

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



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Science de la Nature et de la Vie

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master en :
Filière : Sciences Agronomique
Spécialité : Systèmes de Production Agro-écologique

Thème:

Évaluation des Techniques de Préparation des Sous-Produits des Palmiers Dattiers et Détermination de leur Rendement de Production de bioéthanol

Préparé par :

Mlle. AKRIMI Nouha

Mr. LAROUI Youcef

Membres de jury d'évaluation :

M^{me}.	RAHMANI Saliha	Président	MAA	Univ. Adrar
Mr.	ABEKHTI Abdelkader	Encadreur	MCA	Univ. Adrar
Mr.	BOULAL Ahmed	Examineur	MCA	Univ. Adrar

Année Universitaire : 2019/2020



REMERCIEMENT

Tout d'abords je rends grâce à **Allah** de m'avoir donné la vie, la force nécessaire pour réaliser ce travail. Nous tenons à remercier ici toutes les personnes nous ayant aidé de près ou de loin.

Nos remerciements particuliers à notre promoteur, **Mr Abekhti Abdelkader**. Merci pour votre confiance et votre patience, le soutien et les conseils qu'il nous prodigué tout au long de ce parcours de recherche. Nos remerciements vont aussi à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, en particulier :

Nous exprimons notre profonde gratitude et notre plus vifs remerciements à **Madame Rahmani Saliha** et **Monsieur Boulal Ahmed**, qui nous avons l'honneur d'accepter d'être examinateurs de ce travail.

Un remerciement particulier à **MR. Mekki Khelifa** et à **MR. Sidamar**, pour ses aides précieuses.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à tous **les enseignants** d'université Ahmed Draya Adrar département de SNV sans exception.

Merci à tous.





DEDICACE

Je dédier ce modeste travail à tous ceux qui nous ont inondés de courage d'estime et de patience, et pour ceux qui ont cru en nous et pour ceux qu'on porte envers nous un grand amour et sincère reconnaissance.

À Ma chère maman Aïcha et mes chères tantes Latifa, Fatima et Zohra, vous représentez pour moi le symbole de bonté par excellence, la source de ma force et qui m'ont soutenu tout au long de ma vie.

À mes très chers parents, source de ma réussite et de mon bonheur.

À mes chers frères Aymen et Sidi Ali.

À mes sœurs Amani et Zoulfa.

À ma chère nièce Djana.

À mes cousins Taos, Salah et Riyad et leur père Tonton Djallal.

À ma grande mère et mes tantes et oncles.

À l'homme de ma vie Abdelkader Ben Zahra et leur famille.

À mon encadreur MR, Abekfiti Abdelkader.

À toutes mes amies pour le grand aide.

AKRIM NOUHA



Je dédie ce **TRAVAIL...**

À MES CHERS PARENTS SAÏD ET FATIHA

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

À Mes CHERS TANTES AICHA ET TOUATIA

Vous étions le symbole de force et de persévérance, je t'aimais tellement, même si vous avez tous les deux quitté ce monde, mais vous êtes toujours dans nos cœurs, que Dieu ait pitié de vous, et vous fasse vivre au paradis

À MES CHERS ET ADORABLE FRÈRES ET SOEURS : ABDELHAKI, YASSINE ET NABILA

En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

À MON CHER NEVEU DJAD

À MA GRAND MÈRE

À MES AMIS DE TOUJOURS : BILAL, CHOAI B ET KHALIL

À MON ENCADREUR MR. Abekfiti Abdelkader.

**LAROU YOUSSEF**

RESUME

Dans les régions sahariennes, le palmier dattier constitue la culture principale de l'agriculture et offre une large gamme de sous-produits agricoles. Cette étude porte sur la caractérisation morphologique physicochimique des cultivars, et forme et voies de valorisation de différente biomasse issue du dattier. Actuellement les possibilités de valorisation énergétique de la biomasse végétale par les procédés biotechnologiques représentent une solution de choix pour l'utilisation des produits agricoles de faible valeur commerciale afin de produire des bioénergies alternatives aux énergies fossiles. L'objectif recherché à travers cette étude est l'obtention du bioéthanol par valorisation des palmes et des dattes communes de moindre qualité. Ceci fait appel au procédé de fermentation anaérobie en utilisant les souches *Saccharomyces cerevisiae* et *Zygosaccharomyces rouxii*.

Il ressort aussi de cet étude que la levure osmotolérante *Zygosaccharomyces rouxii* est mieux adapté au Moût de datte concentré à 35.8°Brix et peut d'ailleurs aboutir à un rendement YEtOH/S de 38 %, identique à celui de *S. cerevisiae*, cultivée sur un milieu à 17.4°Brix.

Mots clé : dattier, biomasse lignocellulosique, bioéthanol, biocarburants, valorisation, fermentation alcoolique, *Zygosaccharomyces rouxii*, *Saccharomyces cerevisiae*.

Abstract

In the Saharan regions, the date palm is the main crop of agriculture and offers a wide range of agricultural by-products. This study focuses on the morphological physicochemical characterization of the cultivars, and the form and valuation routes of different biomass from the date palm. Currently, the possibilities of energy recovery from plant biomass by biotechnological processes represent a solution of choice for the use of agricultural products of low commercial value in order to produce bioenergy alternatives to fossil fuels. The objective sought through this study is to obtain bioethanol by recycling palms and common dates of lower quality. This involves the anaerobic fermentation process using the *Saccharomyces cerevisiae* and *Zygosaccharomyces rouxii* strains.

It also emerges from this study that the osmotolerant yeast *Zygosaccharomyces rouxii* is better suited to date must concentrated at 35.8 ° Brix and can also lead to a YEtOH / S yield of 38%, identical to that of *Saccharomyces cerevisiae* , grown on medium at 17.4 ° Brix.

Keywords: date palm, lignocellulosic biomass, bioethanol, biofuels, recovery, alcoholic fermentation, *Zygosaccharomyces rouxii* , *Saccharomyces cerevisiae*

الملخص

في المناطق الصحراوية ، يعتبر نخيل التمر هو المحصول الرئيسي للزراعة ويقدم مجموعة واسعة من المنتجات الثانوية الزراعية. تركز هذه الدراسة على الخصائص المورفولوجية لأصناف نخيل التمر ، والشكل وطرق تقييم الكتلة الحيوية المختلفة من نخيل التمر. في الوقت الحالي ، تمثل إمكانيات استعادة الطاقة من الكتلة الحيوية النباتية عن طريق عمليات التكنولوجيا الحيوية حلاً مختاراً لاستخدام المنتجات الزراعية ذات القيمة التجارية المنخفضة من أجل إنتاج بدائل للطاقة الحيوية للوقود الأحفوري. الهدف المنشود من خلال هذه الدراسة هو الحصول على الإيثانول الحيوي عن طريق إعادة وتدوير جريد النخيل والتمور الشائعة منخفضة الجودة. يتضمن هذا عملية التخمير اللاهوائية باستخدام سلالات *Saccharomyces cerevisiae*. *Zygosaccharomyces rouxii*

يتضح أيضًا من هذه الدراسة أن خميرة *Zygosaccharomyces rouxii* مناسبة بشكل أفضل حتى الآن ويجب أن تتركز عند 35.8 درجة Brix ويمكن أن تؤدي أيضًا إلى إنتاج YEtOH / S بنسبة 38 ٪ ، وهو مماثل لعائد S. ينمو على وسط عند 17.4 درجة برينكس.

الكلمات المفتاحية: نخيل التمر ، الكتلة الحيوية الليجنوسليلوزية ، البيوايثانول ، الوقود الحيوي ، تئمين ، التخمير الكحولي، *Zygosaccharomyces rouxii*, *Saccharomyces cerevisiae*

LISTE DES ABREVIATIONS

Liste des abréviations

% : Pourcent.

ADF : Lignocellulose.

ADH : Alcool déshydrogénase.

Adh : Vasopressine.

AFEX: Ammonica fiber explosion.

C: Carbon.

C₂H₅OH: Ethanol.

C₆H₁₂O₆: Glucose.

CB : Cellulose brute.

CI : Cendre insoluble.

Cm : Centimètre.

CO₂ : Gaz carbonique.

CRP : Le charançon rouge des palmiers.

CV : Cellulose vraie

DGF : Direction général des forets.

DHAP: Dihydroxy- acetone – phosphate.

DSAA : Direction des services agricole

Adrar.

ETBE : Ether éthyle tertio butyle.

EtOH: Ethanol.

FAO: Food and agriculture organization.

G : Gramme.

G-3-P: Glyceraldehyde-3- Phosphate.

H : Heure.

HCl: Acide chlorhydrique.

HCOSE : Hémicellulose.

HPLC: High performance liquid chromatography.

HVO : Huile végétal hydrogénées.

K₂Gr₂O₇ : Dichromate dépotassium.

Kcal: Kilocalorie.

KG : Kilogramme.

KJ : Kilojoule.

KOH : Hydroxyde de potassium.

KPa: Kilopascal.

LIGN : Lignine.

MAT : Matière azoté totale.

MENA : Moyen orient et nord d'Afrique.

MM : Matière minérale.

Mm : Millimètre.

MO : Matière organique.

Mol: Mole.

MS : Matière sèche

NADH : Nicotinamide adénine dinucléotide.

NDF : Paroi totale.

NH₄Cl : Chlorure d'ammonium.

OCDE: Organisation de coopération et de développement économiques.

OGM : Organisme génétiquement modifié.

PDC : Pyruvate décarboxylase.

PEP: Phospho-enolpyruvate.

pH : Potentiel hydrogène.

Ppm : Partie par million.

PPP: Voie des pentoses phosphates.

Qx : Quintaux.

Rpm : Tour par minute.

UV : Ultraviolet.

V/V : Volume/ volume.

LISTE DES FIGURES

N° de figures	Titre	N° de la page
Figure 1	Fossile du palmier dattier.	04
Figure 2	Répartition géographique des dattiers dans le monde.	06
Figure 3	Répartition des palmeraies en Algérie.	07
Figure 4	Figuration du palmier dattier.	09
Figure 5	Fruit et graine du dattier.	10
Figure 6	Produit divers de la transformation de datte.	12
Figure 7	Une palme.	17
Figure 8	Vanneries à base de folioles de palmier dattier.	18
Figure 9	Usage des palmes en lutte contre la désertification et en clôture des parcelles oasiennes.	19
Figure 10	Le tronc (stipe) du palmier dattier.	20
Figure 11	Usage des déchets du palmier en compostage.	21
Figure 12	Différentes opérations de préparation pour compostage des sous-produits oasiens en station Compilation.	22
Figure 13	Source de biomasse pour les biocarburants de première génération.	27
Figure 14	Processus de production de bioéthanol à partir de céréales.	28
Figure 15	Processus de fabrication de biodiesel ou diester.	29
Figure 16	Diagramme de synthèse des biocarburants de 1ère et de 2ème génération.	29
Figure 17	Procédé de production d'éthanol 2ème génération.	30
Figure 18	Utilisation du CO2 émis pour la croissance des plantes.	31

Figure 19	Molécule de l'éthanol.	32
Figure 20	Impact de prétraitement de sur la matière lignocellulosique.	37
Figure 21	Produits résultants de l'hydrolyse.	38
Figure 22	Distribution de la production mondiale de bioéthanol (2006).	41
Figure 23	Principe de la fermentation alcoolique du glucose par la levure (S.c).	43
Figure 24	Voie métabolique de fermentation de <i>Saccharomyces cerevisiae</i> .	45
Figure 25	Réaction de fermentation du glucose par (S.c).	46
Figure 26	Biomasse du palmier dattier utilisée pour la production du bioéthanol.	53
Figure 27	Matière biologique de fermentation.	54
Figure 28	Dispositif expérimental de la fermentation alcoolique.	55

LISTE DES TABLEAUX

N° du tableau	Titre	N° de la page
Tableau 1	inventaire variétal (cultivars) dans les trois régions phoenicicole.	08
Tableau 2	Composition chimique des palmes sèches, pédicelles, paille d'orge et rebuts de dattes.	14
Tableau 3	Composition chimique des fibres de palmier dattier avant (Fibres sèches crues de palmier) et après (fibres (oxydées) modifiées) le traitement chimique.	14
Tableau 4	Evaluation des déchets du palmier dattier.	15
Tableau 5	évaluation de la quantité de déchets du bois du dattier dans la région du MENA (moyen orient et nord d'Afrique) basée sur le nombre des pieds du palmier et arbre fruitiers.	16
Tableau 6	caractéristiques physico-chimiques de l'éthanol.	33
Tableau 7	Principaux procédés de traitement.	36-37
Tableau 8	Souches de levures produisant l'éthanol comme produit majeur de fermentation.	47-48-49
Tableau 9	Souches de bactéries productrices d'éthanol comme produit majeur de fermentation.	51
Tableau 10	caractéristique physico-chimique du produit fini (bioéthanol).	57
Tableau 11	Fermentation alcoolique du milieu à base de sirop de dattes par les levures (après 72 h de culture).	59
Tableau 12	Rendement en produits et en biomasse après 72 h de fermentation.	60

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENT	I
DEDICACE	II
RESUME	IV
LISTE DES ABREVIATIONS	VII
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES TABLEAUX	X
TABLE DES MATIERES	XI
INTRODUCTION GENERAL	1
1 PALMIER DATTIER	3
1.1 GENERALITES	3
1.2 HISTORIQUE DE PALMIER DATTIER	3
1.3 SYSTEMATIQUE DE <i>PHENIX DACTYLIFERA</i>	4
1.4 ECOLOGIE	4
1.5 ECONOMIE	5
1.6 PARASITES ET MALADIES	5
2 REPARTITION GEOGRAPHIQUE DE LA PLANTATION DU PALMIER DATTIER	5
2.1 DANS LE MONDE	5
2.2 PALMIER DATTIER EN ALGERIE	6
3 DESCRIPTION ET COMPOSITION CHIMIQUE DES DIFFERENTS TYPES DE LA BIOMASSE DU PALMIER DATTIER	8
3.1 DESCRIPTION MORPHOLOGIQUE	8
3.1.1 <i>Le stipe</i> :	9
3.1.2 <i>Les organes floraux</i> :	10
3.1.3 <i>La datte</i> :	10
4 COMPOSITION CHIMIQUE DES SOUS-PRODUITS DE DATTIER	14
5 FORME ET VOIE DE VALORISATION DE LA BIOMASSE DU PALMIER DATTIER	15
5.1 LA BIOMASSE DU PALMIER DATTIER	15
6 SITUATION LOCALE ET INTERNATIONAL DE LA GENERATION DES DECHETS DES PALMIERS DATTIERS ...	16
7 FORMES TRADITIONNELLES D'EXPLOITATION DES SOUS-PRODUITS DATTIERS	17
8 USAGE DES SOUS-PRODUITS DU PALMIER DATTIER ET TRANSFORMATION DES DECHETS:.....	18
8.1 USAGE DES PALMES	18
8.1.1 <i>Définition</i>	18
8.2 USAGE DES FOLIOLES EN VANNERIE	18
8.3 USAGE DES PALMES EN LUTTE CONTRE LA DESERTIFICATION	19
8.4 USAGE DU BOIS DU DATTIER OU STIPE	20
8.4.1 <i>Définition</i>	20
8.5 USAGE DES DECHETS DU PALMIER DATTIER EN COMPOSTAGE	20
8.6 LES MODES DE COMPOSTAGE	22
9 CHAPITRE 02 : USAGE DES DECHETS DU PALMIER DATTIER COMME BIOCARBURANT	23

9.1	LA BIOMASSE	23
9.2	LA BIOMASSE AGRICOLE ET L'HOMME	23
9.3	DEVELOPPEMENT DES BIO-CARBURANTS	24
9.4	RESSOURCES DE BIOMASSE	24
9.5	BIOMASSE VEGETALE	24
9.6	LA BIOMASSE AGRICOLE	24
9.7	L'USAGE DE LA BIOMASSE AGRICOLE	25
9.8	LE BIOETHANOL, LE PRODUIT NOBLE DE LA BIOCONVERSION DE LA BIOMASSE.....	25
9.9	LES GENERATIONS DES BIOCARBURANTS	26
9.10	BIOETHANOL A PARTIR DE PLANTES SUCRIERES OU AMYLACEES.....	27
9.11	BIODIESEL A PARTIR DE PLANTES OLEAGINEUSES	28
9.12	LES BIOCARBURANTS DE DEUXIEME GENERATION	29
9.13	LES BIOCARBURANTS DE TROISIEME GENERATION	30
9.14	MODE DE PRODUCTION DU BIOETHANOL PAR LA FERMENTATION DE LA BIOMASSE.....	31
9.15	PROPRIETES DE BIOETHANOL	32
9.15.1	<i>Caractéristiques physico-chimique de l'éthanol.....</i>	32
10	CHAPITRE 03: MATERIEL ET METHODES.....	34
10.1	PHASES DE PRODUCTION DE BIOETHANOL	34
10.2	PRETRAITEMENT :	34
10.3	PROCEDES PHYSIQUES :.....	35
10.4	PROCEDES CHIMIQUES :	35
10.5	HYDROLYSE :	38
10.5.1	<i>- L'hydrolyse chimique :.....</i>	38
10.5.2	<i>Hydrolyse a acide dilue :</i>	38
10.5.3	<i>Hydrolyse à acide concentré :</i>	39
10.5.4	<i>- L'hydrolyse enzymatique :.....</i>	39
10.6	LA FERMENTATION.....	40
10.7	LA DISTILLATION	40
10.8	PROJETS DE PRODUCTION DE BIOETHANOL.....	40
10.9	CONCEPT DE FERMENTATION ETHANOLIQUE.....	42
10.9.1	<i>Micro-organismes utilisés en fermentation</i>	43
10.9.2	<i>Fermentation par les levures</i>	46
10.9.3	<i>Fermentation par les bactéries</i>	49
10.9.4	<i>Levures génétiquement modifiées :</i>	51
10.10	PRODUCTION DE BIOETHANOL A PARTIR DES PALMES SECHE ET PEDICELLE (SELON BOULAL, KHELAFI ET KAIDI, 2018).....	52
10.10.1	<i>Matériel biologique.....</i>	53
10.10.2	<i>Processus de production de bioéthanol</i>	53
11	CHAPITRE 04:RESULTATS ET DISCUSSION.....	55
11.1	<i>- PALMES SECHES</i>	55
11.2	<i>- PEDICELLES DE DATTES</i>	55
11.3	CARACTERISTIQUES DE L'ETHANOL PRODUIT :	55
11.4	RENDEMENT	55
11.5	CARACTERISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES DU PRODUIT FINI	56
12	PRODUCTION DE BIOETHANOL A PARTIR DE L'ECART DE TRIAGE DE DATTES (DEGLET-NOUR) (SELON CHNITI ET AL, 2014).....	56
12.1	EXTRACTION DE JUS DE DATTES	56
12.2	MILIEUX DE CULTURE.....	57
12.3	PROCESSUS DE FERMENTATION	57
12.4	EVOLUTION DE LA BIOMASSE	57
13	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	60
14	REFERENCE :.....	62

INTRODUCTION GENERAL

Le palmier dattier est l'espèce cultivée par excellence dans les régions arides, ce qui a fait de cet arbre un pivot central autour duquel s'articule la vie dans les régions sahariennes. Elle revêt donc d'une grande importance socioéconomique et environnementale. **(Laouar, 2020)**

Les chiffres viennent aussi pour concrétiser cet aspect fondamental de la phoeniciculture, avec un potentiel passant de 11,67 millions de dattier en 2000 à 18,4 millions de palmiers en 2013. Selon l'**ITIDAS en 2019**, la production des dattes a dépassé 12 millions de quintaux (Qx), toutes variétés confondues, sur une superficie de 170.000 hectares réparti sur 16 wilaya du sud algérien.

Selon la direction des services agricole, la wilaya d'Adrar (DSA-Adrar, 2012) est l'une des producteurs potentiels de dattes avec une moyenne de production de 86,500 tonnes des dattes en 2012, provenant de 2, 000,000 de palmiers dattiers. Cette énorme production est majoritairement commercialisée à l'étranger frontalier tandis que quelques quantités sont consommées localement. **(Boulal et al, 2016)**

En matière de biomasse phoenicicole, l'entretien annuel des palmiers dattiers produit un gisement renouvelable estimé à 200 000 tonnes de déchet renouvelable constitué essentiellement de palmes sèches. **(Zaïd, 2002)**

La valorisation de la biomasse par les procédés biotechnologiques représente une solution du choix dans la mesure où elle contribue à l'élimination de la pollution que subit l'environnement et permet de produire des substances à forte valeur, ajoutée en contribuant au développement industriel et agricole du pays.

Le majeur inconvénient de cette démarche de valorisation est que leur obtention nécessite l'utilisation de grandes surfaces agricoles et d'eau. De ce fait, les biocarburants de première génération entrent directement en compétition avec la filière alimentaire et peuvent contribuer à accentuer la crise alimentaire. **(Demirbas, 2008)**

Les biocarburants dits « avancés » à savoir de 2ème et de 3ème génération n'ont pas encore atteint le stade industriel et sont au stade de recherche et développement. Aujourd'hui, seule la première génération a atteint le stade industriel.

Dans ce mémoire, nous avons répartis les notions sur deux parties :

La première partie présente une synthèse bibliographique comportant deux chapitres distincts. Le premier chapitre rapporte des données générales sur les palmiers dattiers, la description morphologique et la composition chimique des différents type de biomasse du palmier dattier, et formes et voies de valorisation de la biomasse générée par le dattier. Le deuxième chapitre traite l'usage des déchets du palmier dattier comme biocarburant et les générations du biocarburant.

La deuxième partie présente les différentes méthodes de production du bioéthanol, et une comparaison entre deux procédés de production du bioéthanol à partir de deux différents types de biomasse issue du palmier dattier.

Finalement, nous avons achevé ce mémoire par une conclusion générale qui relate nous avis et les avis des experts quant à l'avenir de la valorisation de biomasse du palmier dattier.

PARTIE BIBLIOGRAPHIE

CHAPITRE01:PALMIER DATTIER

1 PALMIER DATTIER

1.1 GENERALITES

Le palmier dattier est un arbre rustique s'adaptant aux conditions climatologiques des régions arides du monde. C'est une monocotylédone arborescente, de la famille des palmacées ou phoenicacées connu sous le nom de *phoenix dactylifera* L (**Chehema et Longo, 2001**).

Dans le Sahara algérien, le palmier dattier (*Phoenix dactylifera*) est le pilier des écosystèmes oasiens où il permet de limiter les dégâts d'ensablement, et joué un rôle protecteur contre le rayonnement solaire intense par la création d'un microclimat pour les cultures sous-jacentes (arbres fruitiers, cultures maraichères et céréales). Par sa présence dans ces zones désertiques, il a rendu possible la survie de diverses formes de vies animales et végétales (**Bougandoura et al, 2010**).

1.2 HISTORIQUE DE PALMIER DATTIER

La nomenclature a été proposée par Linné en 1753. Le mot Phoenix est dérivé du nom du dattier chez les Grecs antiques qui l'ont considéré comme l'arbre des Phéniciens (du grec « Phoen» rouge sang, caractéristique de la couleur de leur peau) ou Phéniciens. Alors que « Dactylifera » vient du latin « dactylus» originaire du grec « daktylos» signifiant doigt par ressemblance avec la forme de la datte fruit du dattier (**Bezato, 2013**).

L'arbre palmier dattier est qualifié par plusieurs nominations en fonction de la langue considérée ainsi, il est nommé : palmier dattier en Français, Nakhla en Arabe, Tamar (Hébreu), Palmadatilera (Espagnol), Palma daterro (Italien), Manah (Persan). Dans la nomenclature vernaculaire Berbère on rencontre les désignations suivantes : Tazdaït, Tanekht, Tainiout (selon les régions Algériennes). (**Bouziane et Abdelli, 2017**)

De nombreux fossiles de palmiers ont été découverts en Europe sur des terrains datant de l'Oligocène au Miocène (Figure 1). Cet arbre a été toujours vénéré par toutes les civilisations de la Méditerranée, ainsi il a été symboliquement pris en guise d'arbre de vie, de fécondité et du succès (**Baali, 2012**).



Figure 1 : Fossile du palmier dattier.

1.3 SYSTEMATIQUE DE *PHŒNIX DACTYLIFERA*

Le palmier dattier occupe un taxon particulier dans le genre *Phœnix* avec une typicité marquante des autres espèces du genre *Phœnix*. Le genre *Phœnix* comporte au moins douze espèces, la plus connue est le dactylifera (**Kortebi et al, 2013**).

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

Groupe : Spadiciflores

Ordre: Palmales

Famille : Palmacées

Sous famille : Coryphoidées

Tribu : Phœnicées

Genre : *Phœnix*

Espèce : *Phœnix dactylifera* L

1.4 ECOLOGIE

Le Palmier Dattier est cultivé comme arbre fruitier dans les régions chaudes arides et semi arides. Cet arbre peut s'adapter aux conditions climatologiques variables. Naturellement il est thermophile ; exigeant un climat chaud, sec et ensoleillé. Il s'adapte aussi à tous les sols.

Toutefois, il est très sensible à l'humidité pendant la période de pollinisation et au cours de la maturation (**Belimi et Reffas, 2017**).

1.5 ECONOMIE

Les palmiers sont des plantes parmi les plus utiles dans l'économie agricole des pays des zones phoenicicole (**Baali, 2012**). Il a toujours joué un rôle économique et sociale primordial pour les populations de ces régions par la production des fruits de dattes et partiellement par les petits revenus générés par les sous-produits Tels que (levure, bioéthanol, farine, sirop, pâtes, vinaigre, confiserie,...) (**Laouar, 2020**)

1.6 PARASITES ET MALADIES

Comme toutes les plantes, le dattier est exposé à des ravageurs biologiques qui menacent l'état de sa floraison et sa maturation. Parmi ces ravageurs, on distingue des insectes et des champignons :

- Paysandisia archon : Le papillon ravageur du palmier.
- Rhynchophorus ferrugineus : Le charançon rouge des palmiers (CRP). (**Baali, 2012**)
- Oligonychus Afrasiaticus: est le nom latin donné à un acarien appelé localement Boufaroua ou Ghobar au Maghreb Takar en Mauritanie, Goubar en Irak.
- La pourriture de l'inflorescence du Khamedj : est connue dans presque toutes les zones de cultures du dattier. C'est une maladie grave qui sévit dans les régions phoeniculture les plus humides ou pendant les années plus humide. (**Bounaga et Djerbi, 1990**)

2 REPARTITION GEOGRAPHIQUE DE LA PLANTATION DU PALMIER DATTIER

2.1 DANS LE MONDE

La culture du palmier dattier est localisée principalement dans les régions arides au sud de la méditerranée et dans la frange méridionale du proche Orient depuis le Sud de l'Iran à l'Est jusqu'à la côte atlantique de l'Afrique du Nord à l'Ouest, entre les latitudes 35° Nord et 15° Sud. (**Baali, 2012**)

L'Espagne est le seul pays d'Europe qui produit des dattes principalement dans la célèbre palmeraie d'Elche, située à l'Ouest d'Alicante à 39° Nord. Le palmier dattier est également cultivé à plus faible échelle au Mexique, en Argentine, en Australie et dans les Etats-Unis d'Amérique (figure 2). (**Ghnabzi et Merghani, 2019**)



Figure 2 : Répartition géographique du palmiers dattiers dans le monde. (Makhloufi, 2015)

2.2 PALMIER DATTIER EN ALGERIE

L'Algérie est un pays phoenicicole classé au sixième rang mondial et au premier rang au Magreb pour ces grandes étendues de culture avec 160 000 ha et plus de 2 millions de palmeraies et sa production annuelle moyenne allant jusqu'à 500 000 tonnes. (Bougandoura et al, 2010)

En général les palmeraies algériennes sont localisées au Nord-Est du Sahara au niveau des oasis. Le palmier dattier est cultivé au niveau de 17 wilayas seulement, pour une superficie de 120830 hectares, cependant 4 wilayas représentent 83,6% du patrimoine phoenicicole national : Biskra 23%, Adrar 22%, El-oued 21% et Ouargla 15%.

La distribution des cultivars principaux (figure 2) montre une répartition est-ouest très marquée. Une cinquantaine de cultivars se trouvent dans deux ou trois régions mais la majorité des cultivars reste endémique à leur région ou à leur zone d'origine. (Kortebi et al., 2013)

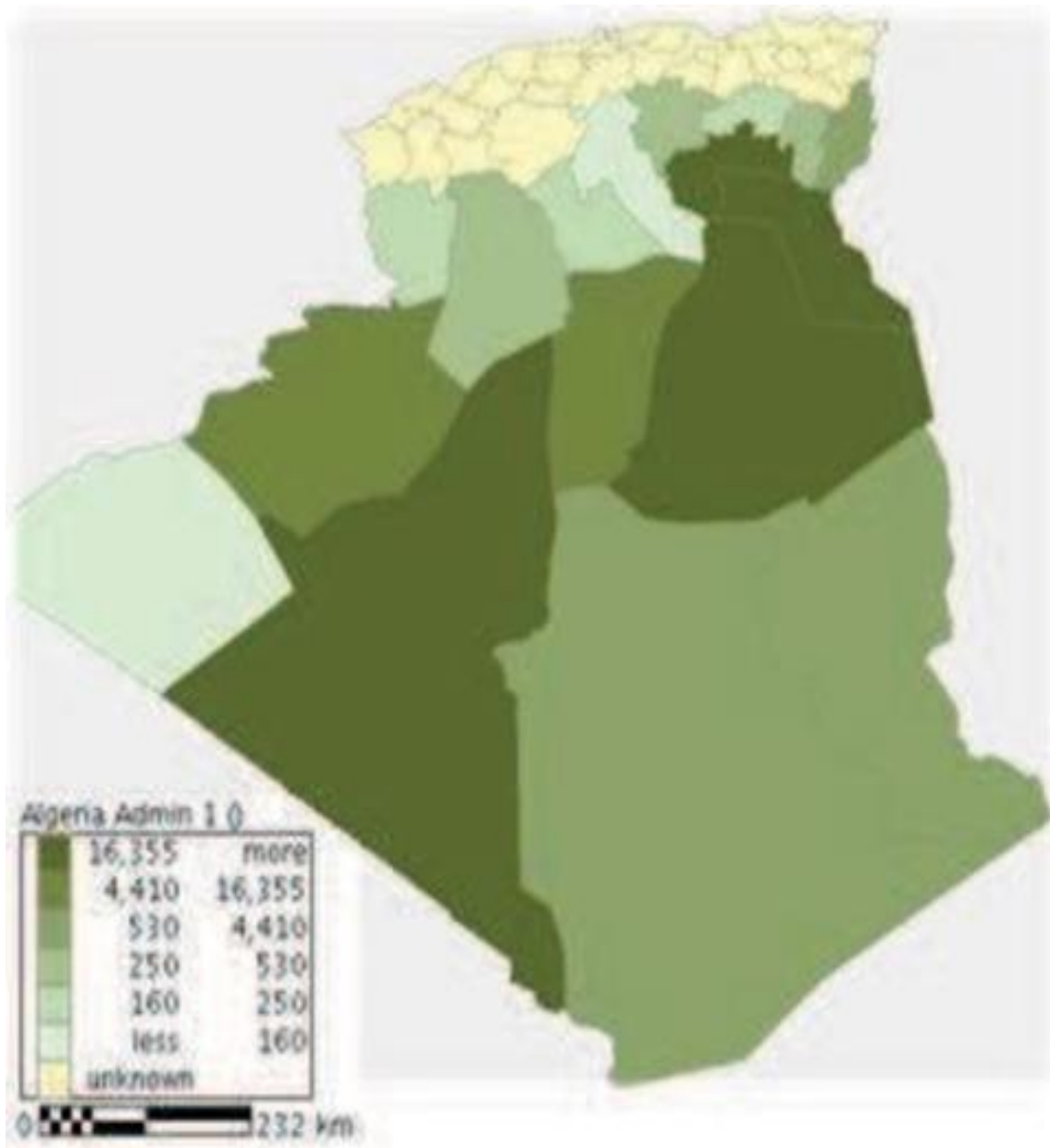


Figure 3 : Répartition des palmeraies en Algérie (FAO, 2010)

Près d'un millier de cultivars ont été inventoriés dans trois régions principales de culture. La variabilité est d'ordre morphologique et génétique (tableau 1) (Bougandoura et al., 2010)

Tableau 01: Inventaire variétal (cultivars) dans les trois régions phoenicicole d'Algérie (Bouquedoura et al, 2010)

Région	Nombre de cultivars	Cultivars les plus courants
Ouest		
Atlas	70	Ghars ,Asyan ,Feggus
Saoura	80	Feggus,Hartan,Cherka,Hmira,Deglet Talmine
Gourara		Hmira,Tinnaser,Taqerbuch
Touat	230	Ragazza,Aghamu,Taqerbuch
Tidikelt	190	Tgazza,Taqerbuch,Cheddakh,Aggaz
Centre		
El-Ménia	70	Timjuhart,Ghars,Timedwel Azerza,Ghars,Deglet
M'Zab	140	Nour,Taddela
Est		
Ouargla	70	Ghars,Deglet nour , Degla Baida Ghars,Deglet
Oued righ	130	nour , Degla Baida Ghars,Deglet nour , Degla
Souf	70	Baida ,Mich Degla Ghars,Deglet nour , Degla
Zibans	140	Baida, Mich Degla Buzrur,Alig,Buhles,Mich
Aures	220	Degla Tanghiman,Tabanist ,Khadaji
Tassili	180	

3 DESCRIPTION ET COMPOSITION CHIMIQUE DES DIFFERENTS TYPES DE LA BIOMASSE DU PALMIER DATTIER

3.1 DESCRIPTION MORPHOLOGIQUE

Le palmier dattier est une arborescente considérée comme une herbe géante. Il présente 3 parties: un système racinaire, un organe végétatif composé de la tige (stipe) et des feuilles (palmes) et un organe reproductif (spathe) composé d'inflorescences mâles ou femelles (figure 4). (Tahri, 2018)

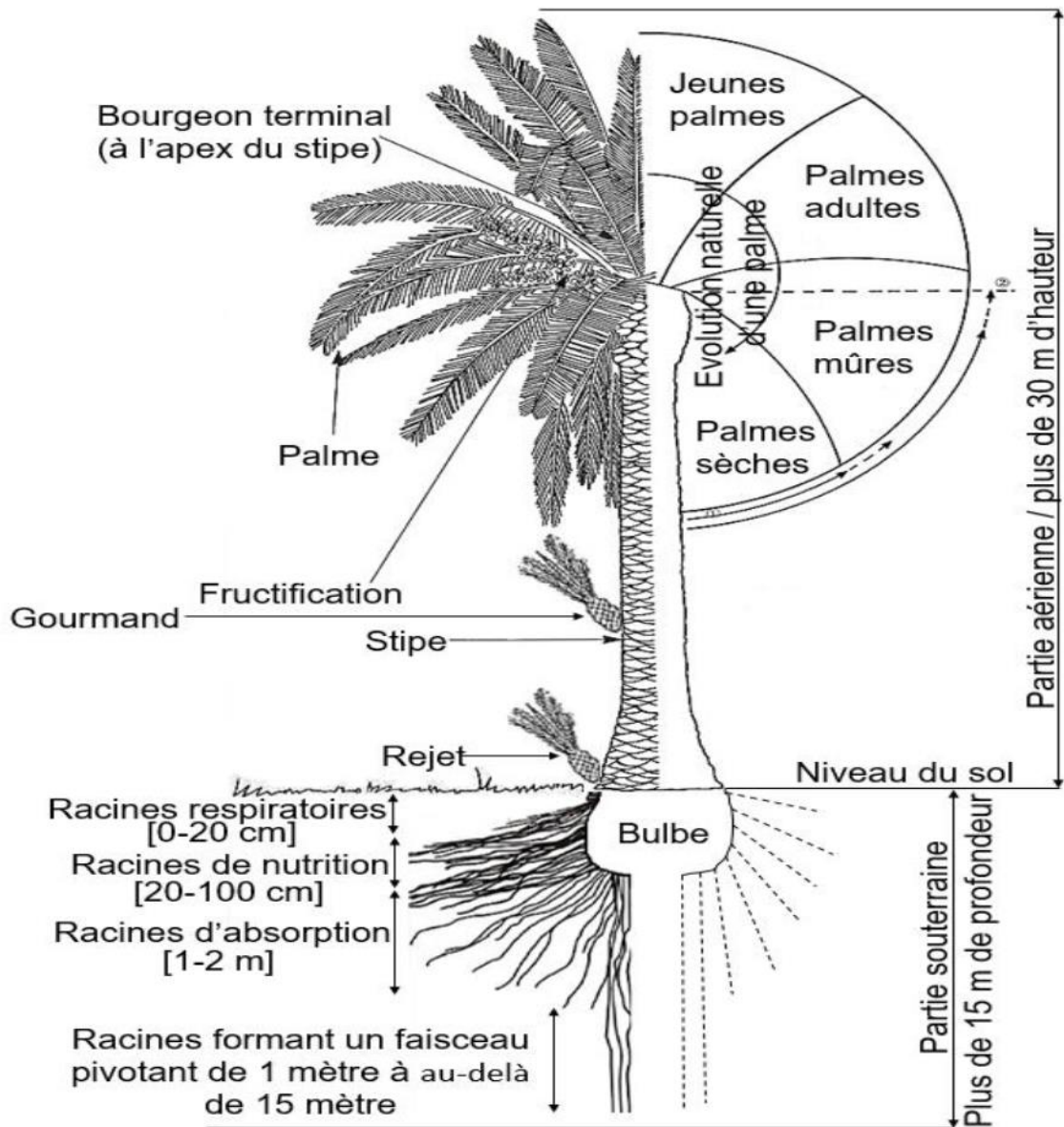


Figure 4 : Figuration du palmier dattier (Tahri, 2018)

3.1.1 Le stipe :

contient des faisceaux libéroligneux qui relie directement chaque racine à une palme bien déterminée. D'autre coté, les vaisseaux conducteurs ont des cloisons terminales à perforations scalariformes. Pendant son jeune âge, le palmier dattier présente un cambium extra-fasciculaire dans le méristème, sous le point végétatif, qui grossit le tronc. Cette assise de prolifération des cellules lui donne son calibre définitif puis disparaît. Il est doté d'un simple bourgeon terminal ou zone de croissance en longueur. Le stipe est couvert régulièrement des cicatrices des anciennes palmes. (Toutain, 1967)

A l'aisselle de chaque palme se trouve un bourgeon axillaire qui en se développant, peut donner naissance à une inflorescence dans la région coronaire, à un rejet dans la région basale (Djerba) ou rarement à un gourmand dans la région moyenne et sous coronaire (Rokeb). **(Tahri, 2018)**

3.1.2 Les organes floraux :

le palmier dattier est une plante dioïque ; les inflorescences mâles et femelles sont portées par des palmiers différents. **(Kortebi et al, 2013)**

3.1.3 La datte :

La datte est une baie, de forme généralement allongée, ses dimensions sont très variables de 1,5 à 8 cm de longueur et d'un poids de 2 à 20 g. sa couleur va du blanc jaunâtre au sombre très foncé presque noir, en passant par les ambres, rouges et bruns. La datte contient une seule graine dite "noyau". La partie comestible de la datte, est dite "chair" ou "pulpe". (Figure 5) **(Kortebi et Iaiche, 2013)**

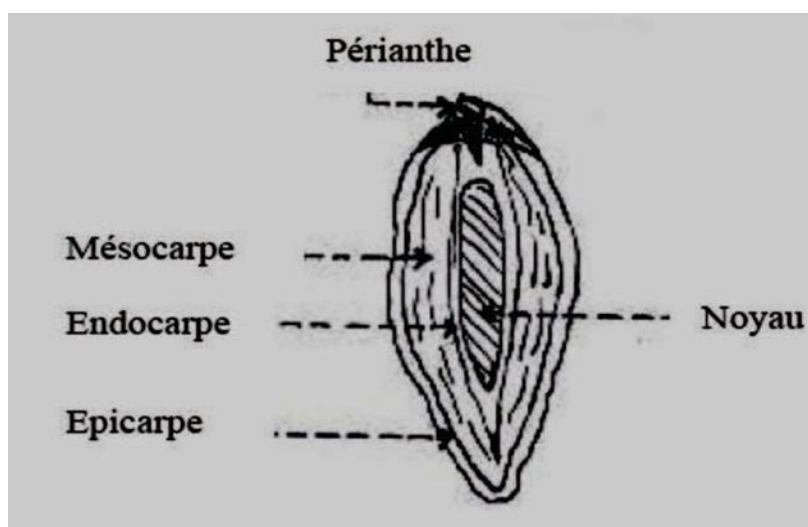


Figure 5: Fruit et graine du dattier **(Kortebi et Iaiche, 2013)**

L'utilisation du produit principal de la filière, les dattes, produit deux types de sous-produits : des dattes non-consommables et les noyaux de dattes.

Les dattes de seconde qualité ou les variétés commune et celles présentant des anomalies pour ne pas pouvoir être vendues comme dattes de bouche peuvent servir à de nombreux usages, notamment : le vinaigre, l'alcool et les levures, par fermentation microbiologique des

dattes communes ; farine de dattes utilisées dans la panification et jus de dattes, par extraction, utilisé comme sucrerie.

La partie suivante relate les possibilités de promotion des dattes de seconde valeur.

Pâte de datte:

Les dattes molles ou ramollies par humidification donnent lieu à la production de pâte de datte. La fabrication est faite mécaniquement. Lorsque le produit est trop humide il est possible d'ajouter la pulpe de noix de coco ou la farine d'amande douce. La pâte de datte est utilisée en biscuiterie et en pâtisserie. **(Espiard, 2002)**

Farine de dattes:

Elle est préparée à partir de dattes sèches ou susceptibles de le devenir après dessiccation. Riche en sucre, cette farine est utilisée en biscuiterie, pâtisserie, aliments pour enfants et yaourt. **(Kortebi et Iaiche, 2013)**

Sirop, crèmes et confitures de datte

Cette gamme de produit est basée sur l'extraction des sucres par diffusion de ces derniers et des autres composants solubles de la datte. Par mélange et cuisson de pâte ou de morceaux de dattes et de sirop nous pouvons obtenir des crèmes ou des confitures d'excellente qualité. **(Espiard, 2002)**

Autres, les dattes de faible valeur marchande, le dattier offre une panoplie d'usage à la fois traditionnel mais avec une grande possibilité de développement à l'échelle artisanal et industriel.

Les dattes abîmées et de faible valeur marchande peuvent être utilisées en raison de leur forte teneur en sucre pour la production de :

Biomasse et protéines unicellulaires:

La production de protéines reste un objet essentiel afin de subvenir aux besoins mondiaux. A cet égard, des essais de production de protéines d'organismes unicellulaires par culture de la levure *Saccharomyces cerevisiae* sur un milieu à base de dattes ont été réalisés. **(Kendri, 1999)**, l'analyse des biomasses produites montre leur richesse en protéines à raison de 32 à 40 % de poids sec.

Alcool

Les dattes constituent un substrat de choix pour la production de l'alcool éthylique. L'alcool éthylique a été produit au laboratoire avec un rendement de 87 %.**(Kortebi et Iaiche, 2013)**

Vinaigre:

Les dattes peuvent être utilisées pour l'élaboration de nombreux produits alimentaires parmi lesquels le vinaigre. Ce dernier a été produit par culture de la levure *Saccharomyces uvarum* sur un extrait de dattes. (Boughnou, 1988)



Figure 6 : Produit divers de la transformation de dattes (Ben sallah, 2014)

Aliments de bétail:

Les rebuts et les noyaux de dattes constituent des sous-produits intéressants pour l'alimentation du bétail. La farine des noyaux de dattes peut être incorporée avec un taux de 10% dans l'alimentation des poulets sans influencer négativement leurs performances. (Kortebi et Iaiche, 2013)

Ce sont généralement les éleveurs qui viennent directement à l'usine pour reprendre les noyaux. Parfois, ils les donnent au bétail sans transformation, mais, plus souvent, ils les broient et les mélangent avec d'autres aliments», a-t-elle indiqué en révélant que la transformation des sous-produits de dattier en alimentation animale a fait objet de plusieurs

programmes de recherche. «Malheureusement, et malgré le fait que les résultats ont été concluants, peu ou pas de projets de production à l'échelle du développement n'ont pas été lancés», a-t-elle regretté, plaidant, à la fin, pour une réelle prise en charge de cette activité. **(Anonyme 1, 2016)**

La fabrication d'un aliment du bétail à base de dattes nécessite obligatoirement de pouvoir disposer de dattes à très bas prix (en l'occurrence, les écarts de triage des stations de conditionnement ou des unités de transformation), un produit fabriqué industriellement à partir de dattes achetées au paysan reviendra toujours plus cher qu'aliment équivalent obtenu par le paysan en mélangeant ses dattes non commercialisées avec un complément minéral et vitaminé adéquat. **(Kadri, 2019)**

Autres produits:

La datte constitue un substrat de choix pour la production de nombreux autres produits tels que : le vin et le jus de datte **(Espiard, 2002)**

Il en est de même pour les noyaux provenant de la production de pâtes de dattes. Vu le petit volume de production de pâte de dattes, les quantités de noyaux sont modestes, si bien qu'un marché de ces produits ne s'est pas encore vraiment constitué. Ce sont généralement les éleveurs qui viennent directement à l'usine pour reprendre les noyaux. Parfois, ils les donnent au bétail sans transformation, mais, plus souvent, ils les broient et les mélangent avec d'autres aliments.

Les déchets des dattes constituent au moins en Algérie, un apport important d'aliments du bétail, surtout pour combler les périodes de rupture d'approvisionnement. **(Kadri, 2019)**

4 COMPOSITION CHIMIQUE DES SOUS-PRODUITS DE DATTIER

Le dattier est une source incontournable de biomasse végétale par la richesse de ces organes en polysaccharide de composition lignocellulosique complexe. L'analyse chimique de la composition pariétale des 4 sous-produits du palmier dattier est rapportée par (le tableau 2). (Chehema et Longo, 2001)

Tableau 2 : Composition chimique des palmes sèches, pédicelles, paille d'orge et rebuts de dattes (Chehema et Longo, 2001)

MS % de		MO	MM	MAT	CB	NDF	ADF	CV	HCO SE	LIGN	CI
Palmes	94,37	±0,13	±3,13	±0,40	±0,30	±0,16	±0,74	±2,31	±2,81	±2,36	±0,69
	93,98	±0,01	±0,01	±0,35	±0,17	±0,26	±0,06	±2,67	±0,63	±2,99	±0,05
Paille	93,76	±0,06	±0,06	±0,27	±2,24	±2,40	±0,22	±2,26	±2,19	±2,39	±0,09
De	90,40	±0,06	±0,06	±0,11	±1,53	±0,50	±0,03	±0,16	±0,12	±1,60	±0,08

MS : matière sèche; **MO** : matière organique; **MAT** : matière azoté totale; **MM** : matière minérale; **CB** : cellulose brute; **NDF** : paroi totale; **ADF** : lignocellulose, **CV**: cellulose vraie; **HCOSE** : hémicellulose; **LIGN** : lignine; **CI** : cendres insolubles

Généralement il est possible d'avoir les fibres lignocellulosiques contenus dans les palmes par un simple procédure consistant à couper les feuilles du palmier dattier en petits morceaux approximativement de 5 cm long et 10 mm de large. Il est ainsi possible d'évaluer la fraction de la cellulose, des hémicelluloses, et de la lignine (Baali, 2012)

Tableau 3 : Composition chimique des fibres de palmier dattier avant (Fibres sèches crues de palmier) et après (fibres (oxydées) modifiées) le traitement chimique. **(Baali, 2012)**

Constituant	Fibres brutes sèches de palmier (%)	Fibres oxydées (%)
Cellulose	35	46
Hémicelluloses	28	34
Lignine	27	12

Cette composition chimique riche en sources cellulose et l'abondance de la matière d'origine phénolique appelle forcément à une réflexion approfondie quant à la meilleure manière de leur mise en valeur.

5 FORME ET VOIE DE VALORISATION DE LA BIOMASSE DU PALMIER DATTIER

5.1 LA BIOMASSE DU PALMIER DATTIER

Dans les régions sahariennes, le palmier dattier offre une large gamme de sous-produits agricoles, utilisés traditionnellement à des fins domestiques et au-delà des potentialités agricoles, l'augmentation de la production de sous-produits de palmier dattier entraînant une accumulation des déchets dans le milieu environnementale et cela nuire notre environnement. **(Bouziani et Abdelli, 2017 ; Chehma et Longo, 2001)**. En effet, 18 millions de palmier dattiers sont cultivés en Algérie sur une superficie totale estimée à 169.380 hectares, ce qui produit en parallèle une grande quantité de déchets, qui peuvent être responsables des problèmes phytosanitaires et qui doivent être promue pour réduire leur impact sur l'environnement **(Babahammi, 2014)**.

Ces déchets sont estimés à l'ordre de 21 à 120 kg par pieds. Ces valeurs sont prédites en fonction de la composition de la parcelle dans l'oasis (tableau 4). **(Kadri, 2019)**

Tableau 4 : Evaluation des déchets du palmier dattier (Ben salah, 2012)

Type	Quantité en kg	Observations
Palme	16	16 palmes de 1 kg de moyenne (0.5 base du pétiole et 0.5 du rachis penné)
Spathe vide	4	Sur la base d'une production annuelle moyenne de 8 spathes de 0.5 kg de poids sec
Fibrillium (lif)	1	Produit de taille des bases des rachis foliaires
Total	21	

6 SITUATION LOCALE ET INTERNATIONAL DE LA GENERATION DES DECHETS DES PALMIERS DATTIERS

Les observations de la pratique agricole phoenicicole permet de constater une accumulation des sous-produits de palmier dattier sur les périmètres agricoles dans les oasis algériennes surtout dans willaya d'Adrar qui exporte une quantité très importante de ces déchets et cela revient au nombre très important des palmiers plantés (environ 2.288.687 pieds sur une superficie de 16.405 hectares en agriculture intensive et 1.463.400 pieds sur 1.1469 hectares en agriculture extensive recensé pendant la campagne agricole 2014-2015. **(ITDAS, 2016)**

En agriculture générale, on compte plus que 1.1 million de tonnes de déchets végétaux par an pour tous les pays du MENA (Afrique du nord et moyen orient) et dont près de 758 000 tonnes sont originaires de palmier et le reste d'arbres fruitiers divers (tableau 5).

Tableau 5 : Evaluation de la quantité de déchets du bois du dattier dans la région du MENA (moyen orient et nord d’Afrique) basée sur le nombre des pieds du palmier et arbre fruitiers(Kadri, 2019)

Pays	Effectif total des palmiers (×1000)	Estimation des déchets produits par ans En Mille Tonne
Algérie	13 800	289,80
Egypte	12 500	262,50
Maroc	4 954	104,03
Tunisie	4 510	94,71
Jordanie	315	6,65
Total	36 079	757,66

7 FORMES TRADITIONNELLES D’EXPLOITATION DES SOUS-PRODUITS DATTIERS

Mise à part 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 :

- tronc d’arbre, utilisé dans l’ébénisterie traditionnelle, bois de chauffage et charpentes de bâtiments.
- palmes sèches, utilisées comme clôtures, brises vent, dans la confection de couffins, de chapeau, etc., ils peuvent même servir en industrie de papier.
- les régimes de dattes, comme balais traditionnels, et comme combustibles.
- auparavant, le lif pour la confection des semelles de sandales et le lagmi, boisson alcoolisé, représentant la sève qui s’écoule du stipe. (Chehema et Longo, 2001)



Figure 8 : Vanneries à base de folioles de palmier dattier (BEN SALAH, 2014)

8.3 USAGE DES PALMES EN LUTTE CONTRE LA DESERTIFICATION

Dans les zones sahariennes et désertiques pré-oasiennes, le phénomène de la désertification demeure très menaçant. Rien qu'en Algérie, pas moins de 40 millions d'hectares sont menacés par la désertification selon les chiffres de la Direction générale des forêts (DGF). Les palmes sont utilisés en lutte contre la désertification. Les palmes sont utilisés comme brise vents pour permettre la régénération de la végétation sur les dunes stabilisées (figure 9). (Bouziane et Abdelli, 2017)



Figure 9 : Usage des palmes en lutte contre la désertification et en clôture des parcelles oasiennes. (Bouziane et Abdelli, 2017)

8.4 USAGE DU BOIS DU DATTIER OU STIPE

8.4.1 Définition

Le tronc, qu'on appelle plus justement « stipe » (figure 10), est cylindrique, c'est-à-dire d'un même diamètre de base en haut, sauf à la base, où l'on trouve les racines respiratoires. Mais le stipe ne sera d'un diamètre vraiment constant que si la croissance de l'arbre a été régulière depuis son plus jeune âge. (Baali, 2012)



Figure10: Le tronc (stipe) du palmier dattier (Baali, 2012)

Les troncs de dattier à la fin de sa vie ou s'il est abattu peuvent servir de bois de construction, comme poutres ou comme bois de toiture. Les stipes ont été aussi utilisés pour confectionner les ponts dans les parcelles oasis permettant d'ouvrir des sentiers de passage dans la chevelure de rigoles et de conduites de drainage toujours présentes dans les paysages oasiens. (Kadri, 2019)

8.5 USAGE DES DECHETS DU PALMIER DATTIER EN COMPOSTAGE

Le compost est défini : comme le substrat riche en cellulose, hémicellulose, en azote, en eau et en éléments minéraux ns. En d'autres termes, le compost est d'une couleur brunâtre qui ressemble à du terreau, il provient de la décomposition contrôlée de la matière organique par des microorganismes macroscopiques et microscopiques. (Bouziane et Abdelli, 2017)

Le compostage se pratiquait déjà à l'époque de nos ancêtres dans les oasis, ils ont utilisé le fumier de la ferme issue de l'élevage pour fertiliser leur sol (figure11). Avec le temps les agriculteurs ont changé leurs pratiques et ont la tendance d'utiliser les produits phytosanitaires synthétisés. L'agriculture conventionnelle n'a pas été donc recommandé récemment, car elle est coûteux d'une part et néfaste pour la santé humaine et l'environnement d'une autre part, la tendance aujourd'hui en agriculture c'est de produire tous ce qui bio sans introduites les produits chimiques. (Anonyme 2, 2018)



Figure11 : Usage des déchets du palmier en compostage (Ben sallah, 2014)

Ils avaient déjà compris qu'en apportant régulièrement des déchets d'origine végétale et animal à leurs sols, celui-ci devenait plus fertile. En effet le compost qui ressemble à de la terre, est beaucoup plus riche en éléments minéraux; il constitue donc un excellent engrais naturel. (Lacour, 2012)

Le compost est obtenu par la dégradation de la matière organique (feuilles, bois, fumier, résidus agricoles et alimentaire...) (figure 12), comme cela se passe dans la nature. C'est ce processus que l'on appelle le compostage. (Anonyme 2, 2018)

Pour faire un bon compost, il faut :

- Des résidus organiques (dans notre cas les palmes secs 75% + le fumier 25%)
- De l'eau (humidité)
- De l'air
- De la main d'œuvre (qui surveille le processus de dégradation), cette main d'œuvre se compose quant à elle de 1% d'intervention humaine et 99% d'intervention des microorganismes, bactéries, champignons, insectes et vers, bref une main d'œuvre entièrement naturelle. (Damien, 2004)



Figure 12 : Différentes opérations de préparation pour compostage des sous-produits oasisiens en station Compilation (Ben Salah, 2014)

8.6 LES MODES DE COMPOSTAGE

- Le compostage en fosse.
- Le compostage en tas
- Le compostage en composteur.

CHAPITRE02

**USAGE DES DECHETS DU PALMIER
DATTIER COMME BIOCARBURANT**

9 CHAPITRE 02 : USAGE DES DECHETS DU PALMIER DATTIER COMME BIOCARBURANT

9.1 LA BIOMASSE

La biomasse désigne l'ensemble de la matière organique d'origine végétale et animale. Elle fut la source d'énergie la plus exploitée par l'homme. (**Kara Ali, 2014**). La littérature évoque plusieurs définitions de la biomasse qui sont très similaires dans leur connotation scientifique. Ainsi, **Cherisey, 2007** définit la biomasse en tant que la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales, de la sylviculture et des industries connexes ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers.

9.2 LA BIOMASSE AGRICOLE ET L'HOMME

La biomasse lignocellulosique représente une des ressources renouvelables les plus abondantes sur terre, et certainement l'une la moins coûteuse. Sa conversion en éthanol à usage carburant devrait permettre de subvenir à une partie des besoins énergétiques, couverts jusqu'à présent essentiellement par les produits dérivés du pétrole, tout en générant de nouvelles opportunités pour le monde agricole. (**Claude Ogier et al, 1999**). Dans les passages suivants nous allons passer en revue les différentes formes de biomasses d'origine agricole et dans un second temps on traitera les possibilités et les différentes potentialités de la biomasse du palmier dattier en tant que matière source de sucre fermentescible pour la production du bio-carburant (éthanol)

Les premières utilisations de la biomasse remontent aux débuts de nos origines à la Préhistoire: en effet, nos ancêtres utilisaient déjà la biomasse pour allumer le feu pour se chauffer, pour s'éclairer ou pour cuire leurs aliments. (**Jaecker, 2015**). Jusqu'au 18ème siècle, le bois a resté le principal combustible utilisé dans les maisons et les entreprises pour le chauffage et la cuisson. Il sera également utilisé de manière intensive jusqu'à la première révolution industrielle, notamment pour alimenter les machines à vapeur et les aérostats.

9.3 DEVELOPPEMENT DES BIO-CARBURANTS

C'est en 1876, que Nicolas August Otto proposa le premier moteur à combustion utilisant de l'éthanol. Suivi en 1900 par Rudolf Diesel qui conçoit le premier moteur fonctionnant à l'huile végétale avec de l'huile d'arachide. Ainsi sont nés les premiers biocarburants. Dès 1890, le charbon commence à remplacer le bois pour la production de vapeur puis en 1910, à faire son apparition dans les habitations. Toutefois, c'est réellement après 1945, quand le prix du pétrole devient faible, que la biomasse sera vraiment délaissée au profit d'énergies moins coûteuses telles que le pétrole et le charbon. Heureusement, la tendance s'inverse en 1970 et une prise de conscience quant à la pollution des énergies fossiles permet le grand retour de la biomasse. (Anonyme 3, 2019)

9.4 RESSOURCES DE BIOMASSE

Les filières agricoles, forestières et l'industrie agro-alimentaire sont les principaux fournisseurs de la biomasse (FENNOUCHE, 2017). Les activités anthropique qui travaillent la matière d'origine vivante, y compris du bois (industries agro-alimentaires, papetières, de transformation du bois, etc...) générant aussi des coproduits, des déchets organiques (notamment les boues de stations d'épuration) ou des effluents d'élevages (De Cherisey, 2007). Cette forme de biomasse est propice pour une mise en valeur énergétique par la production de biodiésel, bioéthanol, bio méthane et l'hydrogène.

Les experts différencient deux types de biomasse à base de plantes à savoir ; la biomasse végétale et la biomasse agricole.

9.5 BIOMASSE VEGETALE

La biomasse végétale est constituée principalement de matière organique ainsi que de matière inorganique en plus faible quantité. La matière organique à l'échelle macro moléculaire consiste en la cellulose, l'hémicellulose, la lignine et des matières extractibles. (Fenouche, 2017)

9.6 LA BIOMASSE AGRICOLE

Se définit comme l'ensemble des matières organiques produites et issues des systèmes agricoles : viande, lait, cultures, herbe, résidus de culture, effluents d'élevage. la tension sur la biomasse agricole risque d'engendrer des conflits d'usage qu'il faut gérer au mieux

particulièrement dans un contexte de demande croissante de produits agricoles à des fins alimentaires, énergétiques et matières, et de diminution des surfaces agricoles. **(Saidi, 2011)**

Beaucoup pensent que la biomasse est une ressource renouvelable, en oubliant qu'elle est limitée dans le temps et dans l'espace. Ce qui invite à des priorités d'usages aux différents stades de production. En fait, la demande croissante en cette ressource naturelle ne doit en aucun cas entraîner une intensification ou usage à outrance au risque d'agir de manière néfaste sur l'environnement. L'enjeu est donc évident ; combiner la performance technique et le respect de l'environnement. **(Anonyme 4, 2014)**

9.7 L'USAGE DE LA BIOMASSE AGRICOLE

Le principe d'obtenir de l'énergie à partir de la biomasse consiste à transformer des matières ou des déchets renouvelables d'origine végétale ou animale en énergie. Les déchets agricoles, domestiques, ou industriels, est largement utilisée à travers tous les pays, pour produire de la chaleur essentiellement dans la mesure où une tonne de déchets organiques secs équivaut à une tonne de charbon. **(Mogg, 2004)**

L'énergie biomasse englobe plusieurs segments selon son format d'exploitation. Dont laquelle on cite ces principales utilisations :

Le bois-énergie est la plus ancienne et la plus simple des méthodes d'exploitation de la biomasse. Il s'agit tout simplement de la combustion de bois, de déchets agricoles, industriels et domestiques d'origine végétale. La chaleur ainsi produite dans des centrales ou par cogénération peut être utilisée pour la cuisson, le chauffage, la production d'eau chaude et la production d'électricité. **(Paillet et Taillades, 2013)**

9.8 LE BIOETHANOL, LE PRODUIT NOBLE DE LA BIOCONVERSION DE LA BIOMASSE

Les biocarburants sont nés de la recherche d'une alternative à la dépendance au pétrole. Au fil du temps, ils sont aussi devenus une source de préoccupation affectant divers secteurs d'activités économiques, en particulier celui de l'agriculture. **(Chniti et al, 2014)**

Depuis des décennies, les carburants à base de pétrole ont acquis une position dominante dans le secteur du transport routier selon la Commission des Communautés européennes et ceci dès les années 1930. Dans les années 1970, la production d'éthanol à base de canne à

sucre a pris son envol au Brésil pour lutter contre la hausse des prix du pétrole et, en même temps, pour améliorer l'autonomie énergétique de ce pays.

En Amérique du Nord, plus précisément aux États-Unis, après le premier choc pétrolier de 1973-1974, les États-Unis qui cherchaient à diversifier leurs sources d'énergie, se sont lancés dans des programmes de production de bioéthanol. Dès lors, le bioéthanol était donc considéré comme un substituant stratégique aux carburants fossiles dans ce pays. **(Laouar, 2020)**

De nos jours, les changements climatiques, la dégradation et la pollution de la biosphère deviennent un sujet de préoccupation majeure dans un contexte d'explosion démographique, de menace de la sécurité alimentaire, d'industrialisation galopante et de demande d'énergie sans cesse croissante. Cette énergie, qui a rendu possible le développement industriel dans plusieurs régions du monde. **(Irenee et al, 2011)**

Il permet également de diminuer les émissions de gaz à effet de serre, comparativement aux carburants d'origine fossile. En effet, les matières agricoles utilisées pour sa fabrication absorbent le CO₂ en quantité importante. **(Bouali, Khelif et Kaidi, 2018)**

Très récemment des experts ont proposé une nouvelle nomination aux biocarburants et préfèrent plutôt parler d'agro-carburants. **(Jaecker, 2015)**

9.9 LES GENERATIONS DES BIOCARBURANTS

On distingue trois générations des biocarburants selon l'origine de la biomasse :

La première génération : il s'agit de l'utilisation des sucres de réserve des plantes: les graines des céréales (blé, maïs stockent l'amidon) ou des oléagineux (colza, tournesol, Jatropha stockent les huiles), les racines de la betterave ou la canne à sucre et les fruits du palmier stockant les sucres (figure 13). Ces organes de réserves étant également utilisés pour l'alimentation humaine. L'inconvénient majeur de cette génération de biomasse c'est que sa production se fait en concurrence avec la production alimentaire et engendre une utilisation intensive des ressources naturelles et l'emploi des produits chimiques nécessaire à l'amélioration de la production. **(Anonyme 5, 2010)**



Figure 13 : Source de biomasse pour les biocarburants de première génération (Saïd, 2016)

9.10 BIOETHANOL A PARTIR DE PLANTES SUCRIERES OU AMYLACEES

Les plantes sont mises à fermenter dans des bioréacteurs contenant des micro-organismes transforment des sucres en éthanol. Dans le second cas l'amidon est facilement séparé des autres composants et dégradé en sucres simples. Ces derniers sont fermentés par des acteurs microbien organismes pour produire de l'éthanol. L'éthanol est par la suite récupéré par distillation. (David, 2015)

La figure ci-dessus présente de façon schématique le processus de production de bioéthanol à partir de céréales (figure 14). Suivant l'état de polymérisation des polysaccharides, les polymères doivent subir un (ou plusieurs) traitement(s) préalable(s), dont le but est de transformer les chaînes de polymères en sucres simples. La distillation permet de recouvrer un éthanol hydraté à 95-96% v/v, puis la déshydratation donnera un produit plus affiné (éthanol anhydre à 99,7% v/v).

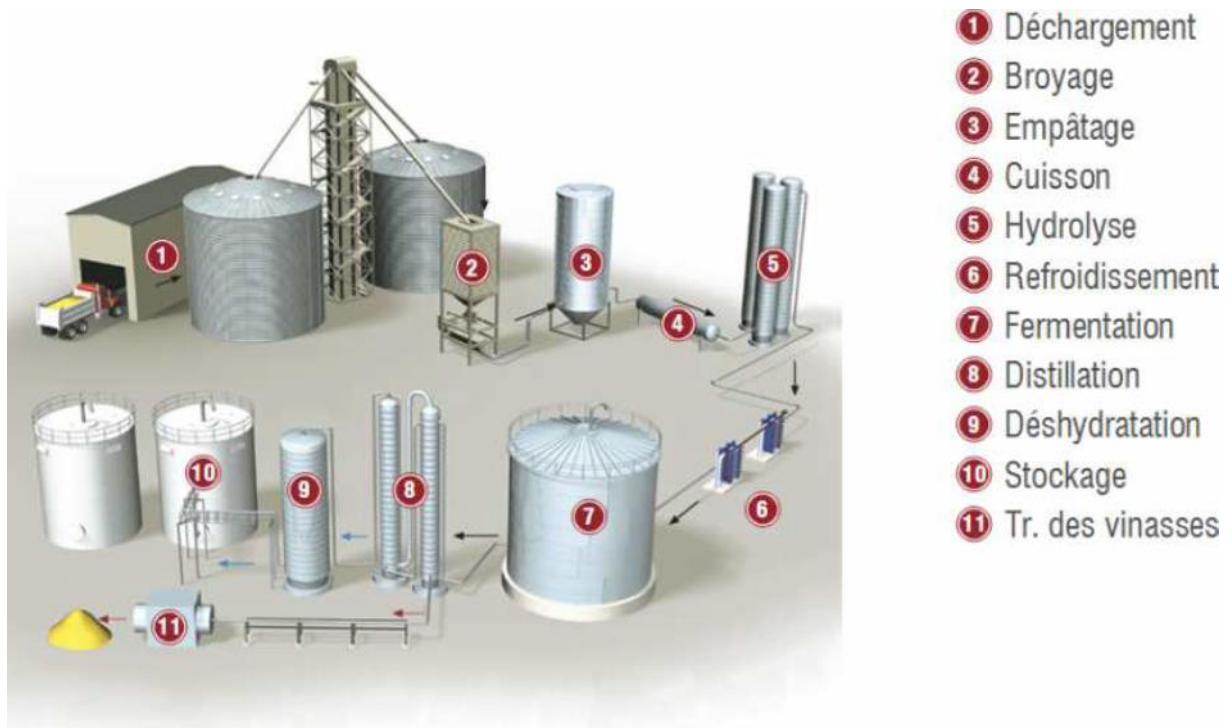


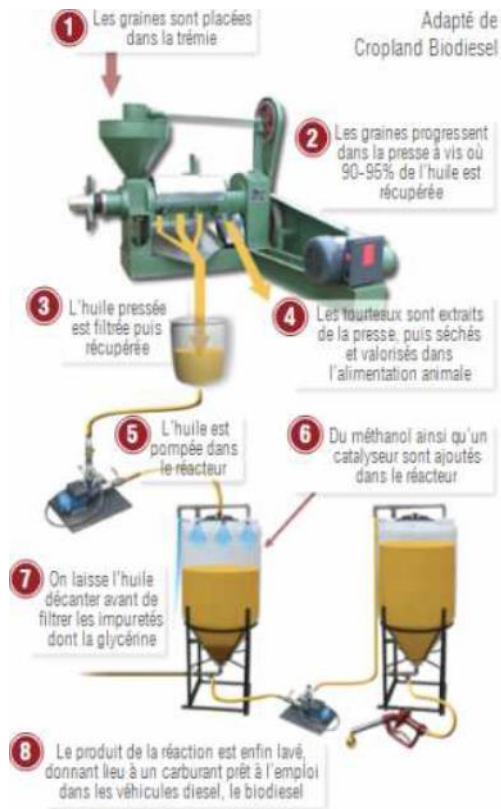
Figure 14 : Processus de production de bioéthanol à partir de céréales.

L'étude de l'alimentation des moteurs a montré que l'éthanol est compatible avec la majorité des moteurs à essence. Il est transformé par réaction catalytique avec de l'isobutènes (produit pétrolier) pour produire de l'ETBE, qui est incorporé à l'essence à un taux pouvant aller jusqu'à 15%. (David, 2015)

9.11 BIODIESEL A PARTIR DE PLANTES OLEAGINEUSES

Les plantes riches en huiles, comme le colza, le soja, le tournesol ou le palmier à huile, et également les huiles animales ou les huiles de cuisson usagées, sont employées pour produire du biodiesel. (DAVID, 2015). Les huiles végétales s'obtiennent classiquement par simple pressage de graines oléagineuses.

Les huiles végétales hydrogénées (HVO) qui subissent un hydrotraitement (ajout d'hydrogène) sont classées en 1ère génération ou en génération 1,5 de par l'origine de la biomasse (huile végétale). Cette opération permet de fabriquer un sous-produit du glycérol, encore appelé glycérine est rarement utilisé pur, mais le plus souvent par incorporation au diesel dans des proportions de 5 à 30%, pour donner ce qui est appelé en France le Diester (figure 15). (LAOUAR, 2020)



- 1 Déchargement
- 2 Pressage
- 3 Filtration
- 4 Extraction des tourteaux
- 5 Pompage
- 6 Ajout des réactifs
- 7 Transestérification et décantation
- 8 Lavage



Figure 15 : Processus de fabrication de biodiesel ou diester.

9.12 LES BIOCARBURANTS DE DEUXIEME GENERATION

Les biocarburants de 2ème génération (figure 16) utilisent l'intégralité de la lignocellulose des plantes de la partie non comestible des végétaux, ou de la biomasse (bois, paille, déchets, résidus agricoles et forestiers, cultures dédiée). (David, 2015)

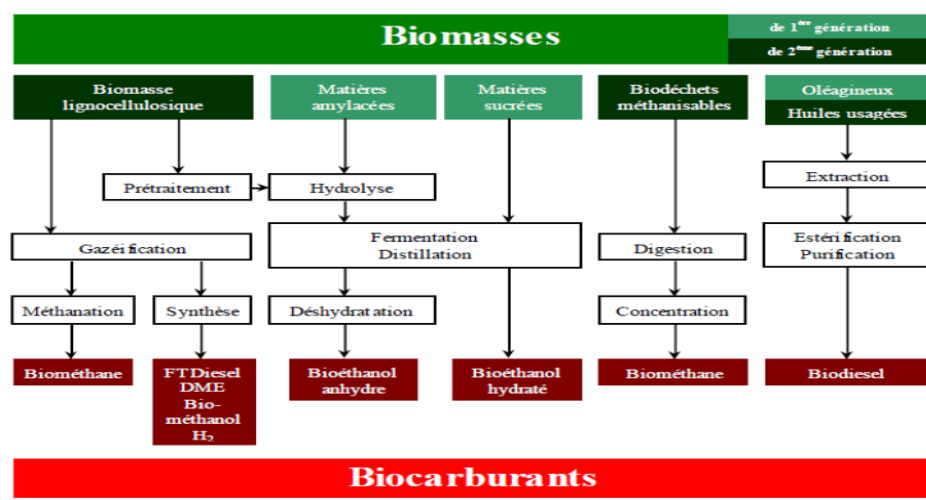


Figure16 : Diagramme de synthèse des biocarburants de 1ère et de 2ème génération.

En effet, les molécules de départ (cellulose, hémicellulose et lignine) sont étroitement liées pour former la structure rigide des plantes, et sont très difficiles à séparer. C'est pourquoi la biomasse doit subir un prétraitement thermochimique qui sépare les composants. (David, 2015)

Une hydrolyse enzymatique des matières premières, suivie d'une fermentation alcoolique des sucres libérés, puis d'une distillation permettant de récupérer des alcools : l'éthanol mais aussi des alcools dits « lourds » (longueur de chaîne carbonée de plus en plus importante) comme le butanol. (Anonyme 5, 2010)

Aujourd'hui, les procédés utilisés lors de prétraitement sont l'explosion à la vapeur, la thermo hydrolyse à 200°C ou encore l'utilisation d'acide dilué (figure 17).

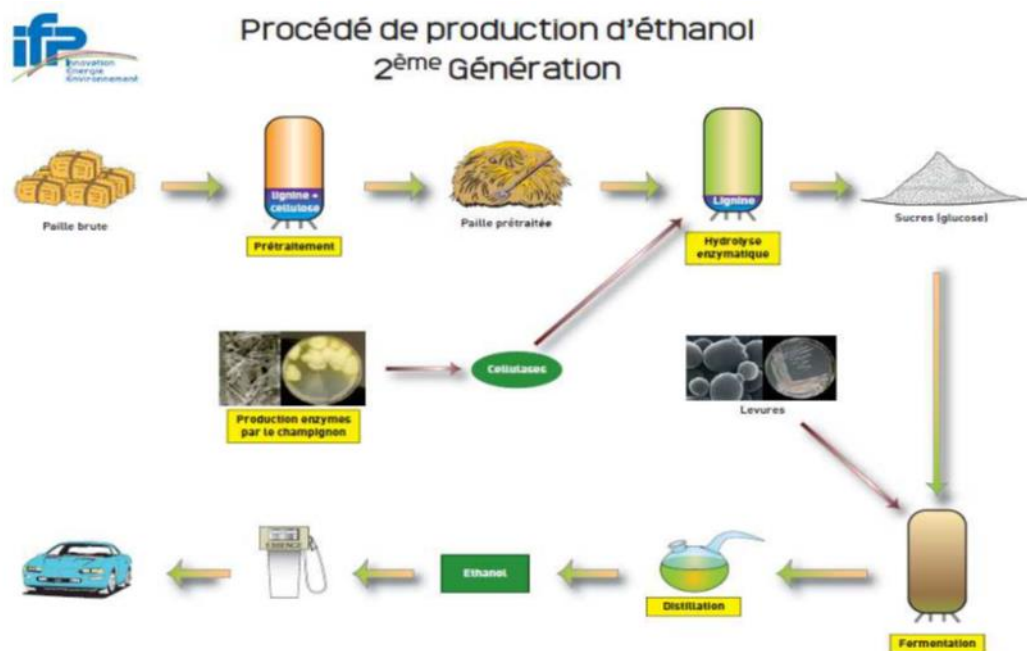


Figure 17 : Procédé de production d'éthanol 2^{ème} génération (Bounoua, 2017)

9.13 LES BIOCARBURANTS DE TROISIEME GENERATION

En cours de développement, seront produits par des micro-organismes à partir des lipides ou hydrocarbure. (David, 2015, Jaecker, 2015)

Les biocarburants à partir de micro algues appelé "Algocarburant" est souvent présenté comme le biocarburant de troisième génération. Il est obtenu à partir des cultures de micro algues (figure 18). D'un point de vue théorique 30 à 100 fois plus efficaces que les oléagineux terrestres, que des agro carburants pourront être produits avec les meilleurs rendements,

rendant ainsi envisageable une production de masse, sans déforestation massive ni concurrence avec les cultures alimentaires. (Asther et al, 2006)

Une autre définition repose sur les moyens utilisés pour produire le carburant avec d'une part les biocarburants produits à partir de processus techniques simples et d'autre part ceux produits à partir de techniques avancées. Enfin, la plupart de ces biocarburants de génération avancée sont au stade de recherche et développement, les difficultés technico-économiques sont fortes. (Anonyme 6, 2015)

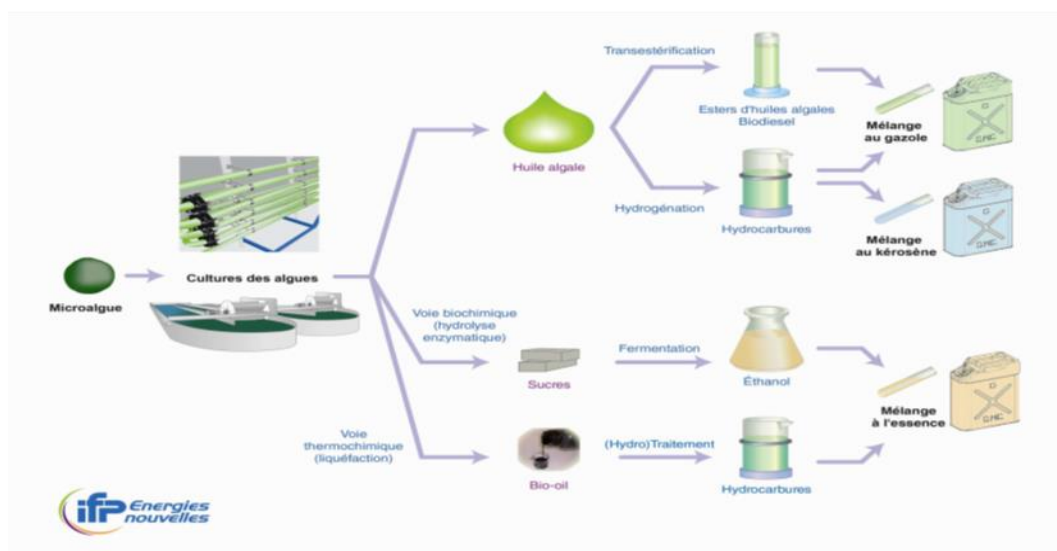


Figure 18: Utilisation du CO₂ émis pour la croissance des plantes. (Jaecker, 2015)

9.14 MODE DE PRODUCTION DU BIOETHANOL PAR LA FERMENTATION DE LA BIOMASSE

Le bioéthanol est l'alcool éthylique obtenu à partir de la biomasse (maïs, blé...) ou de betteraves ou bien d'autres sources lignocellulosiques. Il est obtenu par la fermentation des sucres contenus dans ces matières végétales. (Irennée et al, 2011)

Sa formule brute C₂H₅OH est usuellement désigner par l'abréviation EtOH, il est produit chimiquement par hydratation catalytique directe de l'éthylène (CH₂ = CH₂) et biologiquement par fermentation alcoolique. Lorsque le substrat de la fermentation est une biomasse lignocellulosique, on procède d'abord à un prétraitement qui vise à modifier les propriétés physiques et physicochimiques, telles que le degré de polymérisation de la matière lignocellulosique, et donc des fractions celluloses et hémicellulosiques. Ce prétraitement est suivi de l'hydrolyse des polysaccharides (cellulose et hémicellulose) en monosaccharides

(hexoses et pentoses) avant la fermentation proprement dite qui conduira à la production du bioéthanol (figure 19). (Thonort et al, 2010)

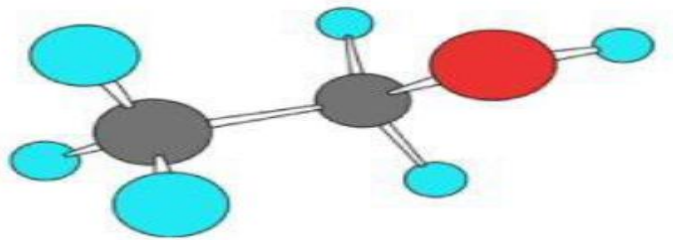
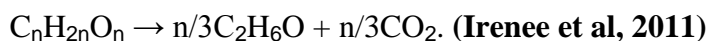


Figure19 : Molécule de l'éthanol (Bounoua, 2017)

La conversion des pentoses et des hexoses en éthanol fait l'objet de différentes voies de transformation. En effet, ces sucres peuvent être transformés par la voie des pentoses phosphates, la glycolyse, la voie d'Entner-Doudorof, etc. Dans la mesure où certaines enzymes sont spécifiques à un microorganisme, il est à noter que la voie de transformation des sucres en éthanol diffère suivant les microorganismes utilisés pour la fermentation. L'équation générale de production du bioéthanol à partir des monosaccharides est la suivante :



9.15 PROPRIETES DE BIOETHANOL

9.15.1 Caractéristiques physico-chimique de l'éthanol

L'éthanol est un liquide incolore, volatil, d'odeur plutôt agréable, décelable dès 84 ppm. Il est miscible à l'eau, le mélange se faisant avec dégagement de chaleur et contraction du liquide.

L'éthanol est également miscible à la plupart des solvants usuels. C'est un bon solvant des graisses. Il possède les propriétés générales des alcools primaires (réactions d'oxydation, déshydrogénation, déshydratation et estérification).

Tableau 6 : Caractéristiques physico-chimiques de l'éthanol. (Bounoua, 2017)

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

PARTIE
EXPIRIMENTALE

10 CHAPITRE 03: MATERIEL ET METHODES

Au départ nous avons envisagé de réaliser un travail expérimental pour tester la biomasse à base de palme et de tronc du palmier dattier et déterminer le rendement en éthanol après sélection des souches de levures à fort pouvoir fermentaire. Malheureusement et suite à la pandémie de coronavirus, notre travail a été revu en une étude descriptive des travaux réalisés dans ce cadre et comparer les paramètres et les conditions expérimentales de bioconversion des biomasses d'origine différents et déterminer les meilleurs solutions aux éventuels problèmes de rendement ou d'échec de la fermentation.

En premier temps nous allons décortiquer le procédé de production de bioéthanol depuis le traitement de la matière première ou la biomasse jusqu'à la purification et la déshydratation un produit fini (bioéthanol).

10.1 PHASES DE PRODUCTION DE BIOETHANOL

Selon la biomasse utilisée, les phases de production de bioéthanol sont les suivantes:

L'extraction du jus après broyage, la dilution, l'hydrolyse de l'amidon dans le cas des plantes amylacées, la fermentation, la récupération, la distillation et la déshydratation sur tamis moléculaire.

10.2 PRETRAITEMENT :

Il ne s'agit pas du conditionnement du végétal proprement dit qui consiste généralement en un broyage/découpage des matériaux fibreux, mais du traitement nécessaire pour rendre la cellulose accessible à l'hydrolyse .Cet objectif peut être atteint de plusieurs manières selon : **(Kechkar et Aziza, 2012):**

- en abaissant la teneur en lignine et hémicellulose du substrat à traiter,
- en augmentant la porosité de la matrice.
- en diminuant la cristallinité de la cellulose ou en augmentant sa surface spécifique.

Cela se fait selon deux types de procédés : physique et chimique

10.3 PROCEDES PHYSIQUES :

- Broyage mécanique intense (fragments <2mm)
- Thermolyse (chauffage à $T < 300^{\circ}\text{C}$ suivi d'une hydrolyse acide –pyrolyse-)
- Procédés physico-chimiques -Thermohydrolyse (cuisson sous forte pression à 200°C pendant 15 à 60minutes permettant la solubilisation de l'hémicellulose et de la lignine).
- Explosion à la vapeur (injection de vapeur à haute pression pendant quelques secondes suivi d'une détente brutale à pression atmosphérique).
- Explosion à la vapeur en conditions acides (identique à la précédente mais en milieu acide)
- Procédé AFEX (Ammonia Fiber Explosion)
- Explosion au CO_2 . (**Bounoua, 2017**)

10.4 PROCEDES CHIMIQUES :

- Prétraitement à l'acide dilué à chaud.
- Prétraitement en milieu alcalin (qui conduit à une solubilisation quasi-totale de la lignine et d'une partie des hémicelluloses et à un gonflement des fibres de cellulose ainsi rendues beaucoup plus accessibles aux enzymes).
- Le procédé Organosolv consiste à solubiliser et extraire la lignine et les hémicelluloses dans un solvant organique.
- Procédés d'oxydation chimique, notamment l'ozonolyse ou l'oxydation Humide.

Tableau 7 : Principaux procédés de traitement (Leticia et al, 1997)

<p>Procédés physiques</p>	<p>-Broyage mécanique intense (fragments <2mm)</p> <p>-Thermolyse (chauffage à T<300°C suivi d'une hydrolyse acide)</p>
<p>Procédés physico-chimiques</p>	<p>-Thermohydrolyse (cuisson sous forte pression à 200°C pendant 15 à 60 minutes permettant la solubilisation de l'hémicellulose et de la lignine).</p> <p>-Explosion à la vapeur (injection de vapeur à haute pression pendant quelques secondes suivi d'une détente brutale à pression atmosphérique).</p> <p>-Explosion à la vapeur en conditions acides (identique à la précédente mais en milieu acide)</p> <p>-Procédé AFEX (Ammonia Fiber Explosion)</p> <p>Explosion au CO2.</p>
<p>Procédés chimiques</p>	<p>-Prétraitement à l'acide dilué à chaud.</p> <p>Prétraitement en milieu alcalin (qui conduit à une solubilisation quasi totale de la lignine et d'une partie des hémicelluloses et à un gonflement des fibres de cellulose ainsi rendues beaucoup plus accessibles aux enzymes).</p> <p>-Le procédé Organosolv consiste à solubiliser et extraire la lignine et les</p>

	<p>hémicelluloses dans un solvant organique.</p> <p>-Procédés d'oxydation chimique, notamment l'ozonolyse ou l'oxydation Humide</p> <p>Procédés biologiques mettant en œuvre des enzymes de type peroxydase ou des champignons lignolytiques.</p>
--	---

D'autres part les procédés biologiques mettant en œuvre des enzymes de type peroxydase ou des champignons lignolytiques.

Le procédé de prétraitement universel et idéal n'existe pas. Les technologies a priori les plus attrayantes sont la Thermohydrolyse, le prétraitement à l'acide dilué et l'explosion à la vapeur (figure 20). (Didderen et al, 2010)

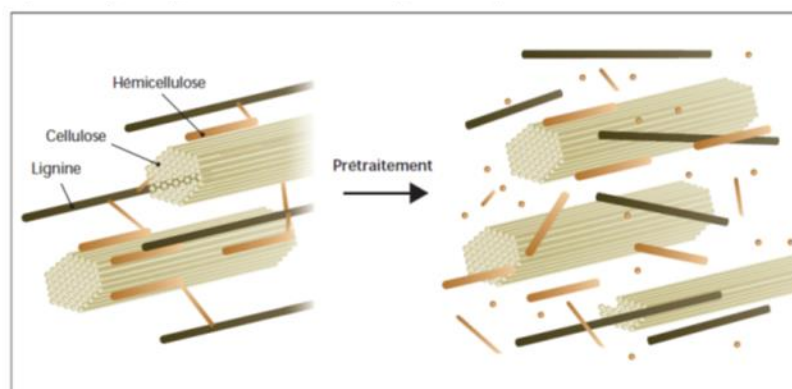


Figure 20 : Impact de prétraitement de sur la matière lignocellulosique (Diddren et al, 2010)

10.5 HYDROLYSE :

Après les prétraitements les produits issus de cette étape sont soumis à l'hydrolyse enzymatique pour décomposer les polymères en unité de sucre fermentescible. Il existe différentes méthodes d'hydrolyse de la lignocellulose. Elles sont classées en deux groupes : hydrolyse chimique et hydrolyse enzymatique. Plusieurs produits peuvent résulter de cette hydrolyse (Figure 21). (**Kechkar et Aziza, 2012**)

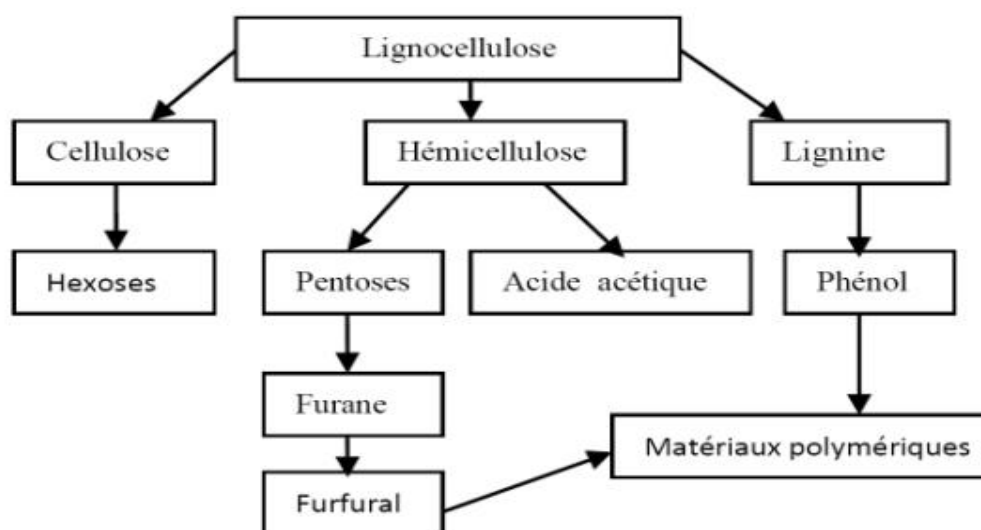


Figure21 : Produits résultants de l'hydrolyse (**Kechkar et Aziza, 2012**)

10.5.1 - L'hydrolyse chimique :

Ces procédés utilisent un ou plusieurs réactifs chimiques dans le but d'hydrolyser à la fois les hémicelluloses et la cellulose. (**Claude Orgier et al, 1999**). Elle implique l'exposition de la lignocellulose à un produit chimique pour une période de temps et une température spécifique (**Kechkar et Aziza, 2012**). L'hydrolyse chimique se fait en deux étapes. La première est semblable au prétraitement par acide dilué et permet de digérer les hémicelluloses et de solubiliser les sucres qui en sont issus. Après séparation, la fraction solide contenant la cellulose est soumise à une nouvelle hydrolyse. (**Caylak et al, 1996**)

10.5.2 Hydrolyse a acide dilue :

Pour rompre les liaisons osidiques et produire des monomères (**Boulal, Khelafi et Kaidi, 2018**). Cette technique utilise une concentration modérée d'acide (0,5 à 1,5 % d'acide sulfurique exprimé par rapport à la matière sèche présente), à des températures comprises entre 180 et 240 °C, pour une durée d'hydrolyse variant de quelques secondes à quelques

minutes dans le cas de réacteurs “piston”. Le rendement maximal en glucose est alors de 55-60 %, mais l’essentiel des pentoses est transformé en furfural.

En résumé, l’hydrolyse à l’acide dilué conduit à des rendements faibles, et ne permet de récupérer généralement que 60 à 70 % des sucres totaux. Les hydrolysats produits en milieu acide dilué sont difficiles à fermenter, en raison de la présence en proportion importante de composés inhibiteurs : furfural, hydroxyméthylfurfural, acide acétique. **(Claude Orgier et al, 1999)**

10.5.3 Hydrolyse à acide concentré :

Ces procédés opèrent à faibles températures, évitant la production de produits de dégradation, et permettant d’atteindre des rendements de récupération des sucres proches de 100 %. Le procédé Bergius utilisait de l’acide chlorhydrique (HCl) concentré en réacteur continu afin de faciliter sa récupération. L’hydrolyse se faisait à 35 °C pendant une heure, avec un rendement de 100 % pour les sucres facilement hydrolysables. Malheureusement, HCl est très difficilement recyclable et très corrosif, et son utilisation dans ce domaine est désormais abandonnée. L’utilisation de l’acide fluorhydrique gazeux a été proposée. Il permettrait d’atteindre des rendements de récupération des sucres de 100 %, mais c’est un réactif 5 fois plus cher que HCl et encore plus toxique. **(Claude Orgier et al, 1999)**

10.5.4 - L’hydrolyse enzymatique :

L’hydrolyse enzymatique par des enzymes spécifiques permet de fragmenter les molécules de cellulose en sucres fermentescibles, les sucres en C6. L’hydrolyse est catalysée par des acides forts ou enzymes (cellulases) **(Anonyme 5, 2010)**. Les enzymes sont produites par différents microorganismes, généralement par des bactéries et des levures. Les microorganismes peuvent être aérobies ou anaérobies, mésophiles ou thermophiles. **(Kechkar et Aziza, 2012)**

L’hydrolyse de la cellulose par des enzymes est souvent la voie préconisée pour l’obtention des sucres fermentescibles pour les raisons suivantes :

- Elle est plus économique,
- Elle génère peu d’effluents à traiter,
- Elle présente des perspectives d’amélioration beaucoup plus grandes que l’hydrolyse chimique qui a fait l’objet de travaux depuis plusieurs dizaines d’années. **(Bai et al, 2008)**

L'hydrolyse de l'hémicellulose, qui nécessite des enzymes différentes, est encore à l'étude car son rendement actuel est faible. (Anonyme 5, 2010)

10.6 LA FERMENTATION

La fermentation des sucres en C6 par des levures est similaire à celle pour la production des biocarburants de première génération mais la présence de lignine dans la biomasse limite la concentration initiale en sucres en C6 et donc la teneur finale en éthanol (Anonyme 5, 2010). Un nombre important de travaux de recherche ont abordé des fermentations différentes avec des bactéries, d'autres levures, voire même des champignons ; mais rien n'est encore transposé. (Laouar, 2020)

Enfin, les sucres en C5 issus de l'hydrolyse de l'hémicellulose sont difficiles à convertir en éthanol et nécessitent des microorganismes fermentaires différents. (Anonyme 5, 2010)

Traditionnellement *Saccharomyces cerevisiae* et *Zymomonas mobilis* sont utilisées pour la fermentation du glucose en bioéthanol. Pour la fermentation des xyloses, on utilise des levures, telles que *Pichiasti pitis*, *Candida shehatae* et *Candida parapsilosis*. (Kechkar et Aziza, 2012)

10.7 LA DISTILLATION

Les étapes de récupération de l'éthanol par distillation/rectification/déshydratation sont identiques à celles des procédés déjà éprouvés de production d'éthanol de 1ère génération.

Le milieu de fermentation porté à ébullition est introduit dans la colonne, tandis qu'on apporte, à la base, de la vapeur d'eau. Après condensation, l'alcool brut est recueilli sous forme de liquide. Une étape de purification est nécessaire pour se débarrasser des composés volatils. Le bioéthanol destiné aux carburants automobiles doit être déshydraté, car l'eau contenue dans l'alcool n'est pas miscible avec l'essence. (Kechkar et al, 2012)

Pour les besoins de commercialisation, l'éthanol est déshydraté par un tamis moléculaire. L'éthanol est alors dit « anhydre ». Un dénaturant y est ajouté en petite quantité (2 à 5 %) afin d'éviter qu'il soit commercialisé sur le marché de l'alimentation humaine. (Bounoua, 2017)

10.8 PROJETS DE PRODUCTION DE BIOETHANOL

Actuellement, les plus grands producteurs mondiaux de bioéthanol se concentrent dans trois régions. En tête : les Etats Unis avec une part de 48 % de la production mondiale de

biocarburants (bioéthanol) ; le Brésil avec 22 % ; l'Union Européenne avec 16 % (2012). Ces trois régions produisent, à elles seules, plus de 86 % de la production mondiale des biocarburants (figure 22). (FENNOUCHE, 2017)

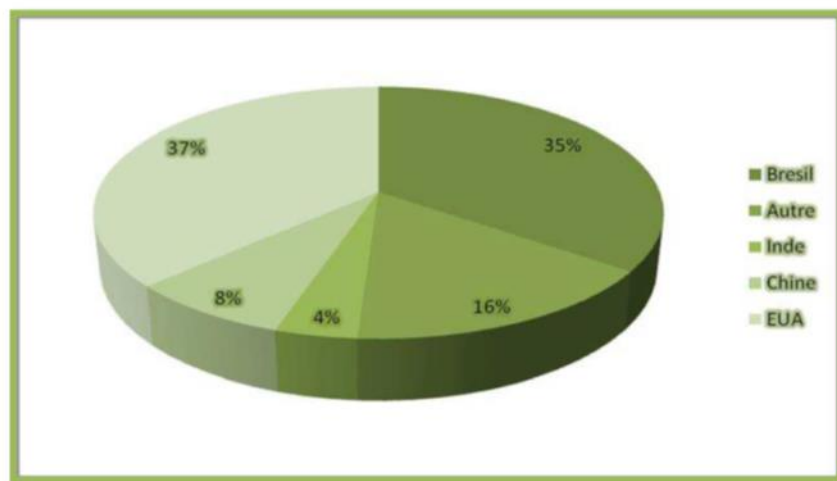


Figure 22 : Distribution de la production mondiale de bioéthanol (2006). (Fennouche, 2017)

Ces trois régions produisent, à elles seules, plus de 86 % de la production mondiale des biocarburants. Ainsi, les Etats-Unis se fixent un objectif de 36 milliards de gallons (136,27milliards de litres) de biocarburants, dont 79,5 milliards de litres provenant de carburants de nouvelle génération. En avril 2009, le Conseil Européen a adopté la Directive 2009/28/CE relative à la promotion et l'utilisation des énergies renouvelables, portant ainsi l'objectif de consommation d'énergie renouvelable dans le secteur des transports à 10%. Par ailleurs, de nombreux pays prévoient d'accroître leur consommation de carburants renouvelables. D'après les projections faites par le FAO et l'OCDE, la production annuelle mondiale en 2020 devrait pratiquement doubler par rapport à la production de 2008 pour atteindre 196,87 milliards de litres. (Didden et al, 2008)

A l'instar d'autres pays américains et européens qui ont développé des programmes industriels intégrés pour la production d'éthanol à partir de biomasse végétale, l'Algérie, possède un potentiel considérable en déchets et sous-produits de dattes ce qui pourrait lancer un pareil programme. La production d'éthanol à partir des déchets de dattes constitue une solution intéressante sur le plan économique. Cet alcool peut remplacer avantageusement celui obtenu par voie chimique à partir des produits pétroliers et peut remplacer le pétrole léger comme carburant. (Fennouche, 2017)

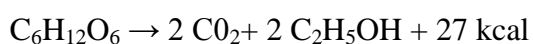
La fermentation est une opération connue depuis les anciens temps. Elle a été utilisée par divers peuples (égyptiens, sumériens, Babyloniens,) pour la préparation de produits alimentaires comme le pain, les fromages, les boissons alcoolisées, etc. Actuellement, la fermentation est utilisée industriellement pour la fabrication de produits d'intérêt alimentaire (yaourts, bière), pharmaceutique (antibiotiques, vitamines, anticorps, etc.) et chimique (bioéthanol, acides gras, etc.) **(Diane, 2014)**

La fermentation alcoolique est concerné les déchets à forte teneur en glucides (amidons ou sucres libres). Ce procédé transforme des sucres fermentescibles par des levures en alcool et gaz carbonique avec dégagement de chaleur. Il existe un grand nombre de microorganismes utilisés pour la fermentation. Cependant peu sont réellement compétitifs en termes de rendement en éthanol par rapport au substrat consommé, de capacité fermentaire, de tolérance élevée à l'éthanol et d'adaptation aux conditions de fermentation. **(Ogier, 1999)**

10.9 CONCEPT DE FERMENTATION ETHANOLIQUE

La fermentation éthanolique est un processus mené par une multitude de microorganismes. Pour ceux-ci, l'éthanol n'est qu'un sous-produit de leur production d'énergie, cette dernière étant essentiellement vouée à leur reproduction. **(Boucher, 2016)**

Le saccharose (sucre à 12 atomes de carbone) est hydrolysé en glucose (sucre à 6 atomes de carbone) grâce aux enzymes de la levure .En l'absence d'air (en anaérobie), la levure met en œuvre un métabolisme fermentatif qui conduit à la formation de gaz carbonique, d'éthanol et d'un peu d'énergie :**(Bai et al, 2008)**



Glucose Gaz carbonique + Ethanol + Energie

Une fermentation se déroule en trois phases, avec tout d'abord une phase de latence, durant laquelle le microorganisme s'habitue à son nouvel environnement. Elle peut être plus ou moins longue selon le stress occasionné par cet environnement. Vient ensuite une phase de développement exponentiel, qui s'achève par une phase stationnaire qui débute quand les nutriments commencent à manquer. La concentration en éthanol atteint alors un maximum, puis peut commencer à décroître. **(Boucher, 2016)**

La fermentation alcoolique (Figure 23) est réalisée dans un milieu riche en sucres. Le moût est introduit dans le fermenteur puis inoculé avec le milieu de pré-fermentation. La

fermentation dure de 40 à 72 heures et la température est fixée ente 28 et 30 °C. (fennouche, 2017)

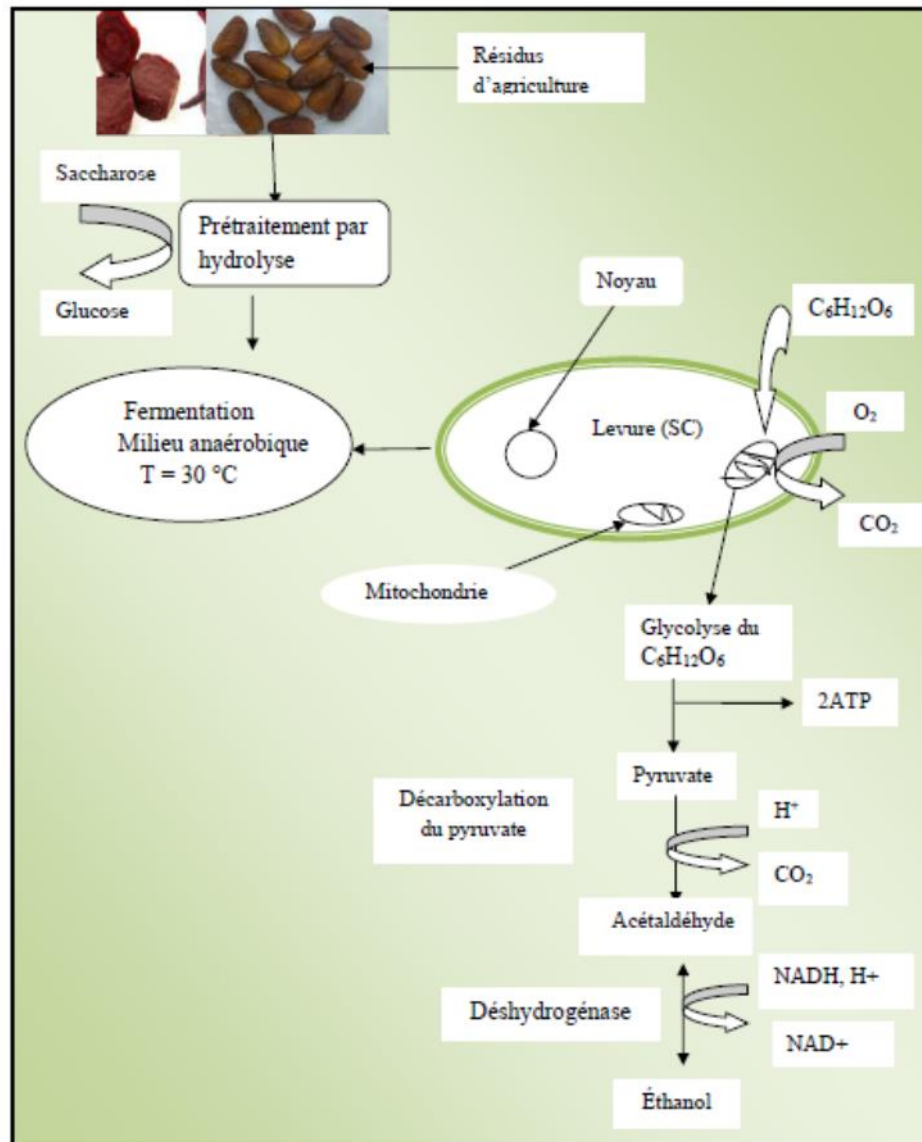


Figure 23 : Principe de la fermentation alcoolique du glucose par la levure (SC).
(Fennouch, 2017)

10.9.1 Micro-organismes utilisés en fermentation

Ce n'est qu'avec les travaux de Pasteur (1866-1876) que le rôle des levures dans la fermentation alcoolique a été mis en évidence. A la même époque, la levure fut à l'origine du développement de la biochimie avec notamment les travaux de Büchner. (Laouar, 2020)

Saccharomyces cerevisiae :

S. cerevisiae est une levure intensément utilisée par l'Homme. Elle est exploitée depuis longtemps dans la fabrication de boissons alcoolisées, comme la bière, ainsi que dans la confection de pain, c'est pourquoi elle est appelée communément levure de bière ou levure de boulangerie. Cette levure est utilisée pour la fermentation d'éthanol de première génération (figure 24). Cette levure utilise comme substrat les hexoses, et peut atteindre des rendements en éthanol de 90—93% par rapport au rendement théorique. (Boucher, 2016)

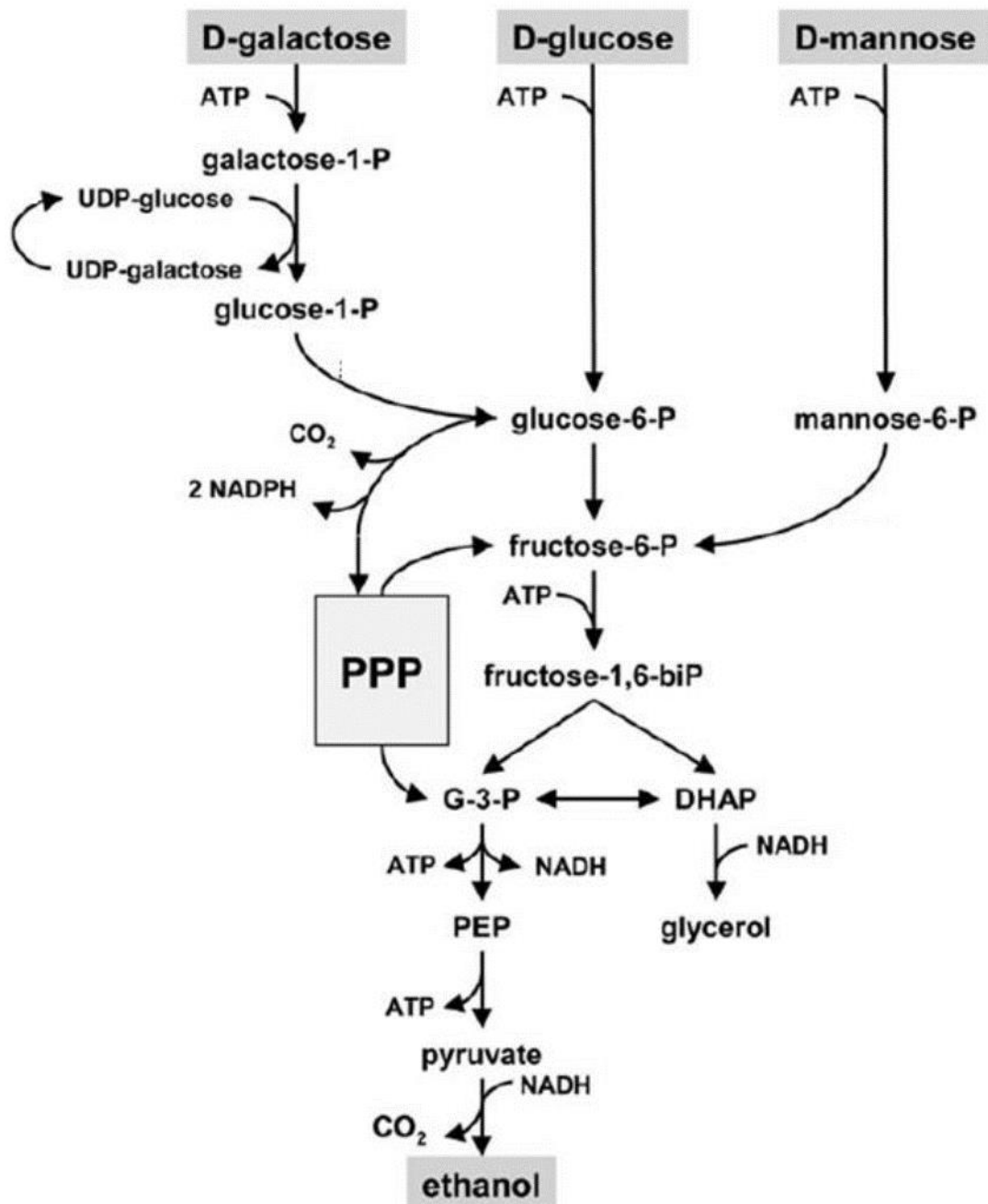
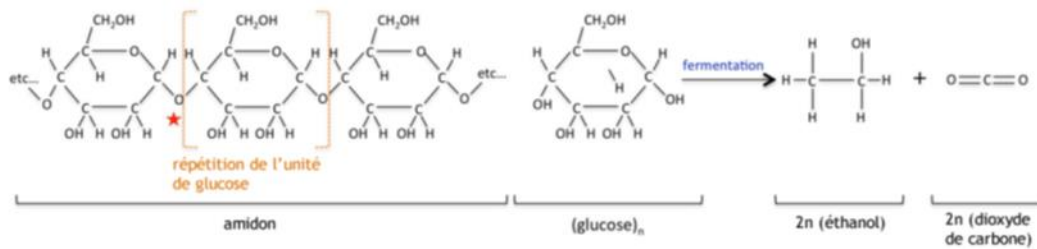


Figure 24 : Voie métabolique de fermentation de *Saccharomyces cerevisiae*.

G-3-P : Glyceraldehyde- 3-phosphate, DHAP : dihydroxy-acetone-phosphate, PEP : phospho-enol pyruvate; PPP : Voie des Pentoses phosphates, NADH : Nicotinamide adénine dinucléotide, NADPH : nicotinamide adénine dinucléotide phosphate (**Boucher, 2016**)

S. cerevisiae présente de nombreux atouts supplémentaires résultant de nombreuses années de sélection : résistance à l'éthanol, mise en œuvre industrielle aisée, etc. (**Ogier, 1999**)

La réaction de fermentation peut être modélisée ainsi (figure 25): (**F. BOUNOUA, 2017**)



continue (fed-batch) et continue (**M. Vitolo, 1996**). (**Figure 11**).

Figure 25 : Réaction de transformation du glucose en éthanol par présence de *S. c*

L'espèce la plus utilisée au niveau industriel est la *S. cerevisiae*. Elle transforme le glucose en éthanol. Actuellement, aucun autre micro-organisme n'atteint ses performances sur glucose en conditions non stériles, à savoir un rendement de l'ordre de 0,47 g d'éthanol par g de glucose, une productivité supérieure ou égale à 5 g/l.h, et des concentrations finales en éthanol voisines de 10% en volume. *S. cerevisiae* présente de nombreux atouts supplémentaires résultant de nombreuses années de sélection : résistance à l'éthanol, mise en œuvre industrielle aisée, etc. (**J.C. Ogier, 1999**)

Les levures *Saccharomyces* appartiennent au règne des champignons, à la division (embranchement) des Ascomycota (Ascomycètes), la sous –division des Saccharomycotina, la classe des Saccharomycètes, l'ordre des Saccharomycetales et la famille des Saccharomycetaceae. (**Larpent, 1990**)

Les micro-organismes utilisés sont particulièrement sensibles à l'éthanol et sont inhibés à partir d'une concentration de l'ordre de 3 à 5 % (en poids). (**J.C. Ogier, 1999**)

Les microorganismes sont plus performants quand ils ne sont pas stressés par leur environnement. Le stress peut provenir de plages de température et de pH non adaptées, d'une trop forte présence d'oxygène, ou de la présence d'inhibiteurs de fermentation dans leur milieu. Il faut également savoir qu'une trop forte concentration en substrat ou en éthanol a également des effets inhibiteurs, l'impact de ces facteurs dépend du microorganisme. **(Boucher, 2016)**

10.9.2 Fermentation par les levures

Alors que *Saccharomyces cerevisiae*, dont certaines souches sont utilisées industriellement pour la fermentation alcoolique, cette levure ne peut utiliser le xylose comme source de carbone, d'autres espèces de levures peuvent convertir le xylose en éthanol (*Pichiastipitis*, *Candida shehatae*, *Pachysolentannophilus*). Cependant ces levures présentent de nombreux points faibles : performances fermentaires sensiblement inférieures à celles de *S.cerevisiae* sur glucose, inhibition par l'éthanol à partir de concentrations de l'ordre de 3 à 5 %, forte sensibilité aux inhibiteurs présents dans les hydrolysats tels que l'acide acétique. Des études sont menées pour modifier le génome de *Saccharomyces cerevisiae* de façon à le rendre capable de transformer le xylose. **(Tatsinkou Fossi et al, 2009)**

Tableau 8 : Souches de levures produisant l'éthanol comme produit majeur de fermentation **(Kara Ali, 2014)**

Levures	Source de carbone (g/L)	Source d'azote (g/L)	Concentration de l'éthanol (g/L)
27817 S. <i>Cerevisiae</i>	Glucose (50- 200)	Peptone (2), sulfate d'ammonium (4)	(5,1-91,8)
30017 <i>K.fragilis</i>	Glucose (20- 120)	Peptone (2), sulfate d'ammonium (4)	48,96 (max)
30016 <i>Kluyveromyces Marxianus</i>	Glucose (100)	Peptone (2), sulfate d'ammonium (4)	44,4 (max)

30091- <i>Candida Utilis</i>	Glucose (100)	Peptone (2), sulfate d'ammonium (4)	44,4 (max)
27774- <i>Kluyveromyces Marxianus</i>	Glucose (20- 120)	Peptone (2), sulfate d'ammonium (4)	48,96(max)
30017- <i>Kluyveromyces Fragilis</i>	Glucose (20- 120)	Peptone (2), sulfate d'ammonium (4)	48,96(max)
<i>S. cerevisiae</i>	Sucre (150-300)	--	53 (max)
<i>S. cerevisiae</i>	Saccharose (220)	Peptone(5), dihydrogène phosphate d'ammonium (1,5)	96,71
L-041-S. <i>Cerevisiae</i>	Saccharose (100)	Sulfate d'ammonium (24)	50 (max)
ATCC-32691 <i>Pachysolen Tannophilus</i>	Glucose (0-25), xylose (0-25)	Peptone(3,6), sulfate d'ammonium (3)	7,8 (max)
ATCC-24860 <i>S.cerevisiae</i> (aérobie)	Molasse (1,6- 5)	sulfate d'ammonium (0,72- 2)	(5-18,4)
CMI237- S.	Sucre (160)	sulfate	70 (max)

<i>Cerevisiae</i>		d'ammonium (0,5)	
V5- <i>S. cerevisiae</i>	Glucose (250)	--	--
181S. <i>cerevisiae</i> (aérobie)	Glucose (10)	Peptone (5)	--
A3- <i>S.cerevisiae</i>	Galactose (20- 150)	Peptone,Sulfate d'ammonium, casamino acide (10)	(4,8- 36,8)
L52- <i>S.cerevisiae</i>	Galactose (20- 150)	Peptone,Sulfate d'ammonium, casamino acide (10)	(2,4- 32)
GCB-K5- <i>S.cerevisiae</i>	Saccharose (30)	Peptone (5)	27
GCA-IIS. <i>Cerevisiae</i>	Saccharose (30)	Peptone (5)	42
KR- 18 <i>S.cerevisiae</i>	Saccharose (30)	Peptone (5)	22,5
2399- <i>S.cerevisiae</i>	Glucose (31,6)	Urée (6,4)	13,7 (max)

10.9.3 Fermentation par les bactéries

Le xylose est convertible en éthanol par plusieurs espèces de bactéries thermophiles comme *Thermoanaerobacterethanolicus*, *Clostridiumthermohydrosulfuricum* ou par des souches modifiées de *Bacillus stearothermophilus*. Des bactéries mésophiles comme *Escherichia coli* et *Klebsiellaoxytoca* ou *K.planticola* sont également capables de fermenter les pentoses. De bonnes productions d'éthanol ont été obtenues avec des souches d'*E.coli* chez lesquelles des améliorations notables ont été obtenues: forte expression de certains gènes (pdc et adh) pour orienter le flux de carbone vers la production d'éthanol, obtention de mutants résistants à l'éthanol, délétion du gène de la fumarate réductase à l'origine de la formation de succinate. **(Tatsinkon Fossi et al, 2009)**

La production de l'éthanol à partir du glucose peut être effectuée par diverses bactéries (tableau 9). En effet, la bactérie *Zymomona smobilis*, vue sa sensibilité aux conditions de fermentation, est beaucoup moins exploitée en plus, elle ne fermente que le glucose, le fructose et le sucrose. **(Kara Ali, 2014)**

E. coli n'est pas à la base une bactérie pouvant produire de l'éthanol. Cependant, elle a la particularité de disposer d'une grande plasticité de son génome, qui rend les manipulations génétiques plutôt aisées. Ainsi, transformer cette bactérie afin de lui faire produire de l'éthanol fut l'une des premières réussites de manipulation génétique **(Boucher, 2016)**, *E. coli* est très exploitée car, elle présente plusieurs avantages incluant la capacité de fermenter un large spectre de sucres, l'indépendance de point de vue de facteurs de croissance complexes et l'adaptation aux conditions industrielles (exemple, son utilisation dans la production des protéines recombinantes). Cependant, certains inconvénients déclassent cette bactérie au profit des levures, dans le domaine de bio industrie, en particulier, sa résistance insignifiante et la perception du public pour son danger imminent. **(Lin et Tanaka, 2006)**

Tableau 9 : Souches de bactéries productrices d'éthanol comme produit majeur de fermentation (**Kara Ali, 2014**)

Bactéries	Concentration de l'éthanol (Mmol éthanol/Mmol glucose)
<i>Clostridiumindoli</i> (pathogène)	1,96
<i>Clostridium sphenoides</i>	1,8
<i>Clostridium sordelli</i> (pathogène)	1,7
<i>Zymomonas mobilis</i>	1,9
<i>Zymomonas mobilis</i> <i>subsp.pomaceas</i>	1,7
<i>Spirochaetaaurantia</i>	1,5
<i>Spirochaetastenostrepta</i>	0,84
<i>Spirochaetalitoralis</i>	1,1
<i>Erwiniaamylovora</i>	1,2
<i>Leuconostocmesenteroides</i>	1,1
<i>Streptococcus lactis</i>	1,0
<i>Klebsiella aerogenes</i>	24 g /L
<i>Escherichia coli</i> LY01	40-50 g /L
<i>Escherichia coli</i> KO11	0,7-0,1
<i>Klebsiella oxytoca</i>	0,94-0,98

10.9.4 Levures génétiquement modifiées :

E. coli doit donc être modifiée génétiquement pour pouvoir produire de l'éthanol à partir d'hexoses et pentoses (notamment la souche K011 [71], [126], [127]). Le même résultat a été obtenu après modification de *S. cerevisiae* pour pouvoir fermenter les hexoses et le xylose. Il est même possible de faire produire des enzymes aux levures, pour effectuer la saccharification et la fermentation. **(Boucher, 2016)**

Des gènes provenant de *Z. mobilis* et codant pour la PDC (pyruvate décarboxylase) et l'ADH (alcool déshydrogénase), ont été transférés chez la souche *E. coli* 11303 par l'intermédiaire du plasmide pLo 1297. Des rendements proches du rendement maximum ont été obtenus avec ces souches recombinées. Cependant, la plupart de ces résultats ont été obtenus sur des milieux synthétiques enrichis en facteurs de croissance. La production d'acides organiques reste cependant non négligeable avec ces souches recombinées. **(J.C. Ogier, 1999)**

L'utilisation de microorganismes génétiquement modifiés peut poser problème à l'échelle industrielle dans certains pays, dans lesquels il faut éviter toute contamination du milieu naturel avec des OGM. Pour s'affranchir de ces contraintes, il est possible de laisser faire la nature en sélectionnant et isolant les souches les plus adaptées au milieu de fermentation. Il est également possible de donner un coup de main à la nature, en irradiant d'UV des microorganismes pour accélérer les mutations, et donc créer de nouvelles souches plus rapidement, en espérant en obtenir de meilleures. Ce procédé est hasardeux, contrairement à la manipulation génétique, mais ses résultats ne sont pas considérés comme des OGM. **(Watanabe et al, 2011)**

Cette partie est voulu être une application des notions déjà présentées dans la section précédente, mais faute des conditions de confinement et l'impossibilité d'accéder aux structures de recherche, nous avons opté pour une lecture dans les récents travaux faites dans cette thématique en veillant à ce que les conditions pratiques soient très proches au contexte local et aux celles prédéterminées dans la problématique proposée aux instances scientifiques du département.

A cet effet une comparaison entre deux méthodes de production de bioéthanol à partir de deux types de biomasse du palmier dattier à savoir palmes sèches et pédicelle et les écarts de triage de dattes inspirés du travail mené par **Boulal et al, 2018 et Cheni et al, 2014.**

10.10 PRODUCTION DE BIOETHANOL A PARTIR DES PALMES SECHE ET PEDICELLE (SELON BOULAL, KHELAFI ET KAIDI, 2018)

Les auteurs se sont intéressés au sous-produit des palmiers dattiers (palmes sèches et pédicelles), en raison de leur richesse en polymères lignocellulosiques qui vont se transformer en bioéthanol après fermentation anaérobie et une récupération par distillation.

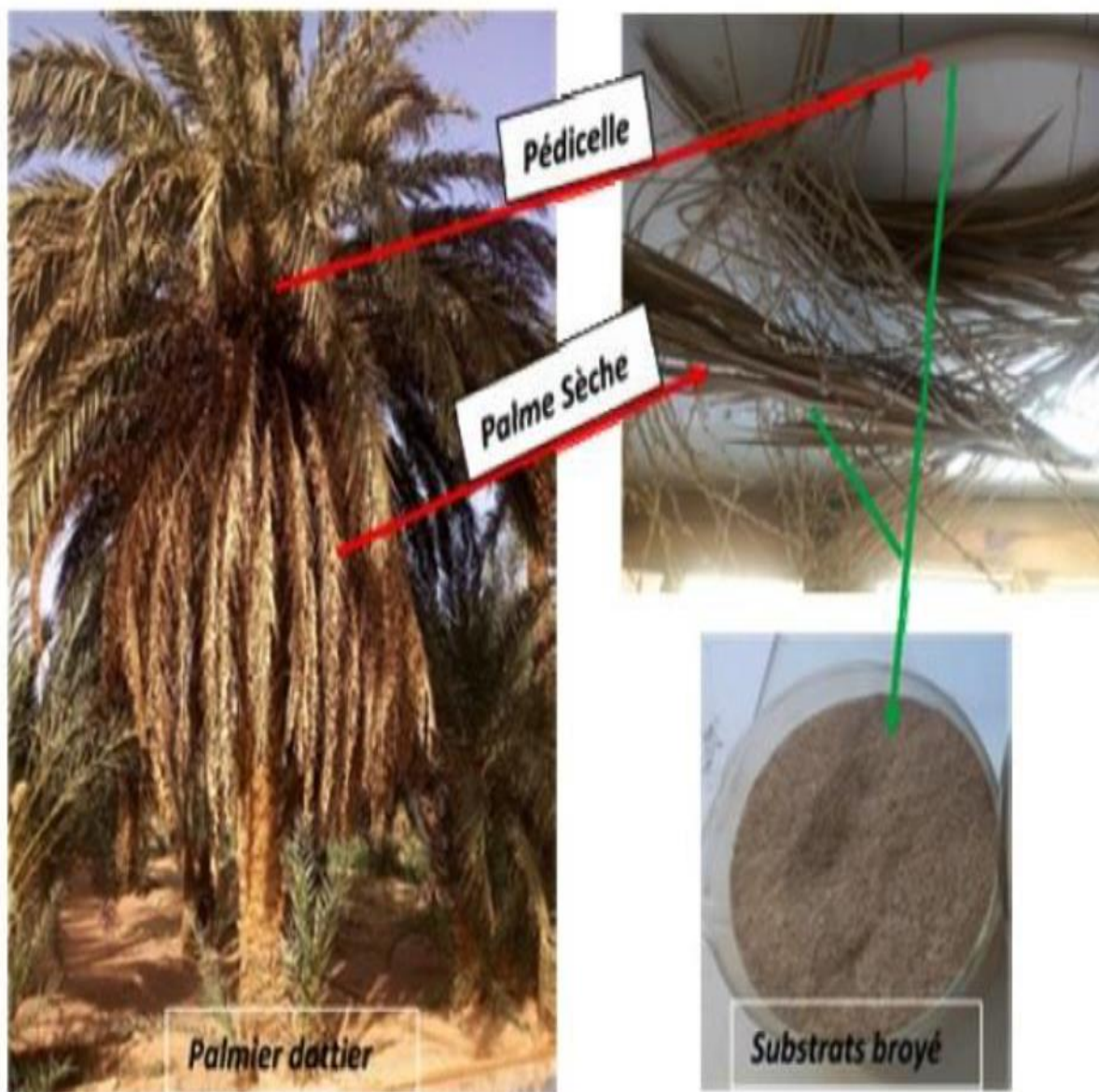


Figure 26 : Biomasse du palmier dattier utilisée pour la production du bioéthanol.

10.10.1 Matériel biologique

Le micro-organisme utilisé est la levure boulangère *Saccharomyces cerevisiae* industriel procuré du marché local.



Figure 27: Matière biologique de fermentation.

10.10.2 Processus de production de bioéthanol

Cette partie concerne la production d'éthanol à partir de la solution de biomasse de dattier. La biomasse a été soumise à des traitements de différentes natures : broyage, vapocraquage, hydrolyse acide, dilution, fermentation alcoolique et enfin la distillation.

Broyage: cette étape est indispensable afin d'augmenter la surface spécifique de la biomasse et aussi pour faciliter la dissolution des polymères (surface développée de la poudre par unité de masse).

Prétraitement à la vapeur / steam explosion: Procédé thermo-mécanochimique qui hydrolyse initialement la matière lignocellulosique.

Hydrolyse acide: le but de ce traitement est de rompre les liaisons osidiques du polymère pour en produire des sucres monomères.

Dilution: La dilution a pour objet de créer un milieu favorable pour la croissance des microorganismes par maîtrise de la pression osmotique de la solution et pour neutraliser l'effet acide des traitements précédents.

Fermentation: cette opération se déroule dans un bioréacteur (un fermenteur de laboratoire), sur le milieu préparé auparavant

L'ajout de levure du genre *Saccharomyces cerevisiae* (la levure boulangère) en anaérobie, entraîne la fermentation des sucres monomères contenu dans la solution. Cette réaction se fait

pendant 72 heures. Les produits résultant de cette réaction sont l'éthanol et le dioxyde de carbone. Pour récupérer l'éthanol produit, le bioréacteur est immédiatement immergé dans un bain-marie, où la température est fixée à 30 ± 2 °C.

Distillation: La liqueur fermentée contient entre 8 et 15 % d'éthanol. Ce dernier est séparé de la liqueur par un système de distillation à plusieurs colonnes qui aboutit à un éthanol plus purifié. La température de distillation est de l'ordre de 78 °C.

Rendement: Le rendement de bioéthanol produit a été calculé en tenant compte du volume de moût du substrat introduit dans le bioréacteur.

Teneur en alcool: La teneur en alcool du distillat est mesurée par un alcoomètre (0-100°).

Test de dichromate: En milieu acide, l'éthanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) est oxydé par le dichromate de potassium ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) pour donner une coloration verte.



Figure 28 : Dispositif expérimental de la fermentation alcoolique.

CHAPITRE 04

RESULTATS ET DISCUSSION

11 CHAPITRE 04:RESULTATS ET DISCUSSION

Estimation de la quantité de biomasse (palmes et pédicelles) générée par le palmier dattier

11.1 - PALMES SECHES

Le tonnage de la partie consommable des palmes sèches de la façon suivante,

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

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

$$13.5 \times 18\,000\,000 = 243\,000\,000 \text{ kg}$$

Soit: 243 000 tonnes de palmes sèches / an.

11.2 - PEDICELLES DE DATTES

Le poids du pédicelle de 4.5 par rapport au poids de dattes qu'il porte est de 245 g, représente 1.84 % de pédicelles pour un kg de dattes.

En sachant que la production algérienne de dattes est estimée à 848 000 tonnes par an, on peut estimer le tonnage des pédicelles de dattes comme suit,

$$848\,000 \times 0.0184 \% = 15\,603 \text{ tonnes}$$

Soit: 15 603 tonnes de pédicelles / an

11.3 CARACTERISTIQUES DE L'ETHANOL PRODUIT :

L'éthanol produit au niveau du laboratoire avait les caractéristiques suivantes: volatil, inflammable, limpide et possédant une odeur piquante. Le test de dichromate confirme la présence d'éthanol dans la solution.

11.4 RENDEMENT

Le rendement du bioéthanol est le rapport entre la masse de substrat introduite dans le réacteur de fermentation par le volume de bioéthanol produit. Le rendement en alcool est de 20 % avec un degré de pureté alcoolique de 75°.

11.5 CARACTERISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES DU PRODUIT FINI

Les résultats obtenus sont très acceptables. Ils sont représentés dans suivant.

D'après les comparaisons effectuées, nous pouvons dire que le bioéthanol de la biomasse du palmier est très proche de l'éthanol absolu ordinaire, tant au niveau physicochimique qu'au degré de pureté. De plus, il possède la même odeur que l'éthanol chirurgical.

Tableau 10 : Caractéristique physico-chimique du produit fini (bioéthanol).

Paramètres	Bioéthanol	Ethanol commercial 96%
Ph	6.2	Neutre
Densité (g /cm ³)	0.834	0.789
Indice de réfraction (20°C)	1.367	1.3611
Degré de pureté (%)	75	96

12 PRODUCTION DE BIOETHANOL A PARTIR DE L'ECART DE TRIAGE DE DATTES (DEGLET-NOUR) (SELON CHNITI ET AL, 2014)

Les fruits utilisés sont des déchets de triage (fruits avec défauts de texture, fruits très humides, fruits altérés par les microorganismes et les insectes) qui ont été conservés à 4 °C avant d'extraire le jus.

12.1 EXTRACTION DE JUS DE DATTES

Les dattes ont subi, comme traitement préliminaire, un lavage, un dénoyautage et sont ensuite découpées en petits morceaux (0.5 à 1 cm). Des masses précises de pulpe de dattes et d'eau sont mélangées.

L'extraction s'effectue dans un bain-marie agitateur pendant des périodes variables (temps correspondants au plan d'expérience). Une fois le temps d'extraction écoulé, le tout est filtré, puis conservé pour analyses physico-chimiques.

12.2 MILIEUX DE CULTURE

Le sirop de datte obtenu après chauffage doit être dilué à l'aide du milieu de Wikerham aux proportions convenables (Milieu 1: 17.4°Brix et milieu 2: 35.8°Brix), puis centrifugé à 5000 rpm pendant 30 min, afin de séparer les débris celluloses, et utiliser le surnageant comme source de carbone pour la bioproduction d'éthanol. Le milieu est ensuite enrichi en NH₄Cl (10 mM), puis ajusté à un pH 6 par ajout de KOH 1M et stérilisé par autoclavage à 120 °C pendant 20 minutes

12.3 PROCESSUS DE FERMENTATION

Les précultures des levures (*S. cerevisiae*, *Z. rouxii* et *C. pelliculosa*) sont réalisées selon le protocole décrit par **Djelal et al, 2015**.

Les fermentations sont dupliquées dans des flacons de 500 ml fermés par des bouchons à vis, contenant 300 ml de volume utile, à 28 °C sous agitation (180 rpm), dans un Shaker.

Les différents milieux de cultures sont inoculés selon le protocole de **Djelal et al, 2015** et suivi par des prélèvements effectués à 0,18, 24, 48, 66 et 72 h, de culture. Le dosage du glucose, fructose, saccharose et autres métabolites, tels que l'éthanol et le glycérol a été effectué par chromatographie en phase liquide à haute performance, 'HPLC' selon la méthode décrite par **Djelal et al, 2015**, afin de quantifier l'évolution de la matière au cours de la culture.

La concentration en NH₄Cl dans les milieux aux cours de la fermentation a été déterminée par une méthode développée par **Mann, 1963**.

12.4 EVOLUTION DE LA BIOMASSE

Le suivi de la croissance des deux souches *Z. rouxii* et *C. pelliculosa* a montré une croissance plus élevée de 50 % par rapport à celle de *S.cerevisiae* après 72 h de culture. Les deux premières souches résistent mieux aux facteurs stressants causés par les fortes concentrations en sucres du milieu de culture (hyperosmolarité), lors de la fermentation.

Tableau 11: Fermentation alcoolique du milieu à base de sirop de dattes par les levures (après 72 h de culture)

Eq Glu (g.l-1)*	Eq Glu Consommé	EtOH (g.l-1)	Gly (g.l-1)	Biomasse (%)
<i>S. cerevisiae</i>	174	94 63	10.0	3.1
349	4	ND**	ND**	2.0
<i>Z. rouxii</i>	169	67 33	4.6	5.8
357	41	55	10.0	4.6
<i>C. pelliculosa</i>	168	71 41	4.6	5.7
356	3	ND**	ND**	2.6

* Concentration en sucres totaux en équivalents glucose (g.L-1).

** ND : < Limite de quantification

Le Tableau 11 regroupe les différentes concentrations obtenues pour les produits de la fermentation. Les rendements par rapport aux substrats consommées en éthanol ($Y_{EtOH/S}$), en glycérol ($Y_{Gly/S}$) et en biomasse ($Y_{X/S}$), pour les trois souches, sur une même durée de culture (72 h), montrent que pour le milieu le moins concentré en sucres, les rendements en éthanol sont de 38, 29 et 34 %, respectivement pour *S. cerevisiae*, *Z. rouxii* et *C. pelliculosa*.

Toutefois pour le milieu à 36°Brix, *S. cerevisiae* et *C. pelliculosa* perdent leur capacité de production d'éthanol contrairement à *Z. rouxii* (Tableau 12).

Tableau 12: Rendement en produits et en biomasse après 72 h de fermentation.

	Glu Eq (g.l-1)*	S /EtOHY (%)	YGly /S (%)	YX/S (%)	YEtOH/ X (g.g-1)	YGly/ X (g.g-1)
<i>S. cerevisiae</i>	174	38	3	2	20.0	3.0
	349	ND**	ND**	14	ND**	ND**
<i>Z. rouxii</i>	169	29	4	5	5.7	0.8
	357	38	7	3	12.0	2.2
<i>C. pelliculosa</i>	168	34	4	4	7.0	0.8
	356	ND**	ND**	24	ND**	ND**

13 CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Selon les données recueilli du travail **Boulal et al, 2018**; on peut conclure de la faisabilité de produire le bioéthanol à partir de la biomasse dattier locale disponible avec des tonnages très important et riche en sucre complexe (lignocellulosique). Le bio éthanol obtenu de cette fermentation alcoolique est d'une pureté excellente. Cependant, il est nécessaire, de revoir les conditions de fermentation et optimiser les paramètres dans un objectif d'augmentation du rendement et de perfectionnement des étapes d'extraction d'éthanol par distillation. D'autre par, **Chniti et al, 2014** ; ont démontré la possibilité de valoriser les dattes de faible valeur marchande en industrie agro-alimentaire sous forme de bioéthanol est de biomasse de des levures.

Il ressort aussi de cet étude que la levure osmotolérante *Zygosaccharomyces rouxii* est mieux adapté au mout de dattes concentré à 35.8°Brix et peut d'ailleurs aboutir à un rendement YEtOH/S de 38 %, identique à celui de *S. cerevisiae*, cultivée sur un milieu à 17.4°Brix.

L'objectif de cette présente étude consiste la production de bioéthanol à partir des déchets issus du palmier dattier par fermentation anaérobie menée dans un bioréacteur à l'échelle de laboratoire en présence de levures isolées des dattes contre d'autre commercialisée utilisée comme témoin c'est la levure *Saccharomyces cerevisiae*.

Dans un monde, les ressources pétrolières deviennent rares, la transition énergétique, dirigée par la chimie, semble incontournable. Ainsi, les biocarburants routiers s'inscrivent dans cette thématique en permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre, mais aussi en atténuant notre dépendance au pétrole et en créant des emplois.

La revue que nous avons effectué sur les expériences de valorisation des différentes biomasses du palmier dattier (*Phœnix dactylifera L*) en biocarburant (bioéthanol) par action microbiennes (levures et bactéries), nous semble prometteuse et n'a besoin que d'une vraie volonté politique et un accompagnement sincère des porteurs de ce genre des projets.

Comme complément et perspectives à la présente étude, les points suivants nous semblent très pertinents à l'avenir :

- Etude de la valorisation des déchets de la récolte ainsi que les produits secondaires du Procédé.
- L'utilisation d'autres types de souches de levures.

- Application à l'échelle industrielle de cette étude.
- Constitution d'une banque de souches de levures performantes productrice de bioéthanol.

14 REFERENCE :

- Babahammi, 2014
- Belimi et Reffas, 2017
- Ben sallah, 2014
- Bougandoura et al., 2010
- Bouziane et Abdelli, 2017
- Bouziani et Abdelli, 2017
- Chehma et Longo, 2001
- Fenouche, 2017
- Ghnabzi et Merghani, 2019
- IRENEE et al, 2011
- Paillet et Taillades, 2013

(Laouar, 2020 -Boulal et al, 2016-Chehma et Longo, 2001)

Anonyme 1., 2016. Agriculture : valoriser les sous-produits de la datte.
www.elmoudjahid.dz.

Anonyme 2., 2018. Qu'est-ce que le bioéthanol ?.
<file:///C:/Users/zolfa/Desktop/doc%20m%C3%A9moire/bioethanol/Qu'est-ce%20que%20le%20bio%C3%A9thanol%20-%20-%20Geo.fr.html>.

Anonyme 3., 2019. Déchets de palmeraie: alternative alimentaire du cheptel prometteuse en régions arides Algérie.
file:///C:/Users/zolfa/Desktop/doc%20m%C3%A9moire/Byproducts%20and%20wastes%20from%20date%20palm_%20a%20promising%20alternative%20feed%20resource%20for%20livestock%20in%20dry%20regions%20of%20Algeria.html.

Anonyme 4., 2014. <https://www.ademe.fr>

Anonyme 5., 2010. Biocarburants définition et technologies. Direction Générale de l'Energie et du Climat - 1 - L'industrie des énergies décarbonées en 2010.

Anonyme 6., 2015. biocarburants. <http://biotech.spip.ac-rouen.fr/img/pdf/biocarburants.pdf>.

Asther M, Record E, Gimbert I, Sigoillot J.C, Levasseur A, Danchin E.G.J, Coutinho P.M, Monot F., 2006. Des champignons qui carburent : de l'étude du génome à la production industrielle. *Biofutur* 269,pp 28-32.

Baali M., 2012. *Contribution a la caracterisation et a l'exploration de la microstructure et des proprietes des constituants du palmier.* these de magistere. universite mohamed khider biskra, 105 p.

Babahami A., 2014. *Caractérisation de la biomasse microbienne développée dans un compost issue des déchets du palmier dattier.* mémoire de master. université kasdi merbah, ouargla, 72p.

Bai F, Anderson W, Moo-Young M., 2008. Ethanol fermentation technologies from sugar and starch feedstocks. *Biotechnol. adv.* 26(1), pp 89-105.

Belimi N, Reffas I., 2017. *Valorisation et caractérisation des méthodes d'extraction de sirop des dattes à partir des variétés communes.* mémoire de master. université d'el oued, 78 p.

Bensalah., 2014. Le recyclage des sous-produits des oasis : acquis et perspectives.projet MENA -DELP Partage des connaissances et les moyens de subsistance au profit de L'Algérie, Egypte, Jordanie, Maroc et la Tunisie. *Edition oss (observatoire du sahara et du sahel)*, 86p.

Bertrand Tatsinkou Fossi, Céline Jiwoua, Frédéric Tavea, Léopold Tatsadjieu Ngoune, Robert Ndjouenkeu., 2009. Production directe d'éthanol à partir de l'amidon par co-culture de deux souches de levures *Schwanniomyces* sp et *Saccharomyces cerevisiae* : application à la bioconversion de l'amidon de manioc et de maïs. *Syllabus review 1 (2009)*, pp 28 – 35.

Boucher J., 2016. *Etude des possibilités de production d'éthanol hémicellulosique dans le cadre d'une bioraffinerie papetière.* thèse du doctorat, génie des procédés. université de grenoble, 209 p.

Boughnou N., 1988. *Essai de production du vinaigre à partir des déchets de datte.* Thèse Magister, INA El-Harrach, Alger, 82 p.

Bouguandoura N, Benkhelifa A et Bennaceur M., 2001. *La biotechnologie du palmier dattier. Le palmier dattier en Algérie situation, contraintes et apport de la recherche.* Colloques et séminaires. Editrices scientifiques. Frédérique Aberlenc- Bertossi, pp 15- 23.
FAO., 2010. www.FAO.com.

Boulal A, Khelafi M et Kaidi K., 2018. Procédés expérimentales sur la production de bioéthanol de deuxième génération à partir des sous-produits des palmiers dattiers. *Revue des Energies Renouvelables SIENR'18 Ghardaïa* (2018), pp 63 – 69.

Bounoua F., 2017. *Production de bioéthanol à partir des déchets de l'industrie de transformation de pomme de terre.* Mémoire du master. Université M'Hamed Bougara Boumerdès. 63 p.

Bouziane N, Abdellali N., 2017. *Valorisation de la matière lignocellulosique des déchets de palmier dattier (Phœnix dactylifera L.) comme fertilisant organique.* Mémoire du master, Soutenu le 25 Mai 2017. Université d'ADRAR, 73p.

Caylak B. et Vardar S.F., 1999. Comparison of different production processes for bioethanol. *Turk j chem.* 22, pp 351–359.

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

Chniti S, Djelal H, Bentahar I, Hassouna M et Amrane A., 2014. Optimisation de l'extraction des jus de sous-produits de dattes (Phoenix dactilyphera L.) et valorisation par production de bioéthanol. *Revue des énergies renouvelables vol. 17 n°4* (2014), pp529 – 540.

Claude Ogier J, Philippe Leygue J., 1999. Production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique. *Oil & gas science and technology, revue de l'ifp, vol. 54* (1999), no. 1, pp 67-94.

DAMIEN., 2004. Guide du traitement des déchets 3^{ème} édition.

David C., 2015. Les biocarburants liquides dans les transports. *Hygiène et sécurité du travail- n° 239- juin 2015, pp 94- 99.*

De Cherisey H., 2007. La valorisation de la biomasse. Guide d'information à l'attention des administrations et des établissements publics. 39p.

Demirbas A., 2008. Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. *Energy conver manage.* 49(8): 2106-2116.

Diane S., 2014. *Caractérisation et modification des lignines industrielles.* Thèse de doctorat, Université Laval Québec, Canada, 226 p.

Didderen I, Destain J et Thonart P., 2010. La production du bioéthanol à partir de biomasse lignocellulosique. *Foret wallonne* n° 104 – janvier/ février 2010, pp 39-45.

Djerbi, M., 1994. Précis de phoeniciculture. FAO, 192 p.

Espiard E., 2002. Introduction à la transformation industrielle des fruits. *Ed. tech et doc-lavoisier*, 360 p.

Fennouche I., 2017. *Production de bioéthanol à partir de résidus d'agriculture.* Mémoire du master. Université Badji Mokhtar- Annaba. 81 p.

Ghenabzia A, Meraghni M., 2019. Effet des extraits des différents noyaux des dattes "phoenix dactylifera l" sur les hormones sous l'effet de xylène chez les rattes wistar albinos. Mémoire de master. Université d'El Oued, 63p.

https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition.php4

ITDAS Institut Technique de Développement de L'agronomie Saharienne., 2005. Recueil de fiches techniques, pp 90-91.

Jaeger –Voirol A., 2015. Les biocarburants d'aujourd'hui et de demain Enjeux et perspectives. Conférence CNAM "biocarburants" 10 mars 2015, 46p.

Kadri Y., 2019. Cours de valorisation des sous-produits du palmier dattier. Université Ahmed Draya Adrar.

Kamdem I, Tomekpe K et Thonart P., 2011. Production potentielle de bioéthanol, de biométhane et de pellets à partir des déchets de biomasse lignocellulosique du bananier (*Musa spp.*) au Cameroun. *Biotechnol. agron. soc. environ.* 15(3), pp 471-483.

Kara Ali M., 2014. *Isolement et caractérisation de souches levuriennes des milieux arides productrices de l'éthanol sur différents substrats jury.* Thèse doctorat. Université Constantine1, 88 p.

Kechkar M, Aziza M., 2012. Le bioéthanol. *Revue des énergies renouvelables sienr'12 Ghardaïa (2012), pp 276 – 279.*

Kendri S., 1999. *Caractéristiques biochimiques de la biomasse "Saccharomyces cerevisiae" Produite à partir des dattes " variété ghars ".* Mémoire d'Ingéniorat. Département d'agronomie. Université de Batna, 51 p.

Kortebi M, Iaiche A M E A., 2013. *Contribution à la valorisation de la farine des dattes «mech degla» en vue de don incorporation dans un « biscuit sec ».* Mémoire du master, soutenir le 22 septembre 2013. Université Saad Dahlab Blida, 73p.

-Kortebi et Iaiche, 2013

Lacour J., 2012. *Valorisation et de la fraction organique de résidus agricoles et autres déchets assimilés à l'aide de traitement biologique anaérobies.* Thèse de doctorat. Université Quisqueya (Haïti), p 139.

Laouar A., 2020. *Caracterisation physicochimique et microbiologique de deux varietes de dattes" hmira ,feggous" et production de bioethanol a partir de rebuts de dattes " hmira".* Thèse du doctorat. Université Tahri Mohamed Béchar. 131 p.

Larpent J.P., 1990. *Moisissures Utiles et Nuisibles Importance Industrielle, 2^{ème} édition.* Masson, Paris.512 p.

Leticia P, Miguel C, Humberto G. et Jaime A.J., 1997. *Fermentation parameters influencing higher alcohol production in the tequila process. Biotechnol Lett. 19(1), pp45–47.*

Lin Y, Tanaka S., 2006. *Ethanol fermentation from biomass resources: current state and prospects. Appl microbiol biotechnol. 69, pp 627–642.*

Makhloufi A., 2015. *Valorisation des dattes commune et sous-produits du palmier dattier. Avenir et perspectives, 2^{ème} séminaire international de biologie, Béchar.*

Novak M H., 2004. *Valorisations non alimentaires des coproduits de la transformation de la betterave sucrière.* Etude menée par la Faculté universitaire des Sciences agronomiques de

Gembloux pour le compte de ValBiom, avec le soutien du Ministère de la Région wallonne – Direction générale de l’Agriculture. 14 p

Paillet F, Taillades G., 2013. *Les biocarburants, recherche scientifique.* Université Montpellier 2, France, 18ps.

Saïd N., 2016. *Amélioration de l’extraction des sucres de la biomasse du millet perlé sucre et du sorgho sucre pour une éventuelle production de bioéthanol.* Thèse de doctorat, Université de Laval, Québec, Canada, 125p.

Saidi A., 2011. La biomasse lignocellulosique et la bioénergie. *Bio énergie et environnement, n°21, pp 4-5.*

Sghairoun M, Ferchichi A., 2011. Composting Heap Palm Tree’s Products in Southern Tunisia. *Journal of environmental science and engineering, 5, pp 886-889.*

Tahri K., 2018. *Etude de l’architecture et de la biomasse du système racinaire du palmier dattier (phoenix dactylifera l.) adulte.* Thèse du magister. Université de Biskra, 77p.

Toutain G., 1967. Le palmier dattier culture et production. Edition marocaines et internationales, 11 avril. de rabat a tanger. 71p.

Watanabe T, Watanabe I, Yamamoto M, Ando A et Nakamura T., 2011. A UV-induced mutant of *Pichia stipitis* with increased ethanol production from xylose and selection of a spontaneous mutant with increased ethanol tolerance. *Bioresour. Technol., vol. 102, no 2, p. 1844-1848.*

Zaid, A. ; Arias-Jimenez, E. J., 2002. Date palm cultivation. FAO Plant production and protection paper 156, Rev. 1. FAO, Rome.