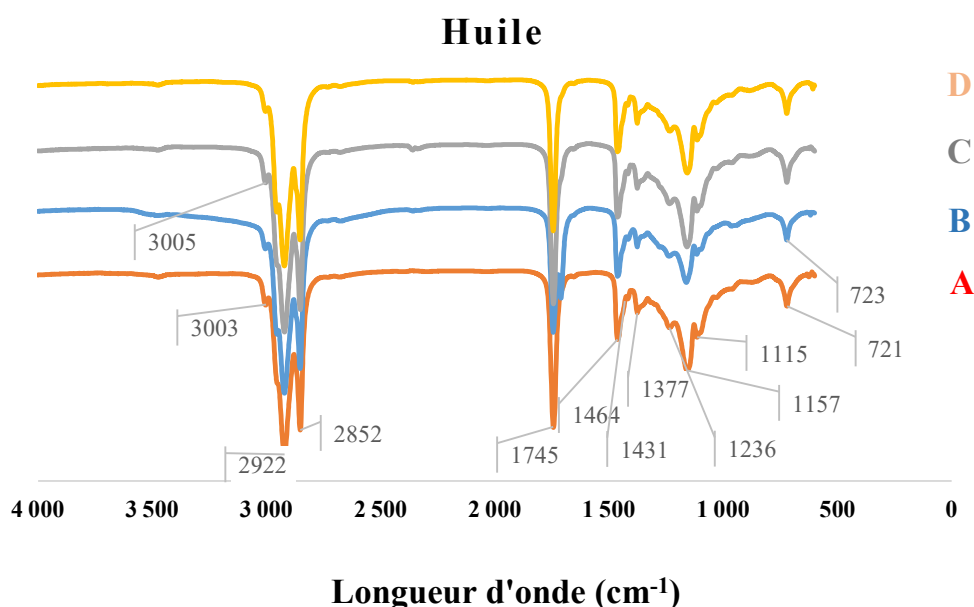


Figure 49 : Spectre FTIR des huiles : A: H'mira (Hm), B: Takerbouchet (Tk), C: Teggaza (Tg) and D: Tinaceur (Tn).

IV.2- PRODUCTION & PROPRIETES DE BIODIESEL

Le biodiesel dérivé de l'huile de palme aurait des propriétés de carburant similaires à celles du diesel de pétrole. En outre, le biodiesel de palme répond aux spécifications internationales de biodiesel telles que soulignées par EN 14214 et ASTM D6751. Il a été signalé que le biodiesel de palme pur (sans mélange avec du diesel de pétrole) peut être directement utilisé comme carburant dans un moteur diesel sans modification préalable. Un test exhaustif sur les performances du biodiesel de palme comme carburant alternatif sur moteur diesel a également été réalisé [46].

IV.2.4- Rendement de biodiesel

La production de EMAG (biodiesel) à partir des huiles extraites de noyaux Hm, Tk, Tg et Tn a été réalisée par méthyl–transestérification. Le Tableau 11 regroupe les différents rendements obtenus.

Tableau 11 : Rendement en biodiesel.

Echantillon	Rendement en Biodiesel (%)
Hm	91,73±1,91
Tk	88,94±3,9
Tg	94,17±1,7
Tn	92,21±0,25

D'après des études antérieures, il est possible d'obtenir un rendement en biodiesels de près de 100 % à partir d'huiles végétales raffinées, mais le rendement en biodiesels diminue lorsque l'indice d'acide I_A de l'huile végétale augmente [47]. Les rendements de conversion des biodiesels obtenus Hm, Tk, Tg et Tn ne sont pas significativement différents, dans des conditions de réaction optimales, avec un temps de 90 min et un rapport molaire méthanol/huile de 3:1. Des rendements variant de 88,94 à 94,17%, ont été obtenus dans ces conditions de réaction avec le KOH comme catalyseur.

Il apparaît que le biodiesel obtenu à partir de l'huile de la variété Tg a une conversion élevée de 94,17% (avec une $I_A = 0,761$ mg KOH/g). En revanche, l'huile obtenue à partir de la variété Tk donne une conversion de 88,94% ($I_A = 0,910$ mg KOH/g). Ces résultats ont déjà été rapportés dans la littérature, pour le biodiesel issu des huiles de noyaux de *P. dactylifera*, à environ 92,45% [48] ; à

96,4% [49], à 93,5% [50] et à environ 95,88 % [1] pour le biodiesel de l'huile de palme.

IV.2.5- Propriétés Physicochimiques de Biodiesel Synthétisé :

Le Tableau 12 montre les propriétés physicochimiques des biodiesels produits à partir des huiles de noyau de Hm, Tk, Tg et Tn, tels que la densité, l'indice d'acide, l'indice d'iode, le pouvoir calorifique, ... etc. qui ont été déterminées selon des méthodes bien établies. Ces propriétés du biodiesel ont été comparées avec les normes EN 14214 et ASTM 6751.

Tableau 12 : Propriétés physicochimiques des biodiesels synthétisés.

Propriété	Hm	Tk	Tg	Tn
Densité à 20°C (g/cm ³)	0,8785±0,0028	0,8865±0,0004	0,8781±0,0007	0,8725±0,0061
Indice de Réfraction	1,4488±0,0001	1,4500±0,0001	1,4468±0,0002	1,4479±0,0002
Indice d'iode (g I ₂ /100 g)	53,54±1,85	58,39±1,69	54,27±1,07	55,48±1,21
Indice de Saponification (mg KOH/g)	252,33±1,5	239,52±2,1	233,85±1,8	259,77±3,2
Indice d'acide (mg KOH/g)	0,081±0,042	0,075±0,091	0,061±0,084	0,174±0,142
Acidité, FFA%	0,041±0,074	0,038±0,021	0,031±0,096	0,088±0,058
Indice de cétane ^a	55,884	55,949	57,429	54,828
Pouvoir Calorifique Supérieure ^b (MJ/kg)	38,281	38,734	39,028	37,947

^a L'indice de cétane a été calculé par une formule donnée par Krisnangkura, 1986 [9] ;

^b Le pouvoir calorifique supérieur a été calculé par la formule donnée par Demirbas, 2008 [10] ;

c)- Densité ; d

La densité est une propriété physique de carburant pertinente car elle affecte directement les performances du moteur [11]. La densité joue un rôle important dans l'atomisation du carburant dans le processus de combustion d'un moteur diesel [51–52].

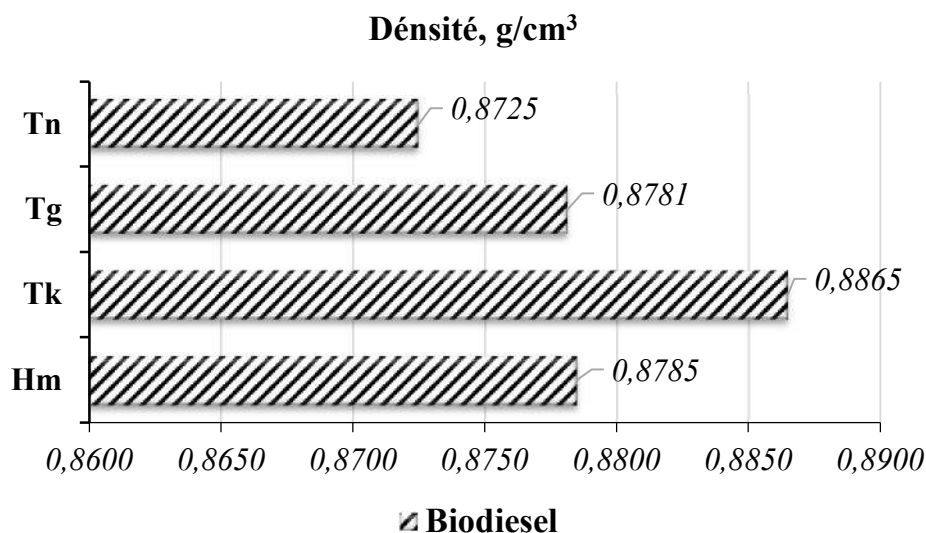


Figure 50 : Valeurs des densités de biodiesels d’Hm, Tk, Tg et Tn.

D’après la Figure 50, la densité nous permet de situer les biodiesels synthétisés Hm, Tk, Tg et Tn dans les normes requises (NE 14214). En effet, les valeurs de ce paramètre dans notre étude varient entre 0,8785 et 0,8865 g/cm³ (Figure 44), ce qui est conforme à la norme NE 14214, qui donne une valeur limite entre 0,86 et 0,90 g/cm³. De plus, la densité du *péto*-diesel est d’environ 0,85 g/cm³, ce qui est environ 15 à 20% plus élevé que la densité de l’essence (0,70 à 0,75 g/cm³) [53].

En examinant les études précédentes, il est évident que les densités du biodiesel des variétés Hm, Tk, Tg et Tn sont plus similaires que celles de nombreuses autres ressources, telles que le moringa (0,88 g/cm³) [54], le colza (0,87 g/cm³) [55], le palme (0,88 g/cm³) [56] et le jatropha (0,88 g/cm³) [57]. Il est clair que les biodiesels synthétisés dans cette étude sont plus conformes, ce qui justifie la bonne conversion des huiles extraites, en éliminant le glycérol initialement présent.

Ces résultats de densité sont confirmés par l’abaissement des valeurs de l’indice de réfraction (1,448–1,450) (Figure 51), indiquant ainsi la synthèse des biodiesels Hm, Tk, Tg et Tn.

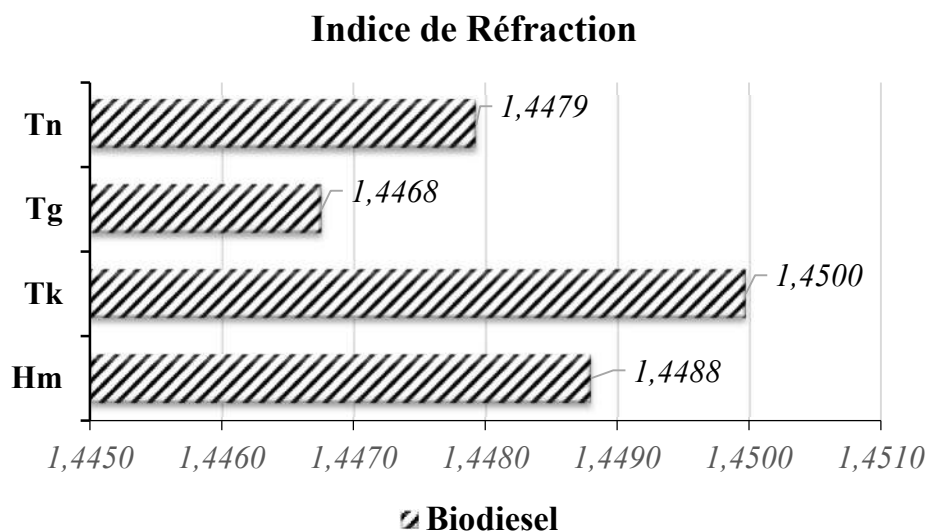


Figure 51 : Valeurs des indices de réfraction de biodiesel d'Hm, Tk, Tg et Tn.

d)- Indice d'iode I_I

L'indice d'iode I_I est une propriété importante du biodiesel, qui mesure les acides gras insaturés en déterminant la quantité d'iode (en grammes) qui peut être incorporée dans 100 g de biodiesel. Selon la norme EN 14214, la limite requise est de 120 g I_2 /100 g de biodiesel au maximum [58].

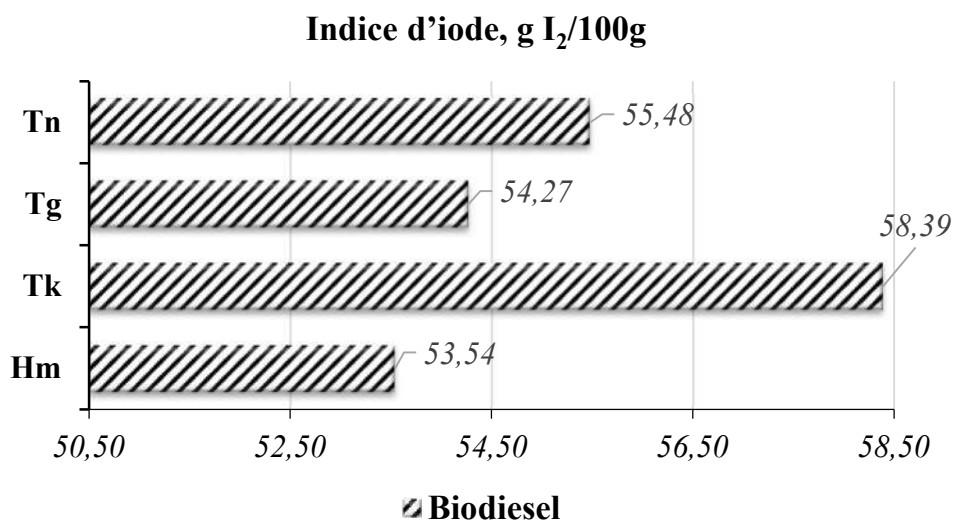


Figure 52 : Valeurs des indices d'iode de biodiesel d'Hm, Tk, Tg et Tn.

Les indices d'iode I_I (54,27–58,39 g $I_2/100g$), selon la figure 52, sont en accord avec les normes EN 14214 (120 g $I_2/100g$ max.), ce qui permet de dire que les biodiesels synthétisés sont effectivement de qualité acceptable. Les limites pour I_I ne sont pas incluses dans la norme ASTM D6751. Dans cette étude, le maximum d' I_I (58,39 g $I_2/100g$) a été observé pour le biodiesel préparé à partir de l'huile de Tk, suivi de Tn (55,48 g $I_2/100g$), de Tg (54,27g $I_2/100g$) et de Hm (53,54 g $I_2/100g$). L' I_I est une mesure de l'insaturation, une insaturation plus élevée entraînant un I_I plus élevé et vice versa. Ainsi, le biodiesel Tk a donné un I_I plus élevé car il contenait le pourcentage le plus élevé des acides gras insaturés (55,11 % ; Tableau 08). En effet, la présence d'acide linoléique augmente l'instabilité du biodiesel et détériore donc la qualité du biocarburant, car ses deux doubles liaisons sont facilement oxydables.

e)- Indice de saponification I_s

L'indice de saponification I_s est une mesure de la teneur en liaisons esters. Il est déterminé par titrage à rebours de l'oxyde de potassium en présence de l'indicateur phénolphtaléine avec de l'acide sulfurique ou chlorhydrique 0,5 N.

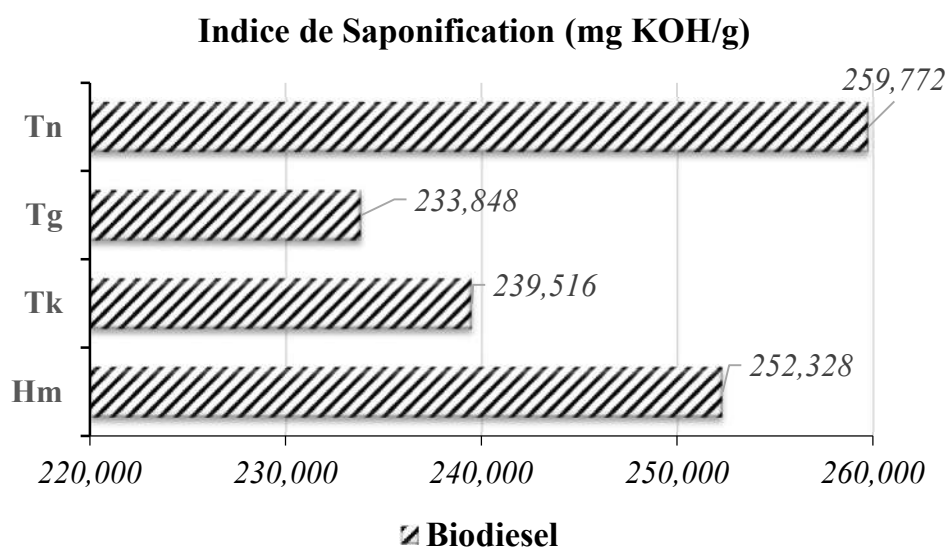


Figure 53 : Valeurs des indices de saponification de biodiesel d'Hm, Tk, Tg et Tn.

Dans cette étude, les valeurs de I_S des biodiesels synthétisés Hm, Tk, Tg et Tn situent de 233,85 à 259,77 mg KOH/g (Figure 53), alors que celle des noyaux : de canola était de 193,55 mg KOH/g [59], de tournesol était de 175 mg KOH/g [60] et de moringa était de 190,9 mg KOH/g [61]. I_S est lié au poids moléculaire moyen de l'échantillon, mais les acides présents dans les huiles extraites à partir des noyaux de variétés Hm, Tk, Tg et Tn ou dans leurs biodiesels synthétisés sont presque les mêmes. Seul le changement du glycérol par le méthanol est produit.

f)- Acidité libre & l'Indice d'acide, I_A

Une autre propriété du biodiesel qui joue un rôle important dans la corrosion des pièces internes des moteurs diesel, est l'indice d'acide I_A . La norme ASTM considère une loi stricte pour l'indice d'acide. Selon la norme ASTM D6751, I_A d'un nouveau biodiesel ne doit pas dépasser 0,5 mg KOH/g.

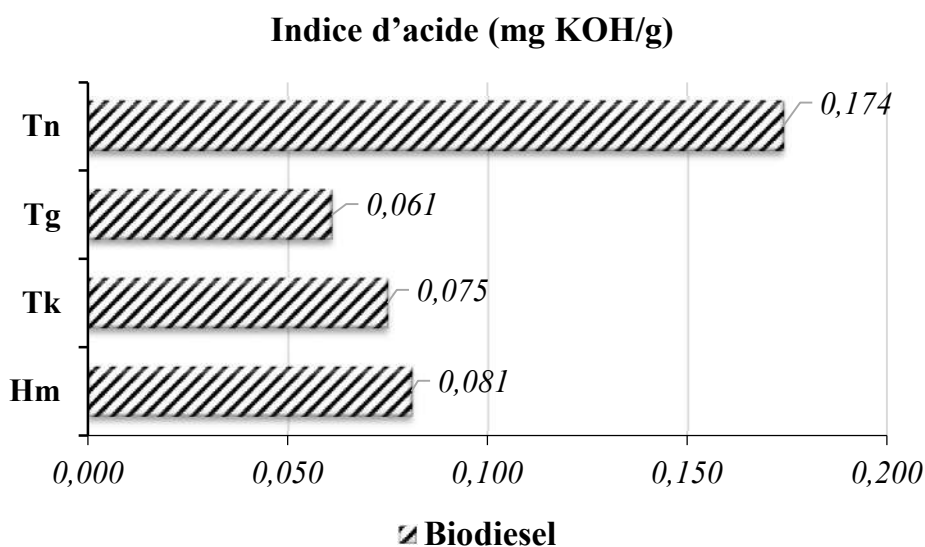


Figure 54 : Valeurs des indices d'aide de biodiesel d'Hm, Tk, Tg et Tn.

Selon le résultat de la présente étude, les valeurs d' I_A des biodiesels provenant des huiles végétales Hm, Tk, Tg et Tn varient entre 0,061 et 0,174 mg KOH/g (Figure 54). Donc, ces indices d'acides sont appropriés pour une nouvelle ressource de biodiesel. En réalité, cette valeur est normalement extrêmement faible pour le biodiesel catalysé par une base, car la majeure partie des acides gras libres a probablement été neutralisée par le catalyseur. Ces valeurs de I_A trouvées

sont évaluées bonnes par rapport aux celle de *Jatropha cucuras* (2,2 mg KOH/g) [62], de *Moringa olifera* (0,26 mg KOH/g) [63] et de *Ricinus communis* (0,63 mg KOH/g) [64–65]. Ces dernières valeurs dépassent celui du diesel (0,12 mg KOH/g).

Les acides gras libres AGL sont les acides qui ne sont pas présents sous forme de triglycérides (graisses) dans le biodiesel. Dans la réaction de saponification, les triglycérides s'hydrolysent pour donner des acides gras qui réagissent avec l'alcali pour former du savon, tandis que les AG réagissent directement avec la base lors des expériences visant à déterminer l'indice d'acide I_A. Le poids des AGL présents dans le biodiesel divisé par le poids total du biodiesel donne le pourcentage d'AGL (Acidité, %) [66].

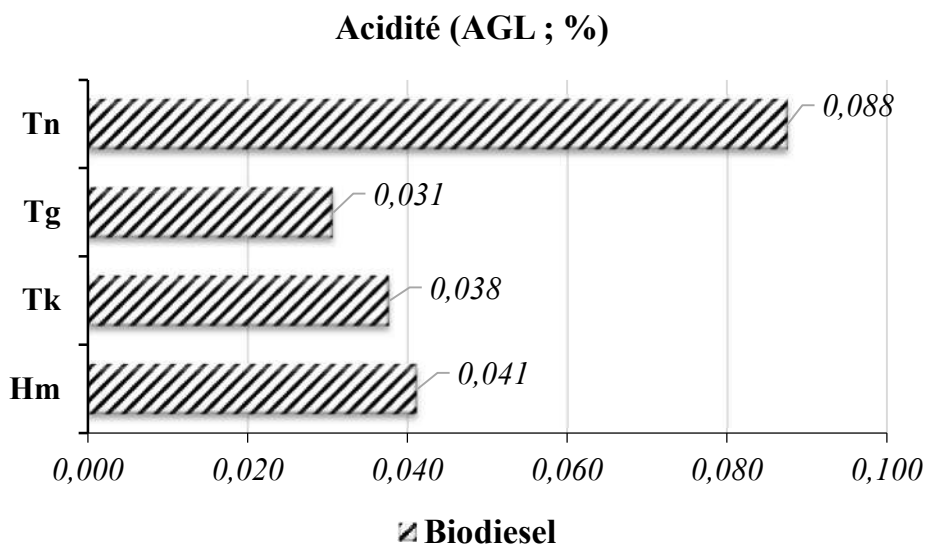


Figure 55 : Valeurs de l'acidité % de biodiesel d'Hm, Tk, Tg et Tn.

Dans cette étude, les valeurs de l'acidité libre de biodiesels Hm, Tk, Tg et Tn variaient entre 0,031 et 0,088 % oléique (Figure 55).

g)- Indice de cétane, I_C

L'indice de cétane I_C est l'un des paramètres les plus importants pour caractériser un biodiesel. En effet, un indice de cétane plus élevé signifie que le carburant est plus rapidement inflammable [67].

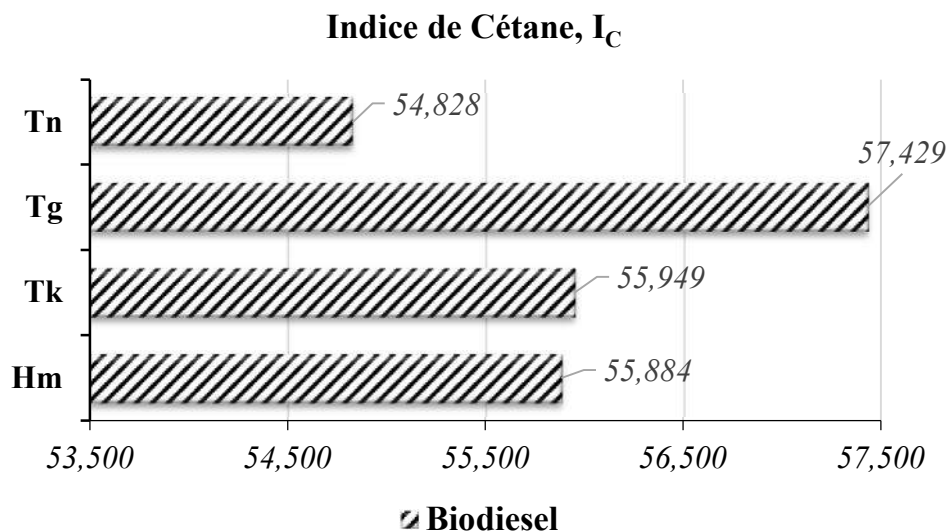


Figure 56 : Valeurs des indices de cétane de biodiesel d'Hm, Tk, Tg et Tn.

Nous pouvons constater, à partir des résultats dans la figure 56, que les biodiesels issus des huiles extraites sont conformes aux normes internationales (ASTM D6751 et EN 14214). Les valeurs de l' I_C sont comprises entre 56 et 58 (Figure 50), ce qui leur confère un délai d'inflammation très court. Ces mêmes résultats ont été rapportés par İlkılıç *et al.* 2015 (*Pistacia Terebinthus* ; $I_C= 55$) [68] et Madiwale et Bhojwani, 2016 (Arachide ; $I_C= 54$) [69].

h)- Pouvoir Calorifique Supérieur, PCS

L'une des caractéristiques les plus importantes d'un carburant est son pouvoir calorifique supérieur PCS, il caractérise le contenu énergétique du carburant [40].

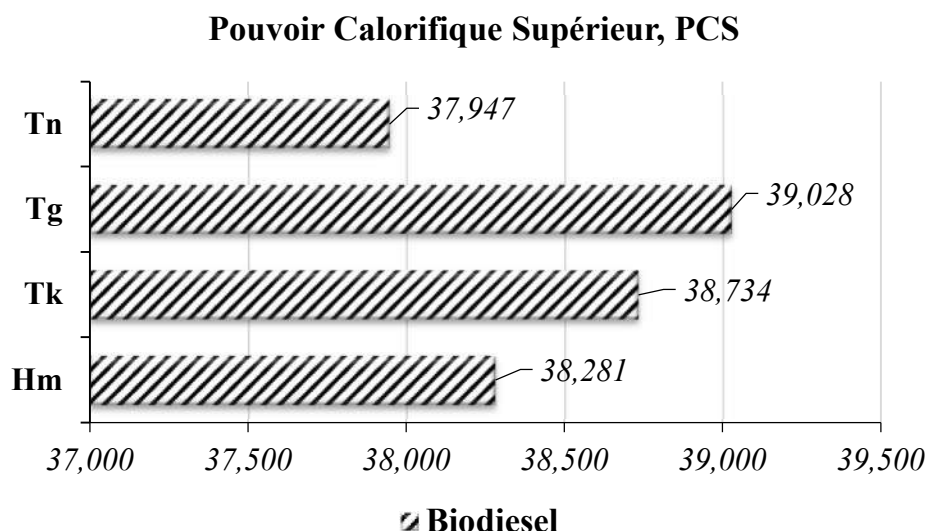


Figure 57 : Valeurs des pouvoirs calorifiques supérieurs de biodiesels d’Hm, Tk, Tg et Tn.

Les valeurs calculées de PCS (37,947–39,028 MJ/kg) d’Hm, Tk, Tg et Tn (Figure 57) dans cette étude, étaient dans les normes internationales (35 MJ/kg *min*, ASTM D6751 et 36 MJ/kg *min*, EN 14214), et sont relativement élevés. Le PCS calculé pour le biodiesel obtenu à partir du cultivar Tg est le plus élevé (39,028 MJ/kg). Les PCS obtenus dans cette étude sont similaires aux biodiesels obtenus à partir d’huile de palme (37,20–40,69 MJ/kg), de soja (37,30–39,66 MJ/kg), de tournesol (37,50–39,95 MJ/kg) et de colza (37,30–39,90 MJ/kg) [1, 70–71]. Les valeurs de PCS de Hm, Tk, Tg et Tn sont considérablement inférieures à celui du diesel (49,65 MJ/kg).

IV.2.6- Analyses Spectroscopiques FTIR.

La méthode FTIR a été employée pour caractériser le biodiesel dans la réaction de transestérification des huiles d’Hm, Tk, Tg et Tn. Les échantillons ont été analysés par infrarouge dans la région s’étendant de 400 à 4000 cm^{-1} , couvrant les bandes d’absorption caractéristiques du biodiesel (Figure 58).

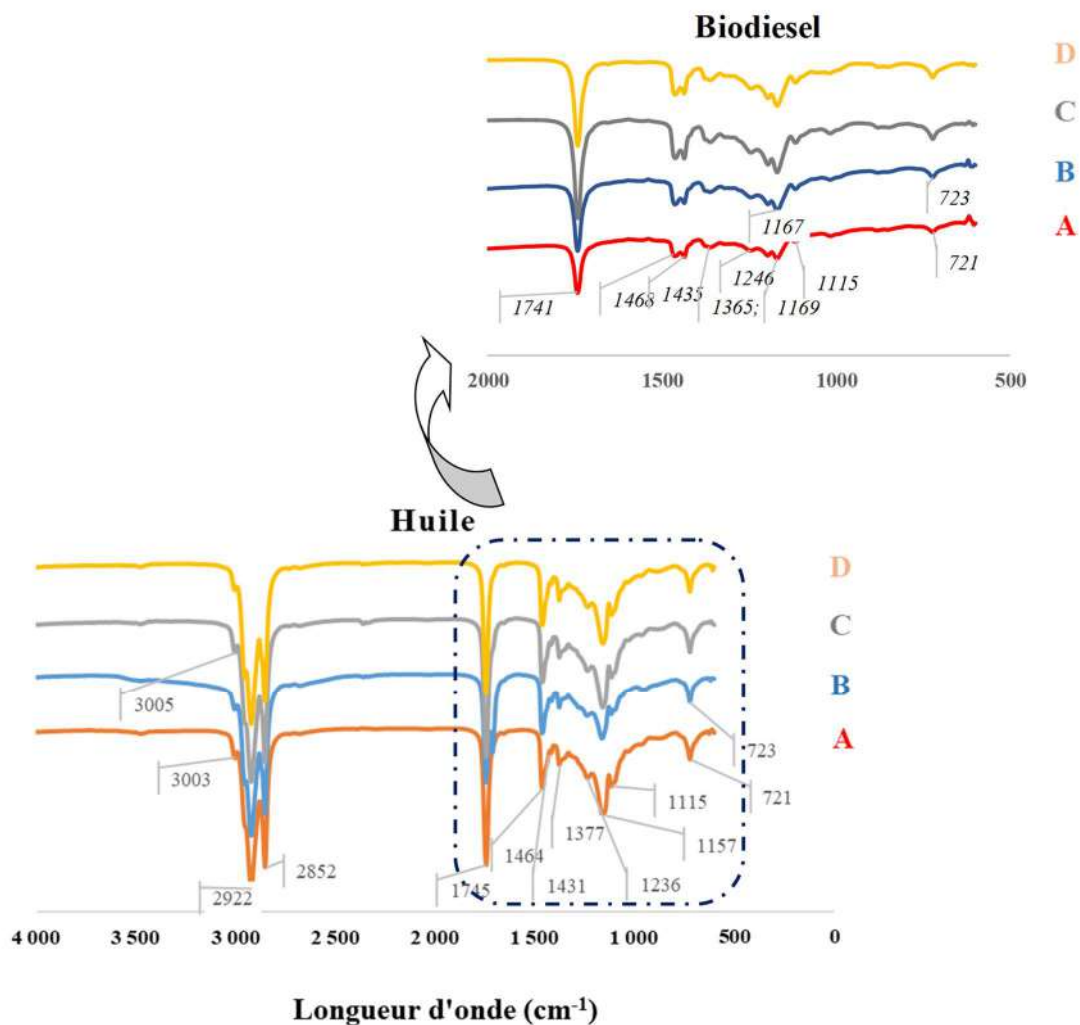


Figure 58 : Spectre FTIR des biodiesels : A: H'mira (Hm), B: Takerbouchet (Tk), C: Teggaza (Tg) and D: Tinaceur (Tn).

Des différences assez subtiles peuvent être observées entre les spectres, puisque le produit du procédé de transestérification (EMAG) est chimiquement similaire à son précurseur (Huile extraite). Dans la région de $1800\text{-}1700\text{ cm}^{-1}$, on peut observer des pics qui peuvent être attribués à la vibration d'élongation de $\text{C}=\text{O}$, typique des esters, et qui sont donc communs aux spectres des huiles et des biodiesels Hm, Tk, Tg et Tn. Lors de la formation de l'EMAG, une chaîne alkyle est remplacée par un groupe méthyle, ce qui entraîne un déplacement de la bande $\text{C}=\text{O}$ de 1745 cm^{-1} dans l'huile à 1741 cm^{-1} dans le biodiesel.

La principale région du spectre qui permet la discrimination chimique entre les huiles extraites et ses EMAG respectifs se situe dans la plage $1500\text{-}900$

cm^{-1} , connue sous le nom de région "empreinte". Le pic à 1435 cm^{-1} correspond à la vibration de déformation asymétrique de $-\text{CH}_3$ présent dans le spectre du biodiesel et absent dans le spectre de l'huile extraite. Le pic à 1377 cm^{-1} est attribué au groupe glycérol $\text{O}-\text{CH}_2$ (mono-, di- et triglycérides), qui est présent dans le spectre des huiles extraites et il est plus faible ou absent dans le spectre des biodiesels. Quant aux vibrations d'élongation asymétrique et symétrique de la liaison $\text{C}-\text{O}$, représentées par l'absorbance observée à environ $1230-1170 \text{ cm}^{-1}$ et 1115 cm^{-1} respectivement, ont une intensité moins importante que celle dans les spectres des huiles Hm, Tk, Tg et Tn.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]– Fadhil, A.B., Alhayali, M.A., and Saeed, L.I. Date (*Phoenix dactylifera* L.) Palm Stones as a Potential New Feedstock for Liquid Bio-fuels Production. *Fuel*, **2017**, *210*, 165–176.
- [2]– Nehdi, I., Omri, S., Khalil, M.I., and Al-Resayes, S.I. Characteristics and Chemical Composition of Date Palm (*Phoenix canariensis*) Seeds and Seed Oil. *Industrial Crops and Products*, **2010**, *32(3)*, 360–365.
- [3]– Nehdi, I.A., Sbihi, H.M., Tan, C.P., Rashid, U., and Al-Resayes, S.I. Chemical Composition of Date Palm (*Phoenix dactylifera* L.) Seed Oil from Six Saudi Arabian Cultivars. *Journal of Food Science*, **2018**, *83(3)*, 624–630.
- [4]– Laghouiter, O.K., Benalia, M., Gourine, N., Djeridane, A., Bombarda, I., and Yousfi, M. Chemical Characterization and *in vitro* Antioxidant Capacity of Nine Algerian Date Palm Cultivars (*Phoenix dactylifera* L.) Seed Oil. *Mediterranean Journal of Nutrition and Metabolism*, **2018**, *11(2)*, 103–117.
- [5]– Rohman, A., and Man, Y.B.C. Fourier Transformed Infrared (FTIR) Spectroscopy for Analysis of Extra Virgin Olive Oil Adulterated with Palm Oil. *Food Research International*, **2010**, *43(3)*, 886–892.
- [6]– Ben-Youssef, S., Fakhfakh, J., Breil, C., Abert-Vian, M., Chemat, F., & Allouche, N. Green Extraction Procedures of Lipids from Tunisian Date Palm Seeds. *Industrial Crops and Products*, **2017**, *108*, 520–525.
- [7]– Astrup, A., Magkos, F., Bier, D.M., Brenna, J.T., de Oliveira Otto, M.C., Hill, J.O., King, J.C., Mente, A., Ordovas, J.M., Volek, J.S., Yusuf, S., Krauss, R.M. Saturated Fats and Health: A Reassessment and Proposal for Food-Based Recommendations: JACC State-of-the-Art Review. *J. Am. Coll. Cardiol.* **2020**, *76(7)*, 844-857.
- [8]– Bi, X., Siow, P.C., Lim, S.W., Henry, C.J. Dietary Fatty Acids Analysis and its Relevance to Human Health. *SMJ Nutr Metab*, **2015**, *1(1)*, 1005.
- [9]– Krisnangkura, K. A Simple Method for Estimation of Cetane Index of Vegetable Oil Methyl Esters. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, **1986**, *63*, 552–553.
- [10]– Demirbas, A. Relationships Derived from Physical Properties of Vegetable Oil and Biodiesel Fuels. *Fuel*, **2008**, *87(8-9)*, 1743–1748.

- [11]– Mancini, M., Lanza-Volpe, M., Gatti, B., Malik, Y., Moreno, A.C., Leskovar, D., and Cravero, V. Characterization of Cardoon Accessions as Feedstock for Biodiesel Production. *Fuel*, **2019**, *235*, 1287–1293.
- [12]– Veny, H., Baroutian, S., Aroua, M. K., Hasan, M., Raman, A.A., and Sulaiman, N.M.N. Density of *Jatropha curcas* Seed Oil and its Methyl Esters: Measurement and Estimations. *International Journal of Thermophysics*, **2009**, *30(2)*, 529–541.
- [13]– Constantino, A.F., Cubides-Román, D.C., dos Santos, R.B., Queiroz, L.H.K., Colnago, L.A., Neto, Á.C., Barbosa, L.L., Romao, W., de Castro, E.V.R., Filgueiras, P.R., and Lacerda, V. Determination of Physicochemical Properties of Biodiesel and Blends Using Low-field NMR and Multivariate Calibration. *Fuel*, **2019**, *237*, 745–752.
- [14]– Davis, J.P., Sweigart, D.S., Price, K.M., Dean, L.L., and Sanders, T.H. Refractive Index and Density Measurements of Peanut Oil for Determining Oleic and Linoleic Acid Contents. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, **2012**, *90(2)*, 199–206.
- [15]– Anwar, F., Kamal, G.M., Nadeem, F., and Shabir, G. Variations of Quality Characteristics among Oils of Different Soybean Varieties. *Journal of King Saud University - Science*, **2016**, *28(4)*, 332–338.
- [16]– Saxena, R.B. Random Estimate the Values of Seed Oil of *Cucurbita maxima* by Refractive Index Method. *Ayu*, **2010**, *31(1)*, 12–14.
- [17]– Boukouada, M., Ghaiba, Z., Gourine, N., Bombarda, I., Saidi, M., and Yousfi, M. Chemical composition and Antioxidant Activity of Seed Oil of Two Algerian Date Palm Cultivars (*Phoenix dactylifera*). *Natural Product Communication*, 2014, *9(12)*, 1777–1780.
- [18]– Japir, A.A.W., Salimon, J., Derawi, D., Bahadi, M., Al-Shuja'a, S., & Yusop, M.R. Physicochemical Characteristics of High Free Fatty Acid Crude Palm Oil. *OCL*, 2017, *24(5)*, D506.
- [19]– Zhang, Z., Xie, Q., and Che, L. Effects of Gamma Irradiation on Aflatoxin B1 Levels in Soybean and on the Properties of Soybean and Soybean Oil. *Applied Radiation and Isotopes*, **2018**, *139*, 224–230.
- [20]– Oladipo, B., and Betiku, E. Process Optimization of Solvent Extraction of Seed Oil from *Moringa oleifera*: An Appraisal of Quantitative and Qualitative Process Variables on Oil Quality Using D-optimal Design. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, **2019**, *20*, 101187.
- [21]– Amin, M. Z., Islam, T., Mostofa, F., Uddin, M. J., Rahman, M. M., and Satter, M. A. Comparative Assessment of the Physicochemical and

- Biochemical Properties of Native and Hybrid Varieties of Pumpkin Seed and Seed Oil (*Cucurbita maxima* Linn.). *Heliyon*, **2019**, *5*(12), e02994.
- [22]– Li, H., Liu, J., He, X., Liu, S. Characteristic the Volatiles Compounds of Fractionation Beef Tallow by Gas Chromatography-ion Mobility Spectrometry. *Food Science and Technology, Campinas*, **2022**, *42*, e58922.
- [23]– Bart, J.C.J., Palmeri, N., and Cavallaro, S. *Emerging New Energy Crops for Biodiesel Production*. In: Bart, J.C.J., Palmeri, N., and Cavallaro, S. (eds.) *Biodiesel Science and Technology*, Woodhead Publishing, **2010**, p: 226–284.
- [24]– Ibeto, C.N., Ofoefule, A.U., and Ezeugwu, H.C. Fuel Quality Assessment of Biodiesel from Groundnut Oil (*Arachis hypogea*) and its Blend with Petroleum Diesel. *American Journal of Food Technology*, **2011**, *6*(9), 798–803.
- [25]– Akbar, E., Yaakob, Z., Kamarudin, S.K., Ismail, M., and Salimon, J. Characteristic and Composition of *Jatropha Curcas* Oil Seed from Malaysia and its Potential as Biodiesel Feedstock Feedstock. *European Journal of Scientific Research*, **2009**, *29*(3), 396–403.
- [26]– Joshi, A., Singhal, P., and Bachheti, R.K. Physicochemical Characterization of Seed Oil of *Jatropha Curcas* L. Collected from Dehradun (Uttarakhand) India. *International Journal of Applied Biology and Pharmaceutical Technology*, **2011**, *2*(2), 123–127.
- [27]– Salimon, J., and Abdullahi, R. Physicochemical Properties of Malaysian *Jatropha Curcas* Seed Oil. *Sains Malaysiana*, **2008**, *37*(4), 379–382.
- [28]– Akminul Islam, A.K.M., Primandari, S.R.P., Yaakob, Z., Anuar, N., and Osman, M. The Properties of *Jatropha Curcas* Seed Oil from Seven Different Countries. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, **2013**, *35*(18), 1698–1703.
- [29]– Kumari, R., Mallavarapu, G.R., Jain, V.K., and Kumar, S. Corresponding Properties of Fatty Oils of *Cleome viscosa* and *Jatropha curcas* as Resources of Biodiesel. *Agricultural Research*, **2013**, *2*(4), 393–399.
- [30]– Ogunsina, B.S., Indira, T.N., Bhatnagar, A.S., Radha, C., Debnath, S., and Gopala Krishna, A.G. Quality Characteristics and Stability of *Moringa oleifera* Seed Oil of Indian Origin. *Journal of Food Science and Technology*, **2011**, *51*(3), 503–510.
- [31]– Rekha, G., and Leema Rose, A. Physicochemical Properties of *Moringa oleifera* Seed Oil. *International Journal of Advanced Engineering research and Technology*, **2017**, *5*(10), 709–714.

- [32]– Aly, A.A., Maraie, R.W., and Ali, H.G.M. Fatty Acids Profile and Chemical Composition of Egyptian *Moringa oleifera* Seed Oils. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, **2016**, *93*(3), 397–404.
- [33]– Da Silva Oliveira, W., Neves, D.A., and Ballus, C.A. *Mature Chemical Analysis Methods for Food Chemical Properties Evaluation*. In: Zhong, J., and Wang, X. (eds.) *Evaluation Technologies for Food Quality*. Woodhead Publishing, **2019**, p: 63–90.
- [34]– Ghazani, S.M., and Marangoni, A.G. Minor Components in Canola Oil and Effects of Refining on These Constituents: A Review. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, **2013**, *90*(7), 923–932.
- [35]– Osawa, C.C., Gonçalves, L.A.G., and Ragazzi, S. Correlation between Free Fatty Acids of Vegetable Oils Evaluated by Rapid Tests and by the Official Method. *Journal of Food Composition and Analysis*, **2007**, *20*(6), 523–528.
- [36]– Gotor, A.A., and Rhazi, L. Effects of Refining Process on Sunflower Oil Minor Components: a Review. *OCL*, **2016**, *23*(2), D207.
- [37]– Amoo, I.A. Effect of roasting on the Chemical Composition of Coconut (*Cocos nucifera*) Seed Flour and Oil. *J Food Agri Environ*, **2004**, *2*, 18–20.
- [38]– Suwanno, S., Rakkan, T., Yunu, T., Paichid, N., Kimtun, P., Prasertsan, P., and Sangkharak, K. The Production of Biodiesel Using Residual Oil from Palm Oil Mill Effluent and Crude Lipase from Oil Palm Fruit as an Alternative Substrate and Catalyst. *Fuel*, **2017**, *195*, 82–87.
- [39]– Najafi, B. Abbasi Fakhr, M and Jamali, S. Prediction of Heat Value of Vegetable Oil-Based Ethyl Esters Biodiesel Using Artificial Neural Network. *Journal of Agricultural Machinery Science*, **2011**, *7*(4), 361–366.
- [40]– Fassinou, W.F. Higher Heating Value (HHV) of Vegetable Oils, Fats and Biodiesels Evaluation Based on their Pure Fatty Acids' HHV. *Energy*, **2012**, *45*(1), 798–805.
- [41]– Socrates, G. (eds.) *Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies*. John Wiley and Sons, **2001**, p: 133.
- [42]– Yang, X., Zhang, D., Song, L., Xu, Q., Li, H., and Xu, H. Chemical Profile and Antioxidant Activity of the Oil from Peony Seeds (*Paeonia suffruticosa* Andr.). *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, **2017**, *2017*, 1–11.

- [43]– Fadzlina, A., Rosnah, I., Razmah, G. et Zainab, I. Total Phenolic Contents and Antioxidant Activity of Palm Oils and Palm Kernel Oils at Various Refining Processes. *Journal of Oil Palm Research*, **2018**, *30* (4), 682–692.
- [44]– Bose, R., Bhattacharya, E., Pramanik, A., Hughes, T. A., and Biswas, S. M. Potential Oil Resources from Underutilized Seeds of *Sterculia foetida*, L.-Quality Assessment and Chemical Profiling with Other Edible Vegetable oils based on Fatty Acid Composition, Oxidative Stability, Antioxidant Activity and Cytotoxicity. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, **2021**, *33*, 102002.
- [45]– Sunhee, H., Mijin, K., Chanh, O., Sukhoo, Y., and Yeongok, S. Antiradical Capacities of *Perilla*, Sesame and Sunflower Oil. *J. Food Sci. Nutr.*, **2010**, *15*, 51–56.
- [46]– Lam, M.K., Jamalluddin, N.A., & Lee, K.T. *Production of Biodiesel Using Palm Oil*. In: Pandey, A., Larroche, C., Dussap, C.-G., Gnansounou, E., Khanal, S.K., & Ricke, S. (eds.) *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels*, Academic Press, **2019**, pp: 539–574.
- [47]– Vicente, G., Martínez, M., and Aracil, J. A Comparative Study of Vegetable Oils for Biodiesel Production in Spain. *Energy and Fuels*, **2006**, *20*(1), 394–398.
- [48]– Jibril, Z.I.; Ramli, A.; Jumbri, K.; Mohamad Yunus, N. *Phoenix dactylifera* L. Seed Pretreatment for Oil Extraction and Optimization Studies for Biodiesel Production Using Ce-Zr/Al-MCM-41 Catalyst. *Catalysts*, **2020**, *10*, 764.
- [49]– Jamil, F., Al-Muhtaseb, A., Myint, M.T.Z., Al-Hinai, M., Al-Haj, L., Baawain, M., Al-Abri, M., Kumar, G and Atabani, A.E. Biodiesel Production by Valorizing Waste *Phoenix dactylifera* L. Kernel Oil in the Presence of Synthesized Heterogeneous Metallic Oxide Catalyst (Mn@MgO-ZrO₂). *Energy Conversion and Management*, **2018**, *155*, 128–137.
- [50]– Farooq, M., Ramli, A., Naem, A., Mahmood, T., Ahmad, S., Humayun, M., & Islam, M. G. U. Biodiesel Production from Date Seed Oil (*Phoenix dactylifera* L.) Via Eggshell Derived Heterogeneous Catalyst. *Chemical Engineering Research and Design*, **2018**, *132*, 644–651.
- [51]– Hoseini, S.S., Najafi, G., Moazzez, A.F., Hazrati, S., Ebadi, M.T., and Yusaf, T. Potential of *Chrozophora tinctoria* Seed Oil as a Biodiesel Resource. *Applied Sciences*, **2020**, *10*(10), 3473.

- [52]– Mushtaq, A.; Hanif, M.A.; Zahid, M.; Rashid, U.; Mushtaq, Z.; Zubair, M.; Moser, B.R.; Alharthi, F.A. Production and Evaluation of Fractionated Tamarind Seed Oil Methyl Esters as a New Source of Biodiesel. *Energies* **2021**, *14*, 7148.
- [53]– Speight, J.G. *Production, Properties and Environmental Impact of Hydrocarbon Fuel Conversion*. In: Khan, M.R. (eds.) *Advances in Clean Hydrocarbon Fuel Processing*, Woodhead Publishing, **2011**, pp: 54–82.
- [54]– Esmaeili, H., Yeganeh, G., and Esmaeilzadeh, F. Optimization of Biodiesel Production from *Moringa oleifera* Seeds Oil in the Presence of nano-MgO Using Taguchi Method. *International Nano Letters*, **2019**, *9*, 257–263.
- [55]– Encinar, J., Pardal, A., Sánchez, N., and Nogales, S. Biodiesel by Transesterification of Rapeseed Oil Using Ultrasound: A Kinetic Study of Base-Catalysed Reactions. *Energies*, **2018**, *11(9)*, 2229.
- [56]– El-Araby, R., Amin, A., El Morsi, A.K., El-Ibiari, N.N., and El-Diwani, G.I. Study on the characteristics of palm oil–biodiesel–diesel fuel blend. *Egyptian Journal of Petroleum*, **2018**, *27(2)*, 187–194.
- [57]– Santoso, A., Sumari, Sukarianingsih, D., and Sari, R.M. Optimization of Synthesis of Biodiesel from *Jatropha curcas* L. with Heterogeneous Catalyst of CaO and MgO by Transesterification Reaction Using Microwave. *Journal of Physics: Conference Series*, **2018**, *1093*, 012047.
- [58]– Gouveia, L., Oliveira, A.C., Congestri, R., Bruno, L., Soares, A.T., Menezes, R.S., Filho, N.R.A., Tzovenis, I. *Biodiesel from Microalgae*. In: Gonzalez-Fernandez, C., and Muñoz, R. (eds.) *Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts*, Woodhead Publishing, **2017**, pp: 235–258.
- [59]– Issariyakul, T., Kulkarni, M.G., Meher, L.C., Dalai, A.K., and Bakhshi, N.N. Biodiesel Production from Mixtures of Canola Oil and Used Cooking Oil. *Chemical Engineering Journal*, **2008**, *140(1-3)*, 77–85.
- [60]– Perveen, S., Hanif, M.A., Nadeem, R., Rashid, U., Azeem, M.W., Zubair, M., Nisar, N., Alharthi, F.A., and Moser, B.R. A Novel Route of Mixed Catalysis for Production of Fatty Acid Methyl Esters from Potential Seed Oil Sources. *Catalysts*, **2021**, *11(7)*, 811.
- [61]– Dominguez, Y.D., Garcia, D.T., Pérez L.G., Fernandez-Santana, E., Macias, M.R., Fischer, T., and Piloto-Rodriguez, R. Rheological Behavior and Properties of Biodiesel and Vegetable Oil from *Moringa oleifera* Lam. *Afinidad*, **2019**, *76(587)*, 83–89.
- [62]– Malvade, A.V., and Satpute, S.T. Production of Palm Fatty Acid Distillate Biodiesel and Effects of its Blends on Performance of Single Cylinder Diesel Engine. *Procedia Engineering*, **2013**, *64*, 1485–1494.

- [63]– Oyinade, A.T., and Damilare, A.S. Production and Characterization of Biodiesel from *Moringa olifera* Seed Oil Using Alkaline Catalyst. *International Journal of Innovation Science and Research Technology*, **2020**, 5(2), 1078–1092.
- [64]– Keera, S.T., El Sabagh, S.M., and Taman, A.R. Castor Oil Biodiesel Production and Optimization. *Egyptian Journal of Petroleum*, **2018**, 27(4), 979–989.
- [65]– Osorio-González, C.S., Gómez-Falcon, N., Sandoval-Salas, F., Saini, R., Brar, S.K., and Ramírez, A.A. Production of Biodiesel from Castor Oil: A Review. *Energies*, **2020**, 13(10), 2467.
- [66]– Thangarasu, V., and Anand, R. *Physicochemical Fuel Properties and Tribological Behavior of Aegle marmelos correa Biodiesel*. In: Azad, K. (eds.) *Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment*, Woodhead Publishing, **2019**, pp: 309–336.
- [67]– Geacai, S., Nita, I., Iulian, O., and Geacai, E. Refractive Indices for Biodiesel Mixtures. *U.P.B. Sci. Bull., Series B*, **2012**, 74(4), 149–160.
- [68]– İlkılıç, C., Çilgin, E., and Aydın, H. Terebinth Oil for Biodiesel Production and its Diesel Engine Application. *J. Energy Inst.*, **2015**, 88(3), 292–303.
- [69]– Madiwale, S., and Bhojwani, V. An Overview on Production, Properties, Performance and Emission Analysis of Blends of Biodiesel. *Procedia Technol*, **2016**, 25, 963–973.
- [70]– Zahan, K., and Kano, M. Biodiesel Production from Palm Oil, its By-products, and Mill Effluent: A Review. *Energies*, **2018**, 11(8), 2132.
- [71]– Herch, W., Kallel, H., & Boukhchina, S. Physicochemical Properties and Antioxidant Activity of Tunisian Date Palm (*Phoenix dactylifera* L.) Oil as Affected by Different Extraction Methods. *Food Science and Technology*, **2014**, 34(3), 464–470.

Conclusion

CONCLUSION

Ces dernières années, le biodiesel est devenu plus attrayant en tant que carburant alternatif pour les moteurs diesel à divers égards, en raison de ses avantages environnementaux et du fait qu'il est produit à partir de ressources locales renouvelables, et insuffisamment exploitées telles que les noyaux de dattes, les huiles de cuisson...etc. Plusieurs méthodes sont disponibles pour produire du biodiesel, la transestérification d'huiles et de graisses naturelles étant actuellement la méthode de choix, en évitant ainsi le rejet de ces sous-produits dans l'environnement en tant que déchets.

Dans ce contexte, notre étude est particulièrement focalisée surtout vers la Valorisation des Huiles et les Sous-produits du Palmier Dattier dans la Région d'Adrar, en tant que huiles végétales et biodiesels, et qui s'intègre dans l'un des axes de recherche développé dans le Laboratoire des Ressources Naturelles Sahariennes (LRNS), en collaboration avec le Laboratoire de l'Energie, de l'Environnement et des Systèmes d'Information (LEESI), à l'Université Ahmed Draïa Adrar. Dans ce présent travail, des huiles ont été extraites à partir des noyaux de quatre cultivars du palmier dattier *P. dactylifera* L., H'mira, Takerbouchet, Teggaza et Tinaceur; provenant de la région d'Adrar, et un biodiesel a été synthétisé à partir de chaque huile.

La première partie porte sur l'extraction des huiles. Cette partie nous a permis de donner un aperçu sur la méthode d'extraction au Soxhlet la plus économique, utilisée dans la préparation de ces huiles. Quatre huiles ont été extraites à partir des noyaux de dattes Hm, Tk, Tg et Tn avec des rendements variants entre 8 et 11 %, en utilisant l'hexane comme solvant.

Dans ce travail, les quatre huiles extraites sont caractérisées, quantifiées et identifiées par l'analyse spectroscopique FTIR et chromatographie CG-FID. Nous avons trouvé que les taux d'acides gras saturés (43,09–46,21%) sont inférieurs aux taux d'acides gras insaturés (52,41–55,58%), ce qui donne une

valeur ajoutée à ces huiles extraites des cultivars H'mira, Takerbouchet, Teggaza et Tinaceur, qui sont considérées comme des déchets non valorisables, et la possibilité de leur valorisation comme biodiesel par le procédé de transestérification.

Dans cette étude, Les analyses physicochimiques nous a montré que le taux des acides gras insaturés trouvé, a été confirmé par les valeurs élevées de la densité (0,9117–0,9176 g/cm³), de l'indice de réfraction (1,4596–1,4623) et de l'indice de saponification (230,1–254,83 mg KOH/g). Les valeurs de l'acidité libre (0,383–1,076 %) trouvées dans notre travail, relèvent que ces huiles ont une valeur nutritionnelle.

Dans la deuxième partie, nous avons procédé à la synthèse de biodiesel à partir des huiles Hm, Tk, Tg et Tn. Ces produits d'esters méthyliques sont obtenus avec de très bons rendements qui varient entre 89–94 % par une réaction de transestérification catalytique entre l'huile et le méthanol, dans des conditions de réaction optimale, avec un ratio molaire CH₃OH/ huile 3:1 pendant 90 min, en utilisant le KOH comme catalyseur.

Les ester méthyliques d'acide gras obtenus ont été testé pour ses propriétés de carburant et était en bon accord avec le biodiesel standard, selon les normes internationales ASTM D6751 et EN 14214. Leur qualité rivalise avec les biodiesels produits à partir des huiles communes (palmes, soja, jatropha, etc.), compte tenu de leurs propriétés physicochimiques.

Enfin, nous concluons que du point de vue de la stratégie environnementale, cette thèse est très intéressante en raison de la réduction des déchets des palmiers dattiers, qui sont valorisés comme sources d'énergie bon marché et plus respectueuses de l'environnement.

Nous pouvons dire que, l'objectif de ce travail de recherche a été atteint. Cette thèse ouvre d'énormes perspectives de recherche à savoir :

- Les essais de performances énergétiques et environnementales en laboratoire de l'huile et le biodiesel produit à partir de noyaux de variétés

de dattes H'mira, Takerbouchet, Teggaza et Tinaceur, comme pour la production de l'électricité, etc. ;

- Les essais de l'utilisation de ces biodiesels en état pur B100, ou en mélange avec le pétrodiesel (B20, B50, etc.), dans les moteurs diesel.
- L'étude de valorisation de ces déchets du palmier dattier en tant qu'aliment pour le bétail ou en tant que fertilisants organiques ;
- L'étude des performances d'autres noyaux non comestibles des autres variétés endémiques de la région d'Adrar, comme Tinakour, Deglat Talmine et Aghamou, pour ensuite faire des comparaisons avec celles des variétés utilisées dans ce travail ;