



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم هندسة الطرائق

Département de Génie Des Procédés

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine :

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Génie Chimie

Thème

**Valorisation des déchets de palmiers dattiers pour une
production optimisée de biochar.**

Présenté par :

- Dif hind
- Dahmane hanane

Soutenue publiquement le 12 /06/2025.

Devant le jury composé de :

Laghouiter Oum Kelthoum	MCB	Univ Ghardaia	Président
Fekhar Bahmed	MCB	Univ Ghardaia	Encadrant
Bencheikh salah Eddine	MCB	Univ Ghardaia	Examineur
Aouf Mohammed	MCB	Univ Ghardaia	Examineur

Année universitaire 2024/2025

Remerciements

Louange à Dieu qui nous a permis d'achever ce travail de recherche scientifique. Nous exprimons nos sincères remerciements, notre respect, notre gratitude et notre profonde reconnaissance à

Monsieur

le Docteur Fekhar Bahmed, notre encadrant, pour le temps, les efforts et les précieux conseils qu'il nous a généreusement accordés. Nos remerciements, notre respect et notre gratitude s'adressent également à tous nos enseignants et professeurs, depuis l'école primaire jusqu'à l'université.





Dédicace

Je dédie ce modeste travail à
ceux qui ont consacré leur vie à
mon bien-être et à mon
éducation : mes chers parents. À
mon mari Hussein, pour son
soutien indéfectible, Ainsi qu'à
toutes les personnes qui m'ont
accompagnée tout au long de ce
parcours.



Dédicace

Je dédie humblement ce travail, fruit de plusieurs années de recherche et de persévérance, à ceux qui ont été mon soutien et mon aide, source d'affection et de don illimité, la lumière de mes yeux et ma couronne : Mes chers parents, qu'Allah prolonge leur vie et leur accorde santé et bien-être.

à ceux qui ont eu le mérite de me guider et de m'orienter, et qui n'ont ménagé aucun effort ni conseil : Mes chers professeurs, je vous adresse mes plus sincères remerciements et ma profonde gratitude.

À mon soutien et ma fierté, ceux qui ont partagé avec moi les moments de joie et d'effort : Mes chers frères et sœurs.

À tous ceux qui ont semé l'espoir dans mon cœur, qui m'ont soutenu par une parole gentille ou une prière sincère, et à tous ceux qui m'ont accompagné dans ce parcours : Mes amis et collègues fidèles.

à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail, même par un mot aimable.

Sommaire

Titre	Page
Remerciements	
Dédicace	
Liste des figures	
Liste des Tableaux	
Liste des abréviations	
Résumé	
Introduction Générale	1
Chapitre 1 : Introduction générale aux déchets de palmier (Bbiochar)	
Introduction	3
1-Définition des palmiers dattiers (<i>Phoenix dactylifera L.</i>)	3
2-Description morphologique du palmier dattier	4
3-Composition chimique des déchets de palmiers dattiers	5
4-Types de déchets issus de la culture et de la transformation du palmier dattier	6
5- Répartition géographique du palmier dattier:	6
5.1. Dans le monde	6
5.2. En Algérie	7
II .Le biochar:	9
II-1 .Difinition de biochar	9
II -2. Classification basés sur le type de matière première	10
2.1. Biochar lignocellulosique	10
2.2. Biochar à partir de fumier	10
2.3. Biochar issu d'algues	10
2.4. Biochar à pyrolyse lente	10
2.5. Biochar à pyrolyse rapide	10

2.6. Biochar issu de la gazéification	11
2.7. Biochar de carbonisation hydrothermale	11
2.8. Biochar agricole	11
2.9. Biochar industriel	11
2.10. Biochar environnemental	11
3-Propriétés physiques et chimiques du biochar	11
3.1. <i>Propriétés physiques du biochar</i>	11
3.2. <i>Propriétés chimiques du biochar</i>	12
II -4.1. Composition chimique et adéquation à la production de biochar	13
4.2. Teneur en minéraux et en cendres	13
4.3. Carbone et composition élémentaire	14
5-Technologies de production de biochar	14
5-1-Procédé de pyrolyse	14
5.2 Pyrolyse éclair	15
5-3. Pyrolyse éclair	15
II 6- Influence des paramètres de procédé sur la production de biochar	17
II .7.Impact des conditions de pyrolyse sur le rendement et les propriétés du biochar	17
II .8.Rapports entre l'hydrogène et l'oxygène (H/C et O/C)	17
II .9.Teneur en azote et en éléments nutritifs :	18
II .10.pH, capacité d'échange cationique (CEC) et stabilité	18
II.11. Applications du biochar	18
11.1. Amélioration agricole et des sols	19
11 .2 Applications environnementales du biochar	19

11. 3 Utilisations énergétiques et industrielles du biochar	19
II.12. Avantages économiques et environnementaux de la production de biochar	19
Partie 02 : Partie simulation Aspen plus	20

Introduction	20
Definition de aspen plus	
2. Utilisations de Aspen plus	20
3. Domaines d'utilisation	21
4. Modèles utilisateur	22
5. Principes fondamentaux de la modélisation et de la simulation Aspen Plus	22
6. Spécifier la méthode de propriété	22
7. Entrées des composants	23
Chapitre II : Matériels et Méthodes	
Introduction	24
1-Matière première	24
1-1.Définition expreccion des noyaux de dattes	24
1-2. Caractérisation physico-chimique des noyaux de dattes	25
2. Composition chimique du noyau de datte	25
3. Composition en éléments minéraux	26
Partie 1 : L'expérience acquise 1.Le travail de l'équipe	27
2-La méthodologie de préparation du biochar à partir des noyaux des dattes	29
Parti 02 : Partie simulation Notre travail	
1- Debut de aspen plus	31
2- L'applications	32
2.1les information de resultats dexperience et la method	32
2.2larganigramme de simulation aspen plus	35
2.3les etapes d'application	35
Chapitre III : Résultats et Discussion	

Partie expérimentale	40
1-L'effet de la température de pyrolyse	40
2-Taux de chauffage	41

3- Effet du temps de séjour (temps de maintien à la température maximale)	42
4- Effet de la taille des particules de la matière première	42
5- Effets sur les mécanismes d'élimination	42
1- Le rendement de biochar vs température de pyrolyse	43
2- Le rendement du biochar vs temps de séjour	44
3- Le rendement de biochar par rapport de teneur en humidité	45
4- Composition du gaz de synthèse par rapport à la température	46
5- Taux de chauffage par rapport au rendement de biochar	47
6- Débit de gaz inerte par rapport au rendement de biochar	47
7- Efficacité de récupération de chaleur par rapport à la surface de l'échangeur	48
Conclusion Générale	52
Références	55

Liste des figures :

Figure	page
Figure 1: Schéma descriptif d'un palmier-dattier,(Chao et Kreuger,2007)	4
Figure 2: Carte de l'Algérie indiquant les différentes zones de palmiers dattiers	8
Figure3::: le Biochar	9
Figure 4 : Schéma de processus de pyrolyse pour la production de biochar.	36
Figure 5 : Température vs Rendement (Biochar, Gaz, Huile	43
Figure 6 : Rendement du biochar vs temps de séjour	44
Figure 7 : Le rendement de biochar par rapport de teneur en humidité	45
Figure 8 : Composition du gaz à 300°C vs 500°C (Graphique à barres)	46
Figure 9 : Vitesse de chauffage vs Rendement	47
Figure 10 : Débit de gaz ienrte par rapport au rendement de biochar	47
Figure 11 : Efficacité de récupération de chaleur par rapport à la surface de l'échangeur	48

Liste des tableaux

Tableau	Page
Tableau1 : composition chimique des résidus de palmier dattier exprimée en pourcentage de matière sèche (MS)	4
Tableau 2: composition chimique des résidus de palmier dattier en % MS	5
Tableau 3: Nombre de palmiers dattier en Algérie par wilaya en 2014,	8
Tableau 4 : Composition chimique des noyaux de dattes	26
Tableau 5 : Composition en éléments minéraux des noyaux de dattes)	27
Tableau 6 : Composition chimique des noyaux de dattes	39

Liste des abréviations

MS : matière sèche

MO : matière organique

CB : cellulose brute

MM : matière minérale

ST: Sucres totaux

EM : Énergie que l'on peut métaboliser

D Noy : résidu de noyaux

Rb : déchets de dattes

Pdc : pédoncules de dattes

MAT : matières totales azotées

MM : minéraux

HTC : La technologie de conversion thermochimique

CE : Conductivité électrique

PZC : point de charge zéro

CEC : Capacité d'échange cationique

Résumé

Cette étude porte sur la comparaison des procédés de production du biochar à l'aide du logiciel de simulation Aspen Plus. Elle vise à identifier les méthodes thermodynamiques les plus appropriées, à définir les paramètres d'entrée pertinents et à analyser les produits de réaction, en s'appuyant sur des modèles représentatifs et une validation des propriétés physicochimiques du biochar obtenu.

Les résultats de la simulation indiquent un rendement en biochar de 62 %, tandis que la fraction gazeuse (CH_4 , CO_2 , CO et H_2) représente 13 % et la bio huile 25 %, pour une température de 400 °C et un temps de séjour de 30 minutes.

Toutefois, les analyses physicochimiques révèlent des écarts significatifs par rapport aux prédictions du modèle, avec une diminution de 56 % du rendement en biochar, de 19 % du rendement en gaz et de 25 % du rendement en biohuile par rapport aux valeurs issues de la simulation.

Mots-clés : Biochar, rendement, biomasse, bio huile, pyrolyse, Aspen Plus, temps de séjour.

Abstract

This study addresses the comparison of biochar production processes using Aspen Plus simulation software. It aims to identify the most appropriate thermodynamic methods, define the relevant input parameters, and analyze the reaction products based on representative models, while the physico-chemical properties of the resulting biochar.

Simulation results indicate a biochar yield of 62%, while the gaseous fractions (CH_4 , CO_2 , CO , and H_2) account for 13%, and the bio-oil yield is 25%, at a temperature of 400 °C and a residence time of 30 minutes.

However, the physico-chemical analyses reveal significant discrepancies compared to the model predictions, with a 56% decrease in biochar yield, 19% decrease in gas yield, and 25% decrease in bio-oil yield compared to the simulated values

Keywords: Biochar, yield, biomass, Bio-oil, pyrolysis, AspenPlus, residence time.

المخلص

تتناول هذه الدراسة مقارنة عمليات إنتاج الفحم الحيوي باستخدام برنامج المحاكاة Aspen Plus. وتهدف إلى تحديد أكثر الطرق الديناميكية الحرارية ملاءمة، وتعريف المعاملات المدخلة ذات الصلة، وتحليل نواتج التفاعل بالاعتماد على نماذج تمثيلية، مع التحقق من الخصائص الفيزيائية والكيميائية للفحم الحيوي الناتج. تشير نتائج المحاكاة إلى أن مردود الفحم الحيوي يبلغ 62٪، في حين تمثل الغازات (CO ، CO_2 ، CH_4 و H_2) نسبة 13٪، والزيت الحيوي 25٪، عند درجة حرارة 400 °م ووقت مكوث قدره 30 دقيقة. ومع ذلك، تكشف التحليلات الفيزيائية والكيميائية عن فروقات كبيرة مقارنة بتنبؤات النموذج، حيث لوحظ انخفاض بنسبة 56٪ في مردود الفحم الحيوي و19٪ في مردود الغاز، و25٪ في مردود الزيت الحيوي مقارنة بالقيم الناتجة عن المحاكاة.

الكلمات المفتاحية: الفحم الحيوي، المردودية، الكتلة الحيوية، الزيت الحيوي، التحلل الحراري، أسين بلس، زمن الإقامة.

**Introduction
Générale**

Le dattier *Phoenix dactylifera L.* tire son nom du grec « *Phoenix* », qui fait référence au dattier, et *dactylifera* est issu du terme « *dactylos* » signifiant doigt en phénicien, une référence à la forme de son fruit. Le palmier dattier, dont l'origine remonte à plus de mille ans, est cultivé au Moyen-Orient et en Afrique du Nord. Il s'agit d'un arbre imposant qui dépasse les 30 mètres de hauteur et s'étend sur 6 mètres. Son stipe est moins épais que celui du phœnix canarien sis. C'est une espèce dioïque monocotylédone arborescente qui fait partie d'une large famille de palmiers, arbres à palmes, et qui produit des dattes [1,2].

Effectivement, le palmier dattier, qui est au cœur de l'agriculture, fournit un éventail varié de sous-produits agricoles couramment utilisés à des fins domestiques. L'évaluation du poids des sous-produits est basée sur des volumes annuels significatifs, tels que des tonnes de folioles de palmes sèches, tonnes pour les résidus de dattes et 5000 tonnes pour les pédicelles de dattes [3, 4].

La riche composition en lignocellulose des résidus de palmier dattier les rend parfaitement adaptés à la fabrication de biochar. Avec sa richesse en composés carbonés, sa composition garantit une production importante de biochar, alors que sa disponibilité propose une alternative de matière première durable et profitable. L'exploitation des résidus de *Phoenix dactylifera* pour la fabrication de biochar présente un double bénéfice: minimiser l'accumulation de déchets agricoles tout en produisant un matériau de valeur susceptible d'être utilisé pour améliorer les sols, adsorber les polluants et stocker les énergies renouvelables. En outre, l'incorporation de la production de biochar dans les systèmes de culture des palmiers à dattes peut renforcer la durabilité en établissant des pratiques de gestion des déchets en circuit fermé qui bénéficient tant à la productivité agricole qu'à la préservation de l'environnement.

L'exploitation des résidus de *Phoenix dactylifera* pour le biochar présente deux bénéfices majeurs : l'atténuation du surplus des déchets agricoles et la création d'un matériau précieux pouvant être utilisé pour améliorer les sols, absorber les polluants et stocker l'énergie renouvelable. Par conséquent, l'objectif principal de notre étude est d'exploiter les résultats de simulation pour créer des modèles réalistes en calibrant les modèles sur les données d'implantation afin d'améliorer la conception et la rénovation tout en comprenant les processus en validant les données à l'aide du système de simulation Aspen Plus. Cette étude comprend trois chapitres : le premier est Introduction générale sur les déchets de palmier (biochar), Chapitre 2 : Matériel et méthodes, Chapitre 3 : Résultats et discussion.

Chapitre I

**Introduction générale (les Déchets palmier
biochar / Simulation Aspen plus)**

I. Le Biochar des déchets palmier

Le *Phoenix dactylifera*, souvent désigné sous le nom de palmier dattier, est une végétation couramment cultivée, particulièrement dans les zones arides et semi-arides du Moyen-Orient, d'Afrique du Nord et de certaines parties de l'Asie. Le secteur mondial de la culture du palmier dattier produit d'énormes volumes de déchets agricoles, y compris des noyaux de dattes, des frondes, des feuilles et des résidus issus du processus de transformation des fruits. Ces résidus sont fréquemment négligés ou détruits par brûlage et enfouissement, ce qui contribue à la pollution environnementale et à une gestion inefficace des ressources [5].

Le biochar est devenu un matériau durable prometteur avec diverses applications dans l'agriculture, la réhabilitation environnementale et le stockage d'énergie. Il s'agit d'une substance poreuse riche en carbone produite par la conversion thermo-chimique de la biomasse dans des conditions limitées en oxygène, généralement par pyrolyse, carbonisation hydrothermale ou gazéification. Les propriétés physico-chimiques uniques du biochar, notamment sa grande surface spécifique, sa stabilité et sa capacité de rétention d'eau et de nutriments, en font un amendement efficace du sol, contribuant à améliorer la fertilité du sol, la séquestration du carbone et l'adsorption des polluants [6].

I.1. Généralités sur les palmiers dattiers (*Phoenix dactylifera L.*) :

Le palmier dattier est une plante pérenne, classée dans le groupe des *Spadiciflores* avec l'existence des dattiers mâles dokhar et des dattiers femelles Nakhla, leur ordre est *Palmale*, la famille des *Palmacées (Arecaceae) Angiospermes, monocotylédones*, qui comprennent 200 genres et plus de 2500 espèces, la sous-famille des *Coryphoïdées*, la tribu des *Phoénicées*, Genre : *Phoenix* et espèce: *Dactyliféra* [4, 7]. Elle est l'une des cinq espèces domestiques des *Arecaceae* ; les autres espèces sont : le palmier areca (*Areca catechu*), le palmier pêche (*Bactris gasipaes*), le cocotier (*Cocos nucifera*) et le palmier à huile (*Elaeis guineensis*)[7].

I.2. Description morphologique du palmier dattier

Selon divers auteurs, la morphologie de cette espèce se présente de la manière suivante : C'est une plante monocotylédone à dominance de croissance apicale qui se compose de trois éléments : un système racinaire, un organe végétatif comprenant le tronc et les feuilles, et un organe reproducteur qui inclut des inflorescences mâles ou femelles.

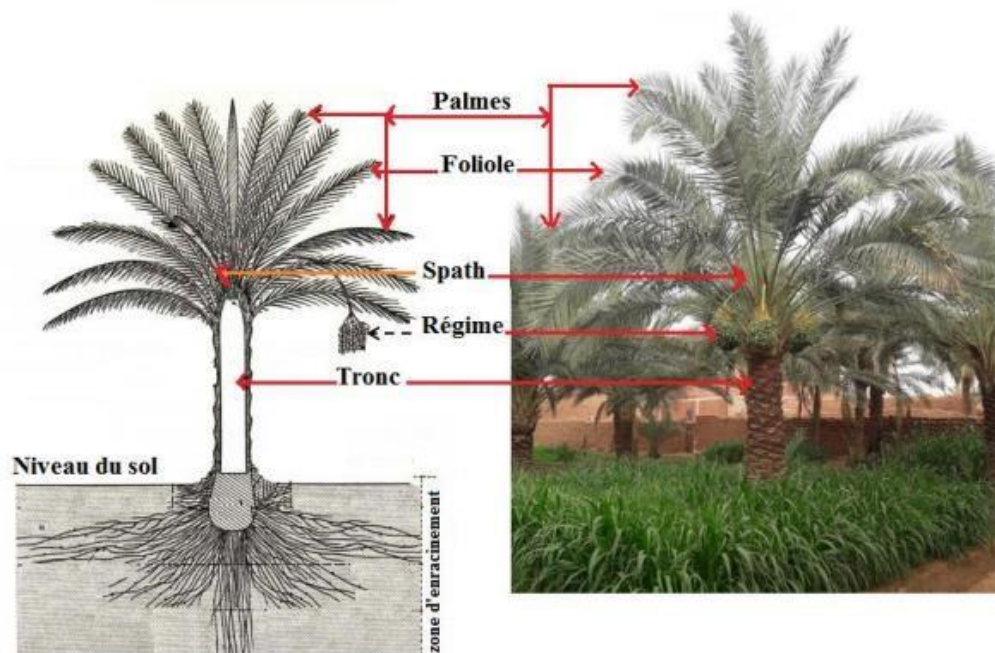


Figure 01: Schéma descriptif d'un palmier-dattier [8].

I.3. Composition chimique des déchets de palmiers dattiers

Afin d'établir la composition chimique des résidus de palmiers dattiers, nous avons procédé à des analyses sur la matière sèche, déterminant ainsi la composition grâce à la méthode [9]. L'énergie brute a quant à elle été évaluée par le biais de la calorimétrie adiabatique.

Tableau 01 : Composition chimique des résidus de palmier dattier exprimée en (%MS)

	MO	NT	CB	Lipid	MM	ST	EM
Noyau de datte	93.4	6.3	83.1	6.15	6.6	-	2271
Pâte de dattes	95.4	5.2	31.7	7.1	4.6	63.3	2300
Rb de dattes	5.2	2.5	2.7	0.5	17.5	69.7	2278
Palmes sèches	81.2	4.3	28.7	2.15	11.6	-	1300
Pdc de dattes	92.1	4.5	40.1	7.9	10.2	-	1498

L'analyse chimique des divers éléments indique une richesse en matière organique, avec un taux variant entre 81% et 95% MS. Le pourcentage de cellulose brute (CB) est important dans les pédicelles des dattes avec 40% de matière sèche, suivi par les résidus de pâte de dattes et les palmes sèches qui contiennent respectivement 31,7% et 28,7% de matière sèche. La proportion de matières azotées totales (MAT) est négligeable dans tous les genres de produits recyclés, ne dépassant pas 6% de la matière sèche.

Chapitre I : Introduction Générale de Déchets Palmier

Dans les résidus de la pâte de dattes, les sous-produits de datte et les noyaux, l'énergie métabolisable est significative, soit 2300 kcal/kg pour la matière sèche, 2278 kcal/kg pour la matière sèche et 2271 kcal/kg pour le noyau respectivement.

La datte est aussi reconnue pour sa quantité significative de vitamine A et de vitamine B, qui jouent un rôle essentiel dans le développement. Par ailleurs, les vitamines du groupe B jouent un rôle crucial dans de nombreuses réactions enzymatiques, notamment celles liées au métabolisme des glucides [4].

Tableau 02: composition chimique des résidus de palmier dattier en % MS (palmes sèches, pédicelles et débris de dattes) [3].

	MS	MO	MM	MAT	CB	NDF	ADF	CV	HCO SE	LIG N	CI
Palmes Sèches	94.73	84.47	15.25	3.90	30.70	89.44	65.30	32.83	23.98	20.45	12.2
Pédicelles	39.98	91.97	08.03	03.93	36.55	83.25	53.88	20.04	29.06	19.68	0.47
Rebuts de dattes	90.40	95.82	04.18	04.17	09.50	24.93	12.94	7.21	11.45	05.26	0.45

Il a été constaté que le niveau de MS est considérable dans les palmes sèches et les résidus de dattes, atteignant $94,37 \pm 0,50$ et $90,40 \pm 0,31\%$ respectivement, et faible dans les pédicelles. D'autre part, la proportion de MO variait entre $95,82 \pm 0,06$ et $84,74 \pm 0,13\%$ du MS tandis que la matière minérale (MM) ne dépasse pas 16%. Le ratio de MAT fluctue entre $4,17 \pm 0,11$ et $3,93 \pm 0,35$. De plus, le taux de cellulose brute (CB) est supérieur dans les pédicelles avec une moyenne de $36,55 \pm 0,17\%$, alors qu'il est relativement faible dans les rebuts de dattes à $9,59 \pm 1,53\%$. Quant au pourcentage total de paroi (NDF), il est élevé chez les palmes avec une estimation d'environ $89,44 \pm 0,16\%$. Le contenu total (ADF) est réduit dans les résidus de dattes, affichant un taux de $12,02 \pm 0,69\%$, tandis que la vraie cellulose (CV) présente un pourcentage fluctuant entre $32,83 \pm 3,31\%$ et $7,21 \pm 0,16\%$. Concernant l'hémicellulose (HCOSE), elle est largement présente dans les pédicelles avec un taux de $29,06 \pm 0,63\%$.

En revanche, les cendres insolubles (CI) sont presque absentes des résidus de dattes et des pédicelles. La lignine (LIGN), quant à elle, varie entre $20,45 \pm 2,36$ et $5,26 \pm 1,60\%$.

Chapitre I : Introduction Générale de Déchets Palmier (Biochar)

I.4. Types de déchets issus de la culture et de la transformation du palmier dattier

La culture du palmier à fruits et la transformation de ces derniers produisent divers types de résidus, chacun présentant des propriétés physiques et chimiques spécifiques. Les catégories majeures de déchets générés par *Phoenix dactylifera* incluent [10]

I.4. 1. Feuilles et frondes du palmier dattier :

La gestion et la culture des palmiers à dattes favorisent une importante production de feuilles et de frondes. Un palmier adulte génère en moyenne 10 à 20 feuilles annuellement, avec certaines pouvant s'étendre jusqu'à 4 mètres de long. Ces restes sont essentiellement composés de cellulose, d'hémicellulose et de lignine, ce qui les rend propices à leur transformation thermique en biochar [11].

I.4. 2. Troncs de palmier dattier

On a fréquemment recours à l'abattage et au renouvellement des vieux palmiers dattiers. Les troncs de palmiers à dattes présentent une importante teneur en matière lignocellulosique, notamment en cellulose et en lignine, ce qui les rend parfaits pour la fabrication de biochar. La composition dense des troncs de palmiers offre une haute productivité en carbone [11].

I.4.3. Noyaux de palmier dattier (graines)

Le noyau (ou graine) de la datte présente une forme allongée et une taille qui peut varier. Il pèse généralement autour d'un gramme, constituant 7 à 30 % du poids total de la datte. Le noyau de la datte, entouré d'un endocarpe membraneux, est formé d'un albumen corné de nature dure qui est préservé par une enveloppe cellulosique [4].

Les noyaux représentent un produit dérivé important lors du processus de transformation des dattes. Ces structures lignocellulosiques dures représentent approximativement 10 à 15 % de la masse totale du fruit. Les noyaux de dattes contiennent une grande quantité de carbone d'hémicellulose, de cellulose et de lignine. Les composés aromatiques présents dans le noyau contribuent à renforcer la stabilité thermique du biochar, le rendant précieux pour des utilisations en environnement, comme l'assainissement et l'élimination des métaux lourds ou encore le traitement des eaux usées [11].

Selon la littérature, les noyaux, peuvent être transformés en une farine dont la valeur nutritive pour le bétail est comparable à celle de l'orge. La pulpe ne contient que 8 types d'acides gras, et à des concentrations très minimales, alors que la dernière en compte : [4,45]

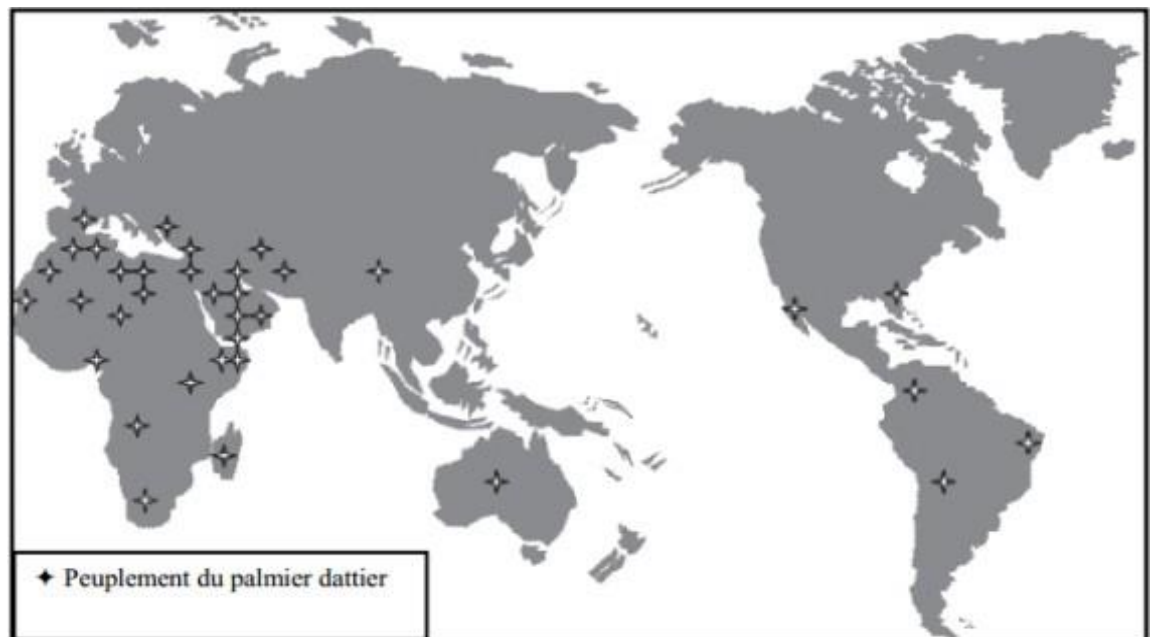
Chapitre I : Introduction Générale de Déchets Palmier (Biochar)

Les noyaux de dattes sont riches glucides, fibres, cellulose (16.2%), cendre (1.12%), protéines (5.22%) et lipides. Elles sont sources des minéraux notamment en potassium, phosphore, magnésium, calcium, sodium et fer [39,40].

I.5. Répartition géographique du palmier dattier

I.5.1. Dans le monde :

Le dattier est une espèce xérophile qui ne peut normalement fleurir et fructifier que dans les déserts chauds [11]. En Afrique méditerranéenne et au Moyen-Orient la culture intensive du palmier dattier est pratiquée. L'Espagne est le seul pays européen qui produit des dattes,



principalement dans la célèbre palmeraie d'Elche [12].

I.5.2. En Algérie :

En Algérie, la culture du palmier dattier est concentrée dans les oasis sahariennes, notamment dans les wilayas de Biskra, El Oued, Ouargla et Adrar, qui constituent les principaux bassins phoenicicoles du pays [14]. Éloue Messar (1996),

Selon les données récentes relayant les statistiques de la FAO (2024), la production nationale a dépassé 1,3 million de tonnes de dattes, plaçant l'Algérie au 3^e rang mondial derrière l'Égypte et l'Arabie saoudite sur une superficie dépassant 179 000 hectares. Les wilayas de Biskra et d'El-Oued représentent 52% de la superficie totale.

Chapitre I : Introduction Générale de Déchets Palmier (Biochar)

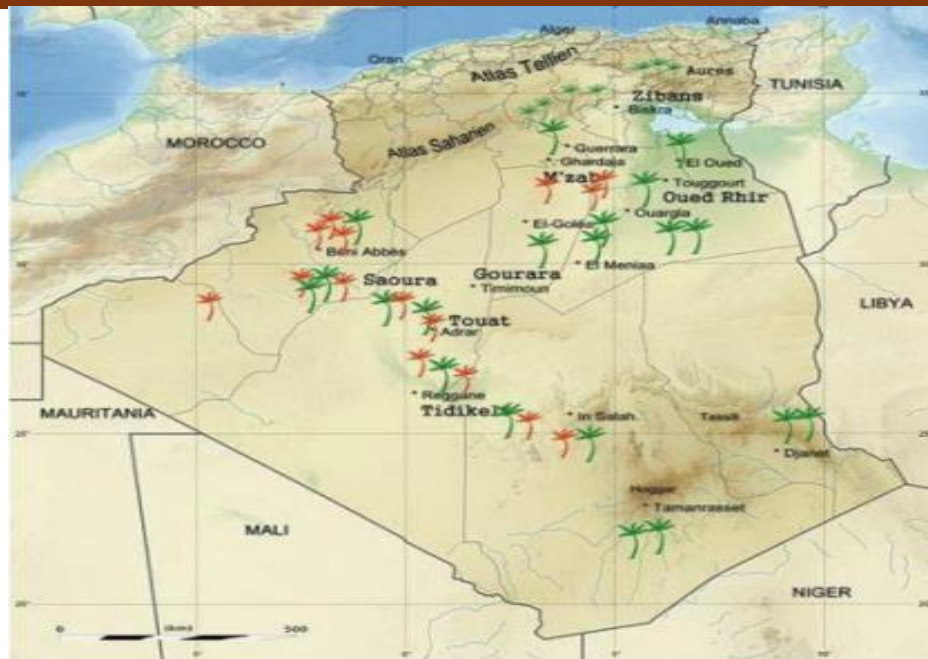


Figure 02: Carte représentative de différentes zones de palmiers dattiers ; ceux en rouge sont infestés de bayoud, ceux en vert ne sont pas infestés [14].

Tableau 03: Nombre de palmiers dattier en Algérie par wilaya en 2014, [14].

Classement	Wilaya	N de palmiers dattier	Pourcentage en %
01	Biskra	4 286 350	23,27
02	El-oued	3 747 330	20,35
03	Adrar	3 725 420	20,23
04	Ouargla	2 562 268	13,91
05	Bechar	1 626 432	8,83
06	Ghardaia	1 230 910	6,68
07	Tamanrasset	688 947	3,74
08	Ilizi	129 103	0,70
09	Khenchela	124 042	0,67
10	El-bayadh	63 900	0,35
-	Total	18 418 430	100,00

II.1. Généralités sur le biochar

Les résidus de palmier dattier, notamment les noyaux et les feuilles, sont particulièrement adaptés à la gazéification grâce à leur composition lignocellulosique qui favorise la production de gaz synthétique.

La gazéification peut grandement diminuer la quantité de déchets tout en générant du biochar pouvant être utilisé pour améliorer les sols et pour la dépollution.

Le biochar est un matériau solide riche en carbone obtenu par transformation de la biomasse en milieu oxydant par pyrolyse, gazéification ou carbonisation hydrothermale. Il est utilisé

Chapitre I : Introduction Générale de Déchets Palmier (Biochar)

pour la gestion environnementale, l'amélioration des sols et les systèmes énergétiques durables, favorisant la valorisation des déchets, le captage du carbone et le recyclage des ressources, tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre et la dégradation des sols [17].

Le biochar peut être classifié en fonction de divers critères, tels que le type de matière première employée, le procédé de fabrication et l'utilisation prévue. Ces classifications contribuent à évaluer la convenance de divers biochar pour des applications spécifiques dans le domaine agricole, industriel et de la dépollution [18]



Figure 03: Le biochar

II.2. Classification basés sur le type de biochar

Le biochar peut être dérivé de diverses sources de biomasse, chacune influençant les propriétés finales du produit [18] :

II.2.1. Biochar lignocellulosique

Issu du bois, des résidus agricoles et d'autres matériaux végétaux, ce produit se caractérise généralement par sa stabilité et sa haute porosité carbone. Il est donc particulièrement approprié pour l'amélioration des sols et l'adsorption des polluants.

II.2.2. Biochar à partir de fumier

Élaboré à partir de fumier d'animaux, généralement riche en éléments nutritifs indispensables tels que l'azote, le phosphore et le potassium, ce qui le positionne comme un ajout précieux aux fertilisants.

Chapitre I : Introduction Générale de Déchets Palmier (Biochar)

II.2.3. Biochar issu d'algues

Produit à partir de macro algues ou de macro algues, il se distingue par sa surface importante et la présence de groupes fonctionnels spécifiques, ce qui en fait un matériau parfait pour le traitement des eaux usées.

II.2.4. Biochar à pyrolyse lente

Fabriqué à des températures modérées (300–600°C) et soumis à un temps de résidence prolongé, ce qui conduit à une production élevée de biochar et une teneur en carbone stable. On privilégie cette technique pour les applications d'amélioration du sol, grâce à sa faculté à conserver les éléments nutritifs. [20]

II.2.5. Biochar à pyrolyse rapide

Produit à des températures supérieures à 600 °C et sur de courtes durées, générant des quantités importantes de biochar mais une concentration plus élevée en bio huile. On utilise fréquemment ces biochars dans des applications énergétiques ou pour la fabrication de charbon actif.

II.2.6. Biochar issu de la gazéification

Produit dérivé des procédés de gazéification, durant lesquels la biomasse est transformée en gaz de synthèse à des températures excédant les 800 °C. Ce biochar a généralement une grande porosité et peut être utilisé pour la séquestration et l'adsorption du carbone. [17]

II.2.7. Biochar de carbonisation hydrothermale

Produit dans un milieu aqueux à une température contrôlée (180-250°C) et sous forte pression, ce qui aboutit à un hydrochar fortement carboné doté de caractéristiques physicochimiques. [21]

II.2.8. Biochar agricole

Utilisé principalement pour augmenter la fertilité des sols, la capacité de rétention d'eau et la séquestration du carbone. [22]

II.2.9. Biochar industriel

Employé pour le stockage d'énergie, l'élaboration de matériaux bio sources et comme matière première pour la fabrication du charbon actif. [23]

II.2.10. Biochar environnemental

Employé pour l'adsorption des contaminants, le traitement des eaux résiduaires et comme élément dans les matériaux de construction écologiques. [24]

II.3. Propriétés physiques et chimiques du biochar

Les caractéristiques physicochimiques du biochar dépendent du type de biomasse utilisé, du processus de conversion thermochimique et des conditions opérationnelles spécifiques mises en œuvre lors de la production.

II.3.1. Propriétés physiques du biochar

1. Porosité et surface :

Le biochar est réputé pour sa structure très poreuse, qui amplifie sa superficie et optimise sa capacité à conserver l'eau, à adsorber les nutriments et à piéger les polluants.

Généralement, une température de pyrolyse plus élevée aboutit à un maillage poreux plus avancé, favorisant son efficacité dans les utilisations d'adsorption et de filtration.

2. Densité apparente

La faible densité apparente du biochar facilite son intégration dans le sol et d'autres environnements, les biochars à faible densité étant adaptés à la modification du sol et les biochars à densité plus élevée étant adaptés à un usage industriel [6].

3. Conductivité électrique (CE)

Certains biochar démontrent des caractéristiques de conduction qui peuvent être utilisées pour le stockage d'énergie et les applications électrochimiques. La conductivité électrique du biochar est influencée par la présence de minéraux inorganiques et le phénomène de carbonisation.

4. Stabilité thermique :

Grâce à sa forte concentration en carbone, le biochar offre une remarquable stabilité thermique, favorisant ainsi sa durabilité environnementale et son rôle efficace de séquestre de carbone. [19]

II.3.2. Propriétés chimiques du biochar

1. Contenu en carbone

La part stable de carbone dans le biochar détermine son potentiel pour une séquestration durable à long terme. Une pyrolyse à des températures plus hautes génère habituellement du biochar présentant une stabilité carbone supérieure.

2. pH et capacité d'échange cationique (CEC)

Une majorité de biochar présentent un caractère alcalin, ce qui peut contribuer à l'équilibre des sols acides et à optimiser la conservation des nutriments via des procédés d'échange cationique. La CEC fluctue selon les conditions de production et la composition du matériau brut. [25]

3. Groupes fonctionnels :

Des groupes fonctionnels riches en oxygène tels que l'hydroxyle (-OH), le carboxyle (-COOH) et le carbonyle (C=O) ont un impact sur la réactivité du biochar, son potentiel d'adsorption ainsi que ses relations avec le sol et l'eau.

4. Constituants de base :

Le biochar renferme des proportions fluctuantes de macronutriments (N, P, K) et de micronutriments (Ca, Mg, Fe, Mn), susceptibles d'accroître la fertilité du sol lorsqu'ils sont utilisés en tant qu'amendement. Toutefois, il est crucial de surveiller attentivement la présence de métaux lourds afin d'éviter d'éventuels dangers pour l'environnement [26].

II. 4. Composition chimique et adéquation à la production de biochar

La détermination de la pertinence des déchets de *Phoenix dactylifera* pour la production de biochar dépend de leur composition chimique, qui fluctue selon la partie précise de la plante exploitée. Les éléments clés qui affectent la performance et la qualité du biochar incluent la cellulose, l'hémicellulose, la lignine, le taux de cendres et la composition chimique (carbone, hydrogène, oxygène et minéraux).

Composition en lignocellulose : La biomasse végétale est principalement constituée de lignocellulose, qui joue un rôle essentiel dans la production de biochar lors du processus de pyrolyse.

Chapitre I : Introduction Générale de Déchets Palmier (Biochar)

La biomasse de *Phoenix dactylifera* se compose généralement de :

- Cellulose (30 à 50 %) – Un polysaccharide qui participe à la composition du charbon et aux propriétés de sa dégradation thermique.
- Hémicellulose (15-30 %) – Un polymère varié qui se dégrade à faible température, ayant un impact sur la porosité du biochar.
- Lignine (15 à 35 %) - Un polymère aromatique complexe qui contribue à la stabilité et à la rétention du carbone dans le biochar. [27]

II.5. Teneur en minéraux et en cendres

La composition en cendres de la biomasse a une incidence sur la stabilité thermique et la valeur nutritive du biochar produit. Les résidus de dattier, souvent riches en minéraux tels que de carbone (C), d'hydrogène (H), d'oxygène (O) et d'azote (N), le potassium (K), le calcium (Ca), le magnésium (Mg) et le phosphore (P), peuvent renforcer les propriétés du biochar en matière de fertilité des sols [28].

II.6. Carbone et composition élémentaire

Les propriétés du biochar, y compris sa capacité d'adsorption, son pH et sa stabilité, sont influencées par la composition élémentaire des résidus de palmiers dattiers. On note les caractéristiques communes suivantes :

- Concentration importante en carbone (50-70%) : Cruciale pour la stabilité du biochar et la séquestration du carbone sur le long terme.
- Faible concentration en hydrogène et en oxygène : Signe d'un bon rendement en carbonisation thermique.
- La présence de groupes fonctionnels influence la capacité du biochar à retenir les nutriments et à adsorber les polluants.

II.7. Technologies de production de biochar

Le biochar est majoritairement produit par des techniques de conversion thermochimique, impliquant la décomposition de la biomasse dans un milieu restreint en oxygène. La pyrolyse est la technologie la plus répandue parmi celles-ci, grâce à sa capacité à générer du biochar riche

Chapitre I : Introduction Générale de Déchets Palmier (Biochar)

en carbone et des sous-produits précieux comme la bio-huile et le gaz de synthèse.

Les caractéristiques et l'efficacité du biochar produit dépendent grandement de la méthode de pyrolyse spécifique et des conditions du processus mises en œuvre [27].

II.7.1. Procédé de pyrolyse

Le biochar est fabriqué par pyrolyse à une température variant de 350 à 1000 °C dans un milieu pauvre ou exempt d'oxygène, et ce, à partir de biomasses variées (Européen Biochar Fondation ; International biochar Initiative. Le processus thermochimique de conversion de la biomasse génère un produit carboné stable, le biochar, qui peut persister dans le sol pendant des centaines d'années ou même des dizaines [29].

II.7.2. Types de pyrolyse (pyrolyse lente, rapide et claire)

La catégorisation de la pyrolyse repose sur des critères comme la vitesse d'échauffement, la température et la durée de présence, qui influencent considérablement le rendement et la qualité du biochar. Les trois formes principales de pyrolyse sont :

a- Pyrolyse à basse température : Spécificités du procédé

La pyrolyse lente se distingue par des taux de chauffage modérés (habituellement de 0,1 à 1 °C par seconde) et des durées de séjour prolongées (de plusieurs minutes à plusieurs heures).

Gamme de température : Habituellement effectuée entre 350°C et 600°C.

-Performance du biochar : supérieure, excédant fréquemment 30 à 50 % de la masse initiale de la biomasse.

-Applications : Principalement employé pour la fabrication de biochar, grâce à sa capacité à maintenir un quota élevé de carbone fixe.

b- Pyrolyse rapide Caractéristiques du processus

Implique une vitesse de chauffage plus élevée (10 à 200 °C par seconde) et un temps de séjour beaucoup plus court (généralement quelques secondes).

Plage de température : Typiquement 450°C à 600° C.

Rendement du biochar : inférieur à celui de la pyrolyse lente (~10–30 %), avec une fraction plus élevée de production de bio huile.

Chapitre I : Introduction Générale de Déchets Palmier (Biochar)

Applications : Privilégié pour la production de biocarburants, bien que le biochar puisse encore être récupéré comme produit secondaire.

c- Pyrolyse éclair

o Attributs du processus : Démarqué par des vitesses de chauffage très rapides ($> 1\ 000\ ^\circ\text{C}$ par seconde) et des durées de présence allant de quelques millisecondes à quelques secondes.

o Plage de température : fréquemment au-delà de $800\ ^\circ\text{C}$.

o Rendement du biochar : minimal ($\sim 5\text{--}10\ \%$), la majeure partie de la biomasse étant convertie en bio-huile et en gaz de synthèse.

o Applications: Principalement utilisé dans la production de biocarburants et de produits chimiques, avec une récupération limitée du biochar.

II .8. Influence des paramètres de procédé sur la production de biochar

Les propriétés du biochar sont fortement influencées par les paramètres clés du procédé, notamment la température, la vitesse de chauffe et le temps de séjour. Chacun de ces facteurs affecte les caractéristiques physicochimiques du biochar, notamment sa teneur en carbone, sa porosité et ses groupes fonctionnels de surface. [27]

1. Température :

o Des températures plus élevées (supérieures à $500\ ^\circ\text{C}$) entraînent une carbonisation accrue, ce qui donne un biochar avec une teneur en carbone fixe plus élevée et une teneur en matières volatiles plus faible.

o À des températures plus basses ($300\text{--}400\ ^\circ\text{C}$), le biochar conserve davantage de groupes fonctionnels organiques, ce qui le rend plus adapté à la rétention des nutriments dans le sol.

o Des températures excessivement élevées ($> 700\ ^\circ\text{C}$) peuvent réduire le rendement du biochar tout en augmentant sa porosité et sa surface, ce qui est bénéfique pour les applications d'adsorption.

2. Taux de chauffage :

o Une vitesse de chauffage lent permet une meilleure dégradation thermique des composants de la biomasse, conduisant à un biochar plus stable avec une rétention de carbone plus élevée.

o Un taux de chauffage rapide réduit le rendement du biochar en favorisant la production de bio-huile et de gaz de synthèse, bien qu'il puisse améliorer la réactivité de surface du biochar.

Chapitre I : Introduction Générale de Déchets Palmier (Biochar)

3. Temps de séjour :

o Des temps de séjour plus longs permettent une plus grande décomposition de la biomasse, augmentant ainsi la carbonisation et la stabilité thermique. Cependant, une exposition prolongée à des températures élevées peut réduire le rendement du biochar.

o Les temps de séjour courts, notamment dans la pyrolyse rapide et flash, favorisent la production de bio-huile et de gaz de synthèse au détriment du biochar.

II.9. Impact des conditions de pyrolyse sur le rendement et les propriétés du biochar :

L'interaction entre les conditions de pyrolyse et les caractéristiques du biochar détermine ses applications potentielles. Parmi les principaux effets, on peut citer [27]:

- Rendement : Des températures plus basses et des taux de chauffage lents produisent des rendements de biochar plus élevés, tandis que des températures plus élevées et un chauffage rapide favorisent la production de bio-pétrole et de gaz.
- Surface et porosité : Des températures plus élevées et des temps de séjour prolongés améliorent la porosité du biochar, le rendant plus efficace pour les applications d'adsorption.
- Teneur en carbone fixe : Augmente avec les températures plus élevées, améliorant la stabilité et la longévité du biochar dans le sol.
- Rétention des nutriments : des températures de pyrolyse plus basses préservent davantage de nutriments végétaux (par exemple, K, P, Mg) , améliorant ainsi le rôle du biochar comme amendement du sol.

En ajustant soigneusement ces paramètres de processus, le biochar peut être optimisé pour une variété d'utilisations, notamment l'amélioration des sols, l'adsorption des polluants et la séquestration du carbone.

II.10. Rapports entre l'hydrogène et l'oxygène (H/C et O/C) :

On utilise :

- les rapports atomiques H/C et O/C pour déterminer le niveau de carbonisation et la résilience du biochar face à la décomposition microbienne.

-Un taux bas H/C (0,3) témoigne d'un haut niveau d'aromaticité et de stabilité thermique, crucial

Chapitre I : Introduction Générale de Déchets Palmier (Biochar)

pour la capture du carbone sur le long terme.

-Le rapport O/C (0,2) dénote la présence de groupes fonctionnels riches en oxygène, qui ont un impact sur la chimie de surface et la réactivité du biochar.

II.11. Teneur en azote et en éléments nutritifs :

-La concentration en azote du biochar fabriqué à partir de déchets de Phoenix dactylifera fluctue selon la portion de biomasse employée.

-Les résidus de protéines tendent à augmenter la teneur en azote des feuilles et des frondes. - Les fosses et la biomasse ligneuse présentent des niveaux d'azote inférieurs tout en fournissant une stabilité du carbone supérieure.

- Le biochar avec un niveau d'azote modéré favorise la fertilité du sol en jouant le rôle de source nutritive à libération progressive

II.12. pH, capacité d'échange cationique (CEC) et stabilité

Le pH, la Capacité d'Échange Cationique (CEC) et la stabilité chimique du biochar influencent principalement son interaction avec le sol et l'eau [31].

PH et alcalinité :

-Le biochar provenant des déchets de Phoenix dactylifera est généralement alcalin (pH 7,5–10) en raison de la présence de carbonates, d'oxydes et d'hydroxydes formés lors de la pyrolyse.

-La capacité du biochar à adsorber et relâcher des cations tels que K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , qui influencent la fertilité du sol, est mesurée par la CEC [25].

II.13. Applications du biochar

II.13.1. Amélioration agricole et des sols

-Amélioration de la qualité du sol grâce à l'enrichissement en nutriments tels que l'azote, le phosphore et le potassium, ainsi qu'en eau.

-Encourager l'activité des microbes et le niveau de décomposition.

-Régule le pH et contrôle l'humidité.

Chapitre I : Introduction Générale de Déchets Palmier (Biochar)

II.13.2. Applications environnementales du biochar

- S'attaquer aux enjeux environnementaux en réduisant l'impact du changement climatique
- Captage du carbone et absorption des métaux lourds présents dans l'air. Gestion des eaux
- Usées et de la contamination de l'eau.

II.13.3. Utilisations énergétiques et industrielles du biochar

- Renforcement de l'efficacité de la combustion et réduction des émissions grâce à l'utilisation du charbon actif.
- Génération d'énergie à partir de combustible végétal solide en tant que substitut au coke de pétrole.
- Utilisation dans les super condensateurs et les batteries, la stabilité structurelle et la conductivité électrique.

II.14. Avantages économiques et environnementaux de la production de biochar

La production de biochar est influencée par la disponibilité des ressources matérielles, la technologie utilisée pour sa fabrication, la demande du marché et les encouragements réglementaires.

1. Croissance du marché et demande de biochar
 - ❖ Facteurs de coût et rentabilité de la production de biochar PO.
 - ❖ La rentabilité de la production de biochar dépend : Coûts des matières premières et frais de traitement
2. Réduction de l'empreinte carbone et atténuation du changement climatique.
3. Valorisation des déchets et utilisation durable de la biomasse.

Performance et qualité du biochar issu de la torréfaction : La torréfaction a généralement tendance à offrir des rendements de biochar plus importants (30 et 70 %) comparativement à la gazéification, mais elle est moins efficace en termes de rendement par rapport à la pyrolyse lente.

- Le biochar issu présente une stabilité du carbone modérée, ce qui pourrait en faire un amendement de sol ou un transporteur d'énergie potentiel.
- Certains éléments volatils sont retenus par celui-ci, pouvant affecter son adsorption et ses caractéristiques agricoles [31] [32] [33] [32] [34] [35].

III. Simulation Aspen plus

Chapitre I : Introduction Générale de Déchets Palmier (Biochar)

La simulation de procédés avec Aspen Plus vous permet de prédire le comportement d'un procédé à l'aide de relations techniques de base telles que les bilans massique et énergétique, les équilibres de phases et chimiques, et la cinétique de réaction. Grâce à des données thermodynamiques fiables, des conditions de fonctionnement réalistes et les modèles d'équipement rigoureux d'Aspen Plus, vous pouvez simuler le comportement réel d'une usine. Aspen Plus peut vous aider à concevoir de meilleures usines et à accroître la rentabilité de vos installations existantes. [38]

III.1. Présentation de Aspen plus

ASPEN signifie Système Avancé d'Ingénierie des Procédés. Il se base sur une modélisation de schéma de procédé. Il est important de mentionner qu'Aspen a été substitué par Aspen Plus dans les versions récentes. Un logiciel de simulation de schéma de procédé permet de représenter quantitativement une installation chimique. En plus du réacteur principal, elle englobe aussi les phases de prétraitement et de post-traitement. Par conséquent, la modélisation intégrale d'un processus chimique, depuis les matières premières jusqu'à la production finale, est symbolisée par divers pictogrammes. Chacun de ces pictogrammes illustre une opération spécifique, un procédé chimique, un flux de matière entrant ou sortant, un flux d'énergie entrant ou sortant, ou encore un signal électrique ou pneumatique entrant ou sortant. [44]

III.2. Utilisations de Aspen plus

Aspen Plus permet d'effectuer un large éventail de tâches supplémentaires.

- Réaliser des analyses de sensibilité et des études de cas
- Générer des résultats graphiques et tabulaires personnalisés
Estimer et régresser les propriétés physiques
- Adapter les modèles de simulation aux données de l'usine
- Optimiser votre procédé
- Transférer les résultats vers des feuilles de calcul
- Partager les entrées et les résultats avec d'autres applications Windows via OLE[38]

Domaines d'utilisation

Domaine de produits chimiques spécialisés

Chapitre I : Introduction Générale de Déchets Palmier (Biochar)

Aspen Plus propose deux modèles d'opérations unitaires par lots, particulièrement utiles pour les applications de chimie de spécialité :

- R Batch, un réacteur par lots
- Batch Frac, pour la distillation par lots

La méthode de propriété de base par défaut est NRTL, largement utilisée pour les systèmes chimiques idéaux et non idéaux à basse pression.

Aspen Plus propose des modèles de coefficients d'activité et des équations d'état supplémentaires pour la modélisation des systèmes chimiques.

Chaque modèle de coefficient d'activité dispose d'une vaste base de données de paramètres d'interaction binaires adaptés à la modélisation des systèmes chimiques.

Aspen Plus récupère et affiche automatiquement ces paramètres binaires. Si la base de données ne contient pas de paramètres binaires pour une paire de composants, Aspen Plus peut estimer les paramètres binaires manquants pour votre application.

Si vous disposez de données mesurées pour votre système chimique, vous pouvez utiliser Aspen Plus pour effectuer une régression des paramètres du modèle. Aspen Plus propose des outils interactifs pour analyser les propriétés et l'équilibre vapeur-liquide des systèmes chimiques. Si le procédé utilise des électrolytes, l'assistant Électrolytes est utilisé pour définir les réactions et les espèces ioniques. La méthode NRTL sera remplacée par ELECNRTL, et la base de données des électrolytes sera utilisée. [38]

B-Domaine des solides

Aspen Plus permet de modéliser des solides n'importe où dans un schéma de procédé. Une large gamme de modèles d'opérations unitaires pour les équipements de manutention des solides est disponible, notamment les cristallisoirs, les concasseurs, les cribles et les cyclones. Consultez la section « Démarrage de la modélisation » du Guide de l'utilisateur d'Aspen Plus 11.1, « Création d'un modèle de simulation » 2-21.

Procédés avec des solides pour apprendre à modéliser les procédés solides étape par étape. Le modèle Solides présente les propriétés et les flux de composants de tous les types de composants (vapeur, liquide et solide). Vous pouvez également demander à Aspen Plus de générer :

- Concentrations globales du flux
- Fractions vapeur
- Fractions solides

Si vous utilisez des attributs dans votre simulation, les attributs des sous-flux et des

Chapitre I : Introduction Générale de Déchets Palmier (Biochar)

composants apparaissent dans le rapport de flux par défaut. [38]

2. Modèles utilisateur

Aspen Plus propose plusieurs méthodes pour créer vos propres modèles d'opérations unitaires

- Fortran
- Excel
- Modèles COM basés sur la norme CAPE-OPEN
- Diagrammes de flux Aspen Modeler exportés (à partir de produits tels qu'Aspen Custom Modeler et Aspen Dynamics)

Ces modèles peuvent simuler n'importe quel modèle d'opérations unitaires. Pour chaque type de modèle, vous écrivez votre propre programme ou feuille de calcul [38]

3. Principes fondamentaux de la modélisation et de la simulation Aspen Plus

Préparation : Titre de l'œuvre, objectif, description Organigramme : Représente la relation entre la puissance de la biomasse et les flux d'énergie en masse. Propriétés : Méthodes et modèles de propriétés thermodynamiques et physiques Opération : Analyse des résultats et simulation [39]

4. Spécifier la méthode de propriété

Il représente l'ensemble des modèles et des méthodes employés pour calculer les propriétés thermodynamiques et de transport, c'est-à-dire les propriétés physiques en général.

*Propriétés thermodynamiques physiques : telles que la densité, le poids moléculaire, l'énergie libre de Gibbs, l'entropie, l'enthalpie, le coefficient d'échappement, le potentiel chimique.

* Propriétés de transport : quantité de mouvement, c'est-à-dire tension superficielle et viscosité, coefficients de diffusion, conductivité thermique ou convection.

***Calculer les propriétés :**

- Par la loi de Henry, la loi de Raoult, l'équation d'état, la réaction.
- Paramètres des composants purs et paramètres binaire.

Méthode du coefficient d'activité [39]

5. Entrées des composants :

Le système de simulation Aspen Plus peut gérer six catégories principales liées au type de composant.

Chapitre I : Introduction Générale de Déchets Palmier (Biochar)

1- Non conventionnels : Il s'agit de matériaux solides qui ne sont pas des types chimiques purs et ne sont pas représentés comme des composants moléculaires, comme le biochar.

2 - Conventionnel : liquides et gaz de même type

3-Pseudo-composants, dosage et mélange : Caractérisés par le point d'ébullition, le poids moléculaire et les composants de transport spécifiques qui représentent les fractions pétrolières

4- Fluide virtuel : Le fluide utilisé dans les applications d'analyse thermique métallurgique pour modéliser le composant sous forme liquide.

5- Polymère : Composants utilisés dans les modèles en polymère.

6-Solides : Solides d'un type [39]

Chapitre II
Matériels et Méthodes

Dans cette étude nous n'avons pas travaillé en laboratoire, nous avons faits seulement la partie de simulation par Aspen plus, puis les comparées avec des résultats expérimentales menées par d'autre travaux dans le but d'optimiser et valoriser les sous produits de palmiers dattiers à travers la production de la biochar.

III.1. L'expérience acquise : Simulation

Aspen Plus est un simulateur de procédés utilisé pour modéliser, analyser et optimiser les procédés chimiques et industriels. Il permet de simuler les flux de matière et d'énergie afin d'améliorer l'efficacité, réduire les coûts et soutenir la prise de décision avant la mise en œuvre réelle

La simulation du procédé de pyrolyse a été réalisée à l'aide du logiciel Aspen Plus afin de prédire la distribution des produits de pyrolyse et d'optimiser les conditions opératoires.

Les déchets de palmier dattier ont été définis comme un composant non conventionnel à partir des données de l'analyse immédiate (humidité, matières volatiles, carbone fixe et cendres) et de l'analyse élémentaire (C, H, O, N et S).

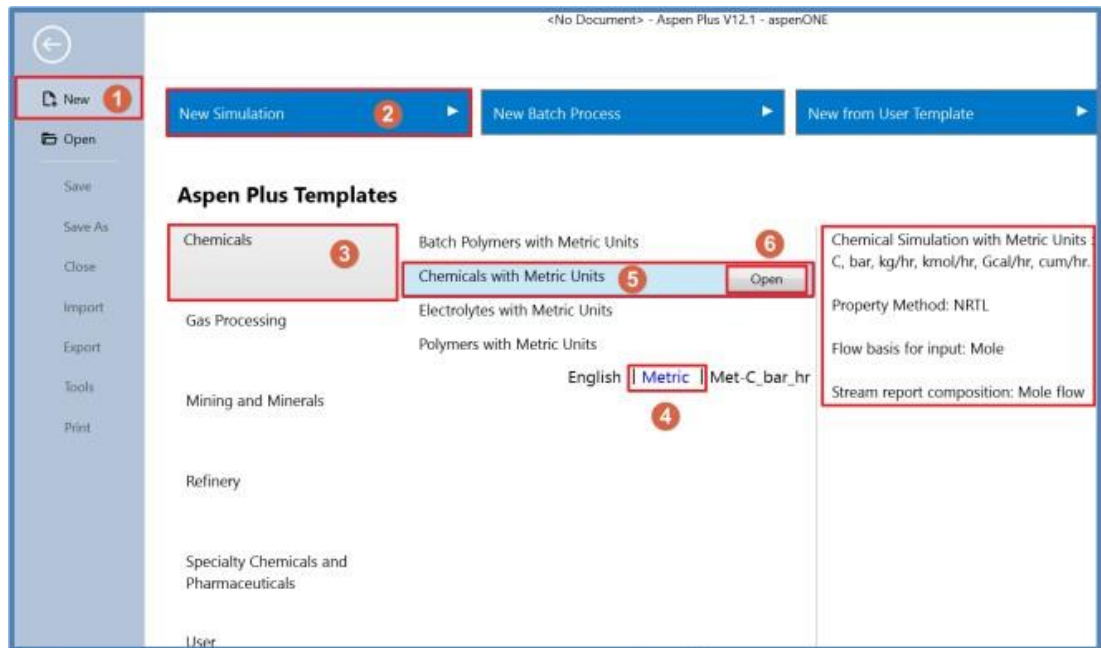
Le modèle thermodynamique Peng–Robinson a été retenu pour décrire les équilibres thermodynamiques du procédé. La décomposition de la biomasse a été simulée à l'aide d'un réacteur de type RYIELD, suivi d'un réacteur RGIBBS permettant de calculer la composition d'équilibre des produits de pyrolyse.

L'influence de la température de pyrolyse a été étudiée entre 300 et 700 °C sous pression atmosphérique. Les rendements en biochar, bio-huile et gaz de pyrolyse ont été calculés pour chaque condition opératoire.

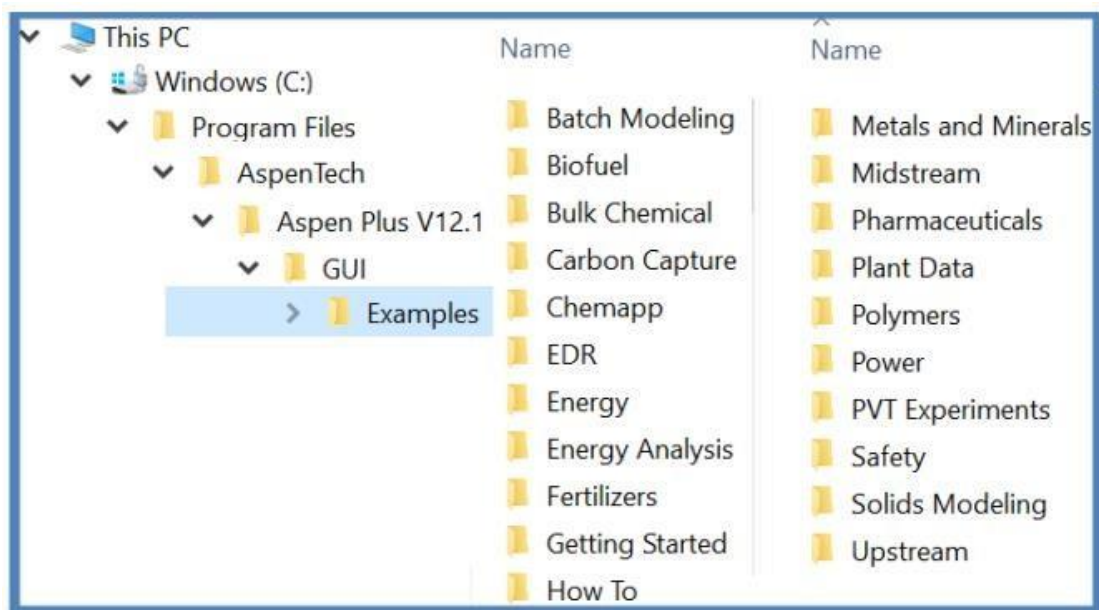
La simulation est réalisée à l'aide d'un logiciel Aspen plus selon les étapes suivantes :

a. Création d'un nouveau fichier

Après le lancement du logiciel Aspen Plus, un nouveau fichier de simulation est créé en sélectionnant l'option *New Simulation* où l'utilisateur peut spécifier de nombreux modèles tels que les produits chimiques, le traitement du gaz, l'exploitation minière, les minéraux, les produits pharmaceutiques et les matériaux non traditionnels.



b. Sélection de la méthode thermodynamique : Cette étape consiste à définir le modèle thermodynamique adapté au procédé de pyrolyse. Cette étape permet de calculer les propriétés physiques et thermodynamiques des différents constituants du système. Pour la simulation de la pyrolyse, le modèle Peng–Robinson (PENG-ROB) a été retenu.



c. Définition des composants : Les composants conventionnels (CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , H_2O , etc.) sont introduits dans la base de données du logiciel. Le biochar et la biomasse sont définis comme des composants non conventionnels à partir des données issues des analyses immédiates et élémentaires.

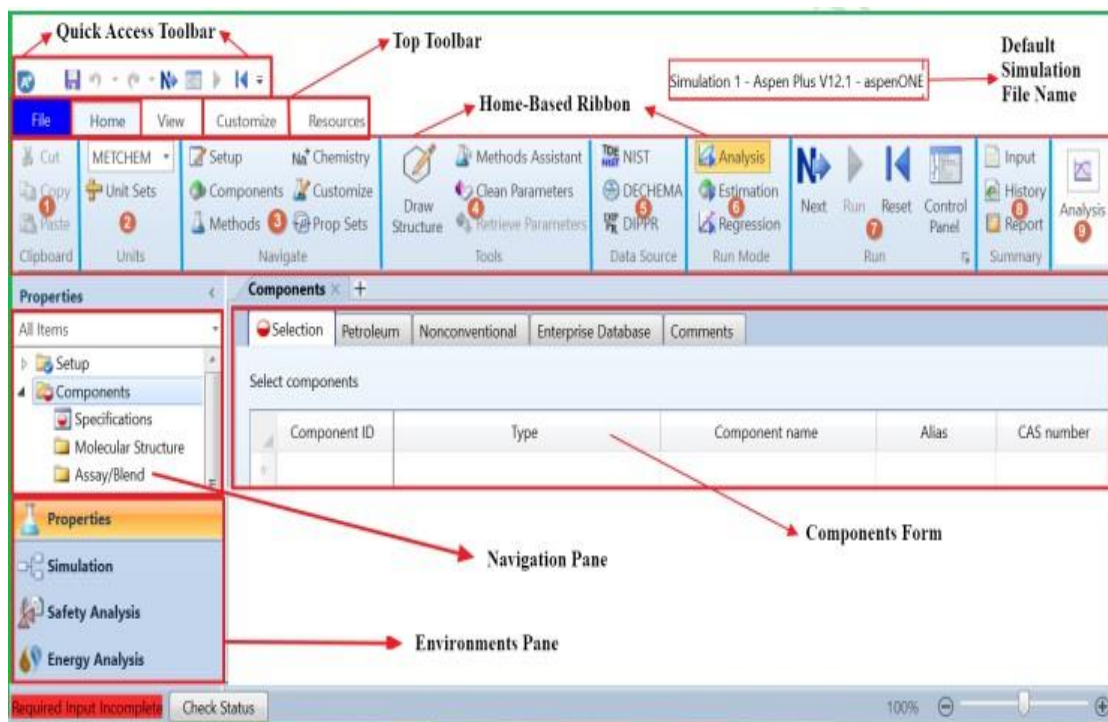
d. Sélection du fichier des matériaux solides : Le module des matériaux solides est utilisé afin d'introduire les caractéristiques du biochar et des déchets de palmier dattier. Les propriétés physiques et chimiques de la biomasse sont alors renseignées dans le logiciel.

e. Organisation et recherche des composants : Les composants peuvent être classés par ordre alphabétique ou recherchés à l'aide de mots-clés dans la zone de recherche afin de faciliter leur sélection et leur insertion dans la simulation.

f. Construction du schéma de procédé : Les différents blocs de simulation (RYIELD, RGIBBS, SEP) sont placés dans l'environnement de travail puis reliés par des flux de matière représentant les différentes étapes du procédé de pyrolyse.

g. Saisie les conditions opératoires du procédé : Introduction des paramètres : Température de pyrolyse ; pression de fonctionnement ; Temps de séjour.

h. Exécution de la simulation : Une fois toutes les données renseignées, la simulation est exécutée à l'aide de la commande *Run*. Aspen Plus calcule alors les bilans de matière et d'énergie ainsi que les rendements en biochar, bio-huile et gaz de pyrolyse, ainsi que l'influence des paramètres opératoires sur les performances du procédé.



II.2. Les informations de résultats de l'expérience

I. Configuration des composants :

a) **Composant non conventionnel** (déchets de palmier dattier) Analyse approximative (% MS)

:

- Humidité : 10 % (ajuster en fonction de la matière première réelle)
- Volatils : 60 %
- Carbone fixe : 25 %
- Cendres : 15 % (les déchets de palmier dattier ont souvent une teneur élevée en cendres) Analyse ultime (% en poids) : C : 45 %, H : 5 %, O : 48 %, N : 1 %, S : 1 %.

Méthode de propriété : HCOALGEN (pour la manipulation des solides).

b) **Composants conventionnels** :

- Gaz : CO, CO₂, CH₄, H₂, H₂O.
- Char : Modèle comme C (cendre) (carbone + cendre).
- Bio-huile (sous-produit mineur) : simplifier en acide acétique

II. Ajustements du schéma de procédé pour la production de biochar

- Type de pyrolyse : Pyrolyse lente (rendement en biochar plus élevé).
- Conditions du réacteur : température plus basse, temps de séjour plus long.
- En aval simplifié : moins d'attention portée à la récupération du bio-pétrole/gaz.

Opérations et spécifications de l'unité

Unité 1 : Séchoir

o Bloc: Chauffage + Flash2 (élimine l'humidité).

o Saisir: DATTIER (25°C, 1 atm, 1000 kg/h).

o Sortie du séchoir : 120°C, 1 ATM → Humidité réduite à 5%.

Résultats :

- ✓ PALMIER SÉCHÉ (solide, 95 % de biomasse sèche).
- ✓ H₂O-VAPEUR (rejeté ou recyclé).

Unité 2 : Réacteur de pyrolyse (pyrolyse lente)

Bloc: RYield (basé sur le rendement).

Conditions de fonctionnement :

- ✓ Température : 400°C (une température plus basse favorise le biochar).
- ✓ Pression : 1 atm.
- ✓ Temps de séjour : 30 min (pyrolyse lente).

Distribution du rendement (base massique) :

- ✓ Biochar (C (cendres)) : 62 % (ajuster en fonction des cendres/carbone fixe).
- ✓ Gaz de synthèse (CO, CO2, CH4, H2) : 13 %.
- ✓ Bio-huile (liquide) : 25 %.

Flux de sortie : PYRO-OUT (biochar + gaz + traces d'huile). **Unité**

3 : Cyclone (séparation des charbons)

Bloc: SSplit (séparateur de solides).

- ✓ Saisir: PYRO-OUT.

Fractions divisées :

- ✓ Biochar (C (cendres)) : 99 % à BIOCHAR-OUT.
- ✓ Gaz/Vapeur : 100 % jusqu'à ÉVACUATION DE GAZ.

Hypothèses :

- ✓ Supposons une perte de charbon négligeable dans le flux de gaz.

Unité 4 : Refroidissement des gaz (facultatif)

- Bloc: Réchauffeur ou Flash2 (gaz froid pour condenser la bio-huile résiduelle).

o Saisir: SORTIE DE GAZ (400°C → refroidir à 50°C).

▪ Résultats :

- ✓ GAZ DE SYNTHÈSE (incondensables : CO, CO2, CH4, H2).
- ✓ BIO-OIL (sous-produit liquide mineur).

III. Intégration de la chaleur

Récupérer la chaleur du gaz de synthèse :

- Utilisez Heat X pour transférer la chaleur du SYNGAS (400°C → 100°C) pour

Préchauffer le sécheur ou l'alimentation du réacteur.

Économies d'énergie : réduit les besoins de chauffage externe.

Flux	Phase	Température	Pression	Composants clés
Dattier-In	Solide	125°C	1 ATM	PALMIER DATTIER (Humide)
Palmier Séché	Solide	120°C	1 ATM	PALMIER DATTIER (Sec)
Pyro-Out	Mixte	400°C	1 ATM	Cendres, Gaz De Synthèse, Bio-Huile
Biochar-Out	Solide	400°C	1 Atm	C(Ash) (Biochar)
Gaz de Synthèse	gaz	50°C	1 Atm	Co, Co2, Ch4, H2

CHAPITRE III
RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats de l'étude ont été obtenus et nous n'avons pas travaillé en laboratoire. Le biochar est produit à partir de déchets de palmier par la pyrolyse de la biomasse en l'absence d'oxygène, en tenant compte des principaux paramètres contrôlables tels que :

1-Taux de chauffage :

Taux de chauffage lent :

Encourage une production de biochar plus efficace, offre un délai prolongé pour les réactions de création de charbon secondaire, pouvant mener à une microporosité accrue et à une structure du carbone plus structurée. Chauffage graduel (5–10°C/min) : Favorise une dévalorisation progressive, préservant les résidus à haute teneur en carbone.

Taux de chauffage rapide :

Encourage la production d'huile biologique, entraîne des durées de passage de vapeur plus brèves dans les particules, ce qui peut provoquer une porosité moins élevée mais potentiellement une chimie de surface distincte à cause de l'arrêt rapide des réactions. Accélération du chauffage (20-50°C/min) : entraîne une fissuration thermique rapide, diminuant le rendement tout en générant des structures poreuses.

2-Effet de la taille des particules de la matière première :

Particules plus petites : Le transfert thermique est plus régulier et rapide, ce qui entraîne une pyrolyse plus uniforme. Cela peut avoir un impact sur la distribution de la dimension des pores et la composition chimique de la surface.

Des particules plus grandes : sont sujettes à des contraintes de conduction thermique, pouvant causer des gradients thermiques à l'intérieur de la particule et des caractéristiques du charbon moins homogènes

3- Effets sur les mécanismes d'élimination :

Adsorption physique : Principalement améliorée par une élévation de la température (jusqu'à un optimum), des durées de séjour prolongées et des chauffeurs à vitesse réduite, ce qui accroît la surface et la porosité.

Adsorption chimique (complexations/échange d'ions) : favorisée par des températures faibles à modérées qui conservent les groupes fonctionnels contenant de l'oxygène.

Précipitation : Optimisé par des températures plus hautes et des durées d'exposition prolongées qui intensifient la quantité de cendres et le pH, stimulant l'apparition d'hydroxydes métalliques ou de carbonates à la surface du biochar.

III. Résultats de simulation

Suite à l'utilisation des résultats expérimentaux collectés pour la production de biochar à partir de résidus de palmier et leur incorporation dans le programme Aspen Plus, nous avons réussi à extraire les résultats suivants pour une comparaison mutuelle :

III.1. Effet de la température de pyrolyse sur le rendement de biochar

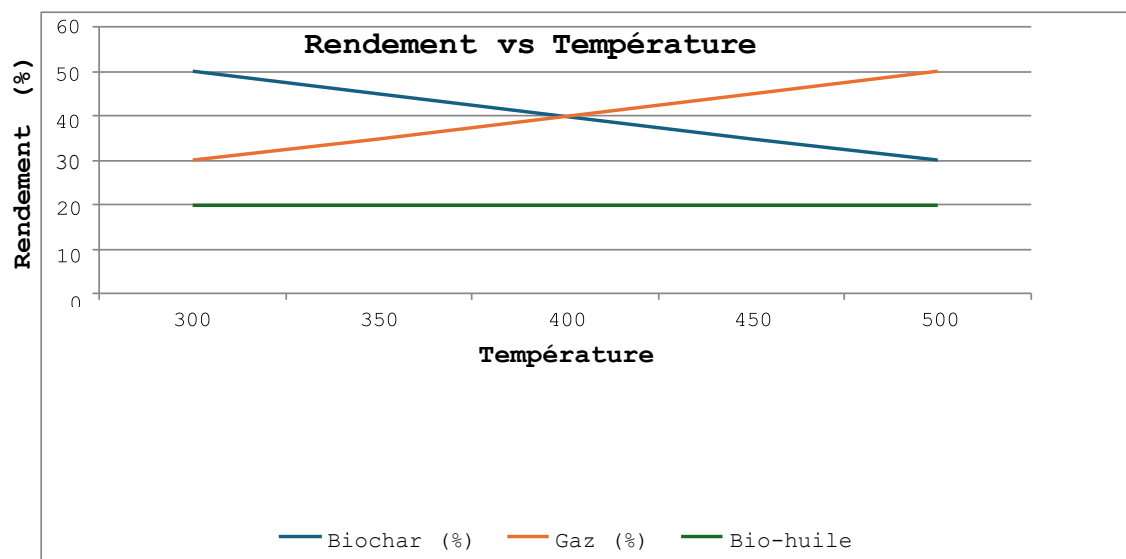


Figure 05 : variation de rendement de biochar en fonction de Température de pyrolyse

Les résultats (Figure 8), montrent que la température de pyrolyse influence fortement le rendement en biochar, gaz de synthèse et bio-huile. Lorsque la température augmente, le rendement en biochar diminue progressivement tandis que la production de gaz augmente. Le rendement est davantage influencé par la température lors de la pyrolyse, en considérant une humidité de 10% et une vitesse de réchauffement de 10°C/min.

Dans une plage de pyrolyse allant de 300°C à 500°C, la production de biochar se réduit de 50% à 300°C pour tomber à 30% à 500°C. Ceci est bénéfique pour la production de gaz, qui augmente de 30 % à 300 °C et atteint 50 % à 500 °C. L'accroissement de la production de gaz peut être dû à des réactions secondaires des bio- huiles, car la température de pyrolyse génère des gaz persistants. La bio huile subit une légère modification, se stabilisant à 20°C. Les métaux ont une influence sur la distribution des produits grâce à leur action catalytique.

III.2. Effet de temps de séjours

Le temps de séjour est le facteur clé de la décomposition thermique car il a la plus grande influence sur les propriétés (porosité, rendement et fracture). L'augmentation du temps de séjour dans le réacteur favorise la poursuite des réactions thermochimiques. Lorsque la biomasse reste plus longtemps dans la zone chaude, les matières volatiles continuent à être libérées et une partie du biochar peut subir des réactions secondaires de dégradation. En tenant compte de l'humidité de 10% et T=400°C et la vitesse de chauffage 10°C /min. Sur la plage de temps de séjour de 10 min à 60min, le rendement en biochar diminue de 35 à 45%, le rendement en gaz de 40 à 35% et le rendement en bio-huile de 25 à 20%.

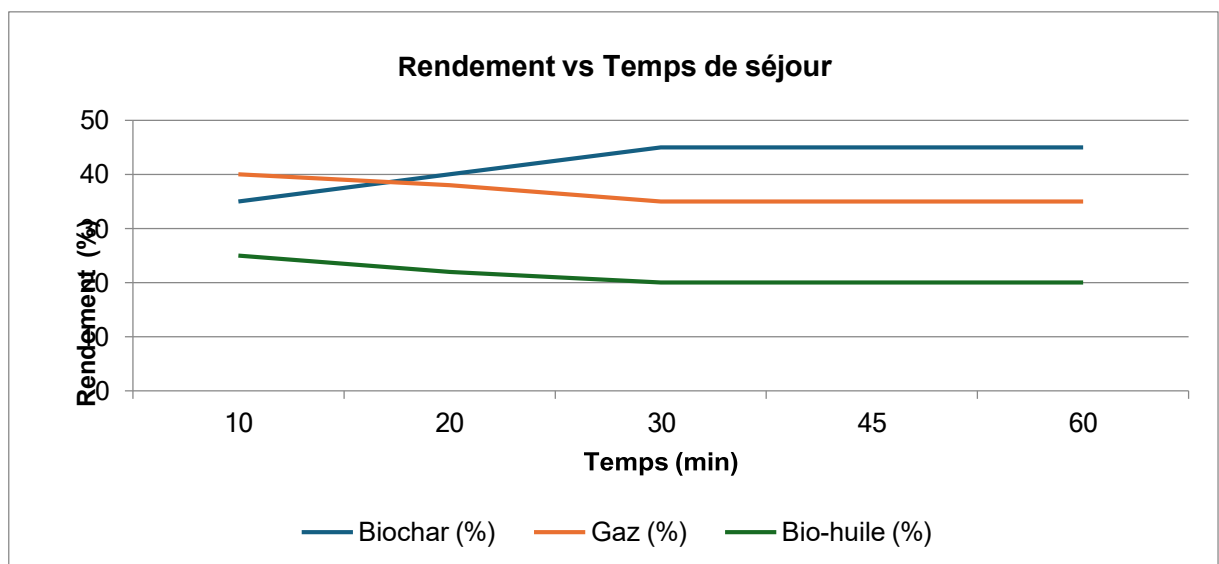


Figure 06 : Rendement du biochar vs temps de séjour

Le rendement se stabilise après un temps de séjour de 30 min, ce qui est un temps suffisant pour l'interaction entre les matériaux.

Cela est dû à plusieurs facteurs :

- L'équilibre des réactions chimiques, où le composé organique réagit avec la chaleur lentement et de manière contrôlée, ce qui permet les réactions chimiques.

- Lorsque la réaction se poursuit pendant une longue période 30 min, les réactions s'équilibrent et une composition finale avec des propriétés élevées est atteinte, formant une structure carbonée stable.

Séquestration du carbone pour améliorer la fertilité des sols et augmenter la rétention d'eau.

III.3. Effet de la teneur en humidité

L'humidité affecte négativement la productivité du biochar et sa relation avec l'énergie de séchage. Une augmentation de l'humidité entraîne une diminution du rendement en biochar et de l'efficacité énergétique du procédé et thermique du charbon lorsqu'il est brûlé, l'empêchant d'attirer et de retenir les éléments chimiques. Il existe une relation inverse entre la productivité du biochar, où elle diminue de 42 à 35%, tandis que l'énergie de séchage augmente de 1 à 4 à une teneur en humidité de 20%. Ceci est dû à la contribution de plusieurs facteurs :

- Augmenter le poids du biochar
- Contribuer à la combustion spontanée du charbon en séchage à forte teneur d'humidité, ce qui nécessite une consommation énergétique accrue.
- Production de biochar à faible teneur en eau : Absorbe et élimine les odeurs des sources les plus difficiles.

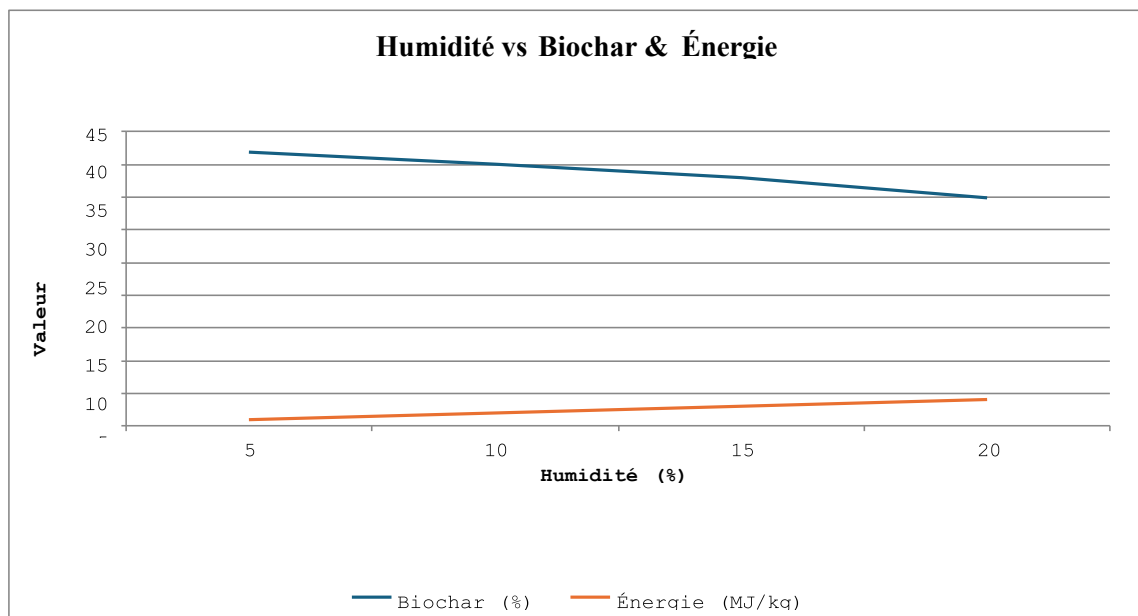


Figure 07 : Le rendement de biochar par rapport de teneur en humidité

III.4. Composition du gaz de synthèse

La température a un impact significatif sur la composition du gaz produit (figure 11), pour augmenter la production de gaz combustibles tels que le méthane, le monoxyde de carbone, l'hydrogène et le dioxyde de carbone, car les proportions de gaz augmentent de valeurs inférieures à des valeurs plus élevées avec l'augmentation de la température. Dans le même temps, la production de biochar et de bio huile diminue. Où la température affecte-t-elle les composants.

- L'augmentation de la température s'accompagne d'une augmentation des composants des gaz combustibles.

La présence d'impuretés minérales résultant de la décomposition des groupes hydroxyles.

La présence d'eau : déshydratation des deux acides carboxyliques, conduisant à la formation d'anhydrides et d'eau.

CO₂ : décomposition des fonctions carboxyliques due à la présence de lactones et d'anhydrides. Le CO signifie la décomposition des fonctions éther et phénol.

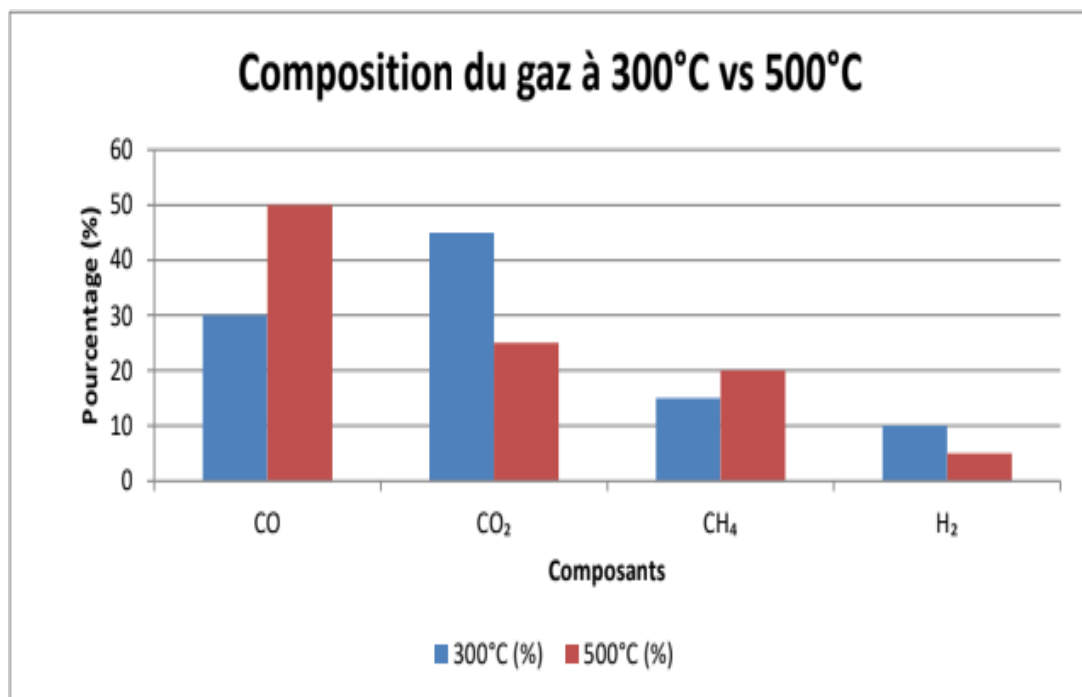


Figure08: Composition du gaz à 300°C vs 500°C.

III.5. Effet de la vitesse de chauffage sur le rendement de biochar

La vitesse de chauffage lors du processus de conversion de la biomasse en biochar affecte grandement son rendement (figure 12). L'augmentation de la vitesse de chauffage entraîne une augmentation du rendement en gaz de 35 à 50%, tandis que le rendement en biochar diminue de 45 à 35% à la même température de 400°C. Là où une grande partie de la biomasse est convertie en bio-huile et en gaz en raison des différences dans la thermodynamique et les réactions chimiques de la matière première pendant le processus de pyrolyse, car il n'y a pas assez de temps pour que les matières organiques volatiles réagissent entre elles pour former du biochar, qui produit plus de gaz et de bio-huiles.

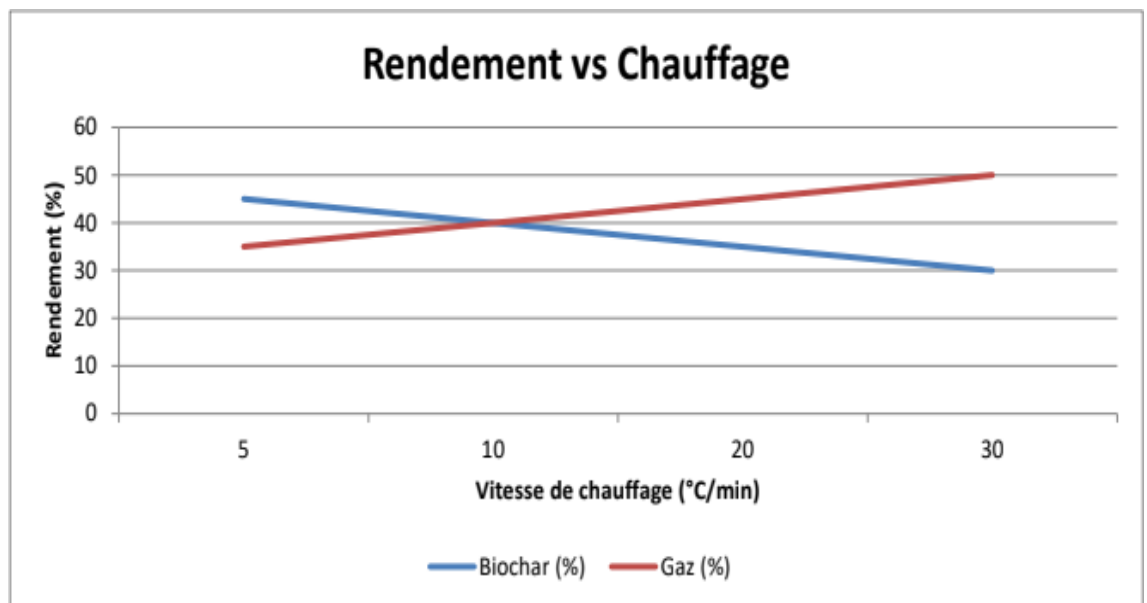
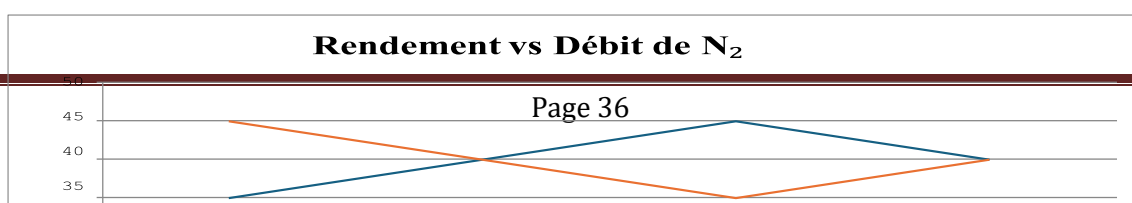


Figure 09 : Vitesse de chauffage vs Rendement.

III.6. Effet du débit du gaz inerte

L'utilisation d'un gaz inerte tel que l'azote permet de maintenir une atmosphère pauvre en oxygène et d'éviter les réactions de combustion. L'augmentation du débit d'azote affecte le processus de décomposition thermique, ce qui augmente le rendement du biochar de 35 à 40 % et réduit la production de matières liquides condensables de 45 à 40 % en raison de la diminution des taux de craquage.

Les propriétés texturales du biochar sont déterminées par l'équation d'absorption d'azote, où la taille des pores de la surface d'absorption est définie comme le volume d'azote liquide absorbé.



Rendement (%)

Figure 10 : Variation de rendement en biochar en fonction de débit d'azote.

III.7. Efficacité de récupération de chaleur par rapport à la surface de l'échangeur

L'efficacité de la récupération de la chaleur à l'aide d'un échangeur de chaleur à biochar dépend de nombreux indicateurs, c'est-à-dire qu'il existe une relation directe entre l'augmentation de la surface de l'écha H, taux d'humidité (%). L'augmentation de la surface de l'échangeur améliore significativement la récupération de chaleur. Une surface d'échange plus importante favorise le transfert thermique entre les fluides et permet de réutiliser une partie de l'énergie produite par le procédé.

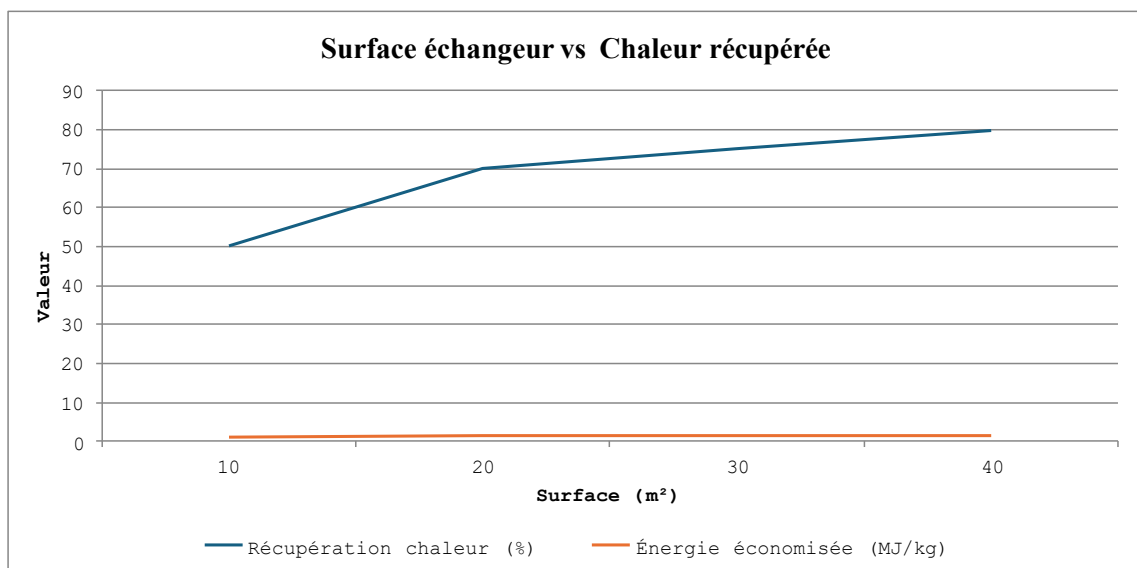


Figure 11 : Récupération de chaleur par rapport à la surface de l'échangeur

La simulation a indiqué que la production de biochar atteignait 62 %, tandis que les gaz tels

que CH₄, CO₂, CO et H₂ représentaient 13 %, et que le bio huile constituait 25 % du produit total, à une température de 400 °C et un temps de séjour de 30 minutes et P=1atm. En revanche, les résultats expérimentaux obtenus par analyse chimique et physique ont montré une proportion réelle de biochar plus faible, d'environ 56 %, avec une augmentation notable des gaz produits à 19 %, tandis que la proportion d'huile bio est restée pratiquement constante à 25 % temps de séjour de 4 heures.

Ces écarts peuvent s'expliquer par des conditions de fonctionnement réelles non idéales, telles que les pertes thermiques, une distribution inégale de la chaleur ou des variations d'humidité dans l'échantillon, des facteurs généralement bien contrôlés en simulation. Malgré cela, la correspondance dans la proportion d'huile bio reflète l'efficacité et la précision du modèle de simulation à représenter le comportement général du matériau sous l'effet de la chaleur, ce qui en fait un outil utile pour prévoir et optimiser les conditions de fonctionnement afin d'obtenir un rendement optimal en biochar de haute qualité.

Aspen Plus est conçu pour fournir une suite complète de méthodes et de données thermodynamiques sur les polymères, des modèles de réaction de polymérisation basés sur le taux et des modèles de micro réaction, permettant aux ingénieurs de simuler le comportement réel des plantes, économisant ainsi des mois de temps et améliorant la précision de l'ingénierie. Le système Aspen Plus est connu dans l'industrie chimique comme possédant l'ensemble de données sur les propriétés physiques le plus complet.

Cela permet d'éviter plus précisément et plus rapidement les erreurs courantes lors de la fabrication du biochar expérimentalement, car vous ne pouvez pas déterminer le type de biomasse, qu'il s'agisse de biochar, de bio huile ou de gaz, sauf après avoir pris en compte les conditions expérimentales, telles que la spécification du type de pyrolyse lente pour obtenir du biochar ou de pyrolyse rapide pour obtenir de la bio huile entrecoupée de gaz, la vitesse de chauffage, le temps de séjour et l'effet de la température de pyrolyse. Cependant, vous ne pouvez pas être certain qu'il possède des propriétés et une efficacité élevées pour éliminer les métaux lourds présents dans le sol et l'eau et les éliminer après une série de tests ou les paramètres influençant sur l'adsorption.

Conclusion Générale

Conclusion

La valorisation des déchets agricoles constitue aujourd'hui un enjeu stratégique dans le cadre du développement durable et de la gestion rationnelle des ressources naturelles.

À travers cette étude, nous avons mis en évidence le potentiel des résidus du palmier dattier en tant que matière première pour la production de biochar, une ressource à forte valeur ajoutée, tant sur le plan environnemental qu'agronomique.

L'exploitation du logiciel Aspen Plus pour la modélisation et la simulation a, quant à elle, permis de valider les données expérimentales et d'enrichir la compréhension des phénomènes intervenant dans le processus de pyrolyse.

Ainsi, l'approche combinant expérimentation et simulation a démontré sa pertinence pour optimiser les conditions de production du biochar, avec une perspective d'adaptation à une échelle industrielle. Ce travail ouvre la voie à d'autres recherches plus approfondies sur l'utilisation du biochar issu de différentes biomasses, ainsi que sur ses performances à long terme dans les sols ou d'autres systèmes environnementaux.

En définitive, la transformation des résidus de *Phoenix dactylifère* en biochar représente une solution concrète et durable, intégrant à la fois la réduction des déchets, la valorisation énergétique, et la préservation des écosystèmes.

REFERENCES

REFERENCES

- [1]. DJOUAB. A., 2007. Mémoire de magister, préparation et incorporation dans la margarine d'un extrait de dattes de variétés sèches, université BOUMERDES, p 31.
- [2]. BURINIE.G et all., 2011. Encyclopédie de botanique et d'horticulture botanica, édition h.f.ullmann, p 664.
- [3]. CHEHMA A., LONGO H., 2001. Valorisation des sous-produits du Palmier Dattier en vue de leur utilisation en Alimentation du Bétail. Production et Valorisation – Biomasse N°59-64.
- [4]. Laghouiter O.K (2018) Valorisation phytochimique des noyaux de quelques variétés du Palmier dattier de l'Algérie (Metlili). Thèse Doctorat en sciences université de Laghouat.
- [5]. El Fels, L., Hafidi, M., Ouhdouch, Y., & Barakat, A. (2016). Date palm waste valorization: Current trends and future prospects. *Biomass and Bioenergy*, 93, 131–144.
- [6]. Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). *Biochar for environmental management Science, technology and implementation* (2nd ed.).
- [7]. Al-Alawi, R., Al-Mashiqri, J.H., Al-Nadabi, J.S.M., Al-Shihi, B.I., Baqi, Y., 2017. Date palm tree (*Phoenix dactylifera* L.): Natural products and therapeutic options. *Frontiers in Plant Science* 8, 1–12.
- [8]. Zohary, D., & Hopf, M. (2000). *Domestication of Plants in the Old World*. Oxford University Press.
- [9]. Belarbi A (2001). stabilisation par séchage et qualité de la datte deglet nour thèse génie des procédés, ENSIA _ Massy France.
- [10] Ighalo, J. O., Akaeme, F. C., Georgin, J., Schumacher de Oliveira, J., & Franco, D. S. P. (2025). Biomass Hydrochar: A Critical Review of Process Chemistry, Synthesis Methodology, and Applications. *Sustainability*.
- [11] Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. Routledge.
- [12] AMORSIG 1975, le palmier dattier en algérie ; Ed tlemcen p131.
- [14] Tripathi, M., Sahu, J. N., & Ganesan, P. (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 467–481.
- [15] Bouguedoura, N., Bennaceur, M., Babahani, S., Benziouche, S.E., 2015. Date Palm Status and Perspective in Algeria, in : Jameel M. Al Khayri, Jain, S.M., Johnson, D.V. (Eds.), *Date Palm Genetic Resources and Utilization*. Springer Dordrecht Heidelberg New York London.
- [16] Fadlaoui, S., 2017. Application de la technique de modélisation de l'architecture du palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) pour la caractérisation des cultivars. Thèse de Magister en sciences agronomiques, Université de Biskra, Algeria.
- [17] Mohan, D., Pittman, C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. *Energy & Fuels*, 20(3), 848–889.
- [18] Mukherjee, A., & Lal, R. (2014). Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. *Agronomy*, 4(3), 461–485.

REFERENCES

- [19] FAOSTAT. (2023). Date Palm Production Statistics. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [20] Zhang, X., Cao, X., & Harris, W. (2013). A review of biochar production by slow pyrolysis and its potential applications. *Environmental Science & Technology*, 47(19), 11169–11184.
- [21] Demirbas, A. (2004). Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. *Energy Conversion and Management*, 45(5), 651–671.
- [22] Libra, J. A., Ro, K. S., Kammann, C., Funke, A., Berge, N. D., Neubauer, Y., ... & Emmerich, K.-H. (2011). Hydrothermal carbonization of biomass residuals: A comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels*, 2(1), 71–106.
- [23] Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., van der Velde, M., & Bastos, A. C. (2011). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1), 175–187.
- [24] Leng, L., Huang, H., Yuan, J., Liu, Y., & Chen, X. (2019). Applications of biochar in sustainable energy storage and conversion: A review. *Journal of Cleaner Production*, 239, 118100.
- [25] Mohan, D., Sarswat, A., Ok, Y. S., & Pittman, C. U. (2014). Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent – A critical review. *Bioresource Technology*, 160, 191–202.
- [26] Mukherjee, A., Zimmerman, A. R., & Harris, W. (2011). Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. *Geoderma*, 163(3-4), 247–255.
- [27] Beesley, L., Moreno-Jiménez, E., & Gomez-Eyles, J. L. (2011). Effects of biochar and green waste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in soil. *Environmental Pollution*, 158, 2282–2287.
- [28] Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., et al. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99, 19–33.
- [29] European Biochar Foundation (EBF). (2021). European Biochar Certificate – Guidelines for a Sustainable Production of Biochar.
- [30] International Biochar Initiative (IBI). (2022). Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar.
- [31] Zohary, D., & Hopf, M. (2000). *Domestication of Plants in the Old World*. Oxford University Press.
- [32] Aird, D. A. (2008). The charcoal vision: A win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. *Agricultural & Environmental Letters*,

REFERENCES

- [33] Chen, B., Chen, Z., & Lv, S. (2011). A novel magnetic biochar efficiently sorbs organic pollutants and phosphate. *Bioresource Technology*, 102(2), 716-723.
- [34] Zhu, X., Liu, L., Han, L., & Hu, X. (2016). Production and characterization of biochar derived from food waste and its potential use in soil amendment. *Waste Management*, 59, 351-358.
- [35] Wu, W., Peng, C., Wang, Y., et al. (2018). Effects of pyrolysis temperature on biochar adsorption of ammonium and nitrate in water. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(35), 35068.
- [36] Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. Academic Press.
- [37] Sohi, S. P., Krull, E., Lopez-Capel, E., & Bol, R. (2010). A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, 105, 47-82.
- [38] Jindo, K., Mizumoto, H., Sawada, Y., et al. (2014). Physical and chemical characterization of biochars derived from different agricultural residues. *Biogeosciences*, 11(23), 6613-6621.
- [39] Gai, X., Yin, H., Yan, R., et al. (2014). Characterization of biochar from rice straw and its potential use as a heavy metal adsorbent. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(19), 11526-11536.
- [40] Cheng, C. H., Lehmann, J., & Thies, J. E. (2008). Hydrogen isotopic composition of plant-derived char: A new tracer for black carbon in the environment. *Environmental Science & Technology*, 42(8), 3052-3057.
- [41] Aspen plus 11.1 user guide –book-
- [42] Outils informatique pour ingénieur Mustapha tahaikt.
- [43] Z.Boussena, M.Khali. *Extraction Et Composition Chimique D'huile De Noyaux De Dattes Algériennes*. Thèse de doctorat. Université-Blida1, (2016), pp100-.
- [44] A.Chergui. *Modélisation de l'adsorption*. Mémoire de master. Université-Blida1,(2014), p21.
- [44] Mounir ziati, Sabir Hazourli, Sana Nouacer, Fatma Zohra Khelaifia, Nesrine Nait Merzoug « Adsorption de l'arsenic (iii) sur un résidu naturel ligno-cellulosique valorisé en charbon actif –exemple des noyaux de dattes .Université Badji-Mokhta, (2011), pp.12.
- [45] Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. Routledge.

REFERENCES

REFERENCES

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم هندسة الطرائق
جامعة غرداية
Faculté des sciences et
Technologie
Département génie
Des procédés
Université de Ghardaïa

Autorisation d'impression finale d'un mémoire de master

	Nom et prénom	Signature
Examineur 1	AOUF Mohammed	
Examineur 1	BENCHEIKH Salah Eddine	 D. BENCHEIKH Salaheddine
Encadrant	Fekhar Bahmed	
Co-encadrant		

Soussigne Dr. Laghouiter Oum Kelthoum

Président de jury des étudiant (s): Dif Hind et Dahmane Hanane

Filière : Génie des procédés ; Spécialité : Génie chimique

Thème: Valorisation des déchets de palmiers dattiers pour une production optimisé de biochar.

Autorise le (s) étudiant (s) mentionné (s) ci-dessus à imprimer et déposer leur (s) manuscrit final au niveau du département.

Président de jury



Ghardaïa le:

Le chef de département

REFERENCES
