

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
des Sciences de la Matière



Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat LMD en
Génie de l'environnement et sciences des matériaux
Option : Énergies renouvelables

Par :

Salem Fethya

Conception et expérimentation d'un gazéificateur pour le traitement thermique des déchets organiques

Soutenue publiquement le dimanche : 11 / 12 / 2022

Devant le jury :

Mr. Iddou Abdelkader	Professeur	Université Ahmed Draia Adrar	Président
Mr. Kalloum Slimane	Professeur	Université Ahmed Draia Adrar	Promoteur
Mme Bousdira Khalida	MRA	URAER Ghardaia	Examinatrice
Mr. Arbaoui Ilyace	MCA	Université Ahmed Draia Adrar	Examineur
Mr. Saadi Zine	MRB	URERMS Adrar	Invité

Année Universitaire : 2022/2023

Table des matières

Remerciement.....	<i>i</i>
Liste des figures	<i>ii</i>
Liste des photos.....	<i>iv</i>
Liste des tableaux.....	<i>v</i>
Liste des abréviations.....	<i>vi</i>
Résumé.....	<i>viii</i>
Abstract	<i>ix</i>
ملخص.....	<i>x</i>
Introduction générale.....	<i>1</i>
<i>Chapitre 1 : Généralité sur le palmier dattier (phoenix dactylifera L)</i>	
1. Introduction :.....	<i>5</i>
2. Répartition géographique du palmier dattier.....	<i>5</i>
2.1 Dans le monde	<i>5</i>
2.2 En Algérie.....	<i>7</i>
2.3 Dans la région Touat, Gourara et Tidikelt.....	<i>8</i>
3. Systématique et morphologie du <i>phoenix dactylifera L</i>	<i>8</i>
3.1 Système racinaire :	<i>10</i>
3.2 Organe végétatif	<i>11</i>
3.3 Organe reproductif ou Organe floraux	<i>13</i>
4. Cycle de développement du palmier dattier	<i>14</i>
5. Nettoyage des palmiers dattier	<i>14</i>
6. Valorisation des déchets lignocellulosiques phoenicicoles	<i>17</i>
6.2 Nouvelles technologies de valorisation de la biomasse lignocellulosique phoenicicole.....	<i>23</i>
6.2.1 Production de glucose.....	<i>23</i>
6.2.2 Production d'acide lactique :	<i>23</i>
6.2.3 Bioabsorbant / filtre naturel pour le traitement des eaux :.....	<i>23</i>
6.2.4 Production de charbon actif :.....	<i>25</i>
6.2.5 Utilisation pour isolation et matériau composite :.....	<i>26</i>
6.2.6 Production d'un composte :.....	<i>26</i>
6.2.7 Alimentation de bétail :	<i>27</i>
6.2.8 Production du bioalcool.....	<i>27</i>
6.2.9 Production de biogaz	<i>27</i>
6.2.10 Production d'énergie par conversion thermique.....	<i>28</i>
7. Conclusion.....	<i>28</i>

Chapitre 2 : Etude théorique de la gazéification

1.	Introduction.....	31
2.	Historique.....	31
3.	Processus de la gazéification.....	33
3.1.	Séchage.....	34
3.2.	Pyrolyse.....	34
3.3.	Oxydation ou la combustion.....	35
3.4.	Craquage et reformage des goudrons	35
3.5.	Réduction.....	36
4.	Technologies de gazéification.....	37
4.1.	Production de la chaleur	37
4.2.	Type de l'agent de gazéification.....	38
4.3	Processus de transport	39
4.3.1	Gazéificateurs à lit fixe.....	39
4.3.2	Gazéificateurs à lit fluidisé.....	41
4.3.3	Gazéificateurs à lit entraîné	43
4.4	Autres technologies de gazéification.....	45
4.4.1	Gazéificateur de sel fondu (gazéificateur de métal fondu).....	45
4.4.2	Gazéification d'eau supercritique (SCWG)	45
4.4.3	Gazéification plasma (gazéification à l'arc plasma)	46
5.	Co-gazéification.....	48
6.	Paramètres affectant la gazéification.....	49
6.1	Propriétés de la biomasse	49
6.1.1	Taille et forme des particules	49
6.1.2	Densité.....	50
6.1.3	Taux d'humidité	50
6.1.4	Analyses immédiates et ultimes et contenu énergétique	50
6.2	Paramètres de fonctionnement	51
6.2.1	Agent de gazéification.....	51
6.2.2	Température.....	52
6.2.3	Pression	52
6.2.4	Equivalence Ratio.....	53
6.2.5	Catalyseurs	53
6.2.6	Temps de séjour.....	53
6.2.7	Prétraitements.....	54
7	Produits de la gazéification	54

7.1 Gaz de synthèse	54
7.2 Goudron.....	55
7.3 Charbon ou biocharbon	56
7.4 Cendres.....	56
8 Epuration du gaz de synthèse.....	56
9 Applications de gaz de synthèse.....	57
10 Conclusion.....	60

Chapitre 3 : Matériels et Méthodes

1. Introduction.....	63
2. Lieu et procédure d'échantillonnage.....	63
3. Caractérisation des échantillons	64
3.1. Caractérisation physique :	64
3.2. Caractérisation physico-chimique	66
4. Prototype de gazéification.....	69
4.1. Prototype préliminaire de gazéification.....	69
4.2. Amélioration du prototype de gazéification	70
4.3. Agent de gazéification.....	74
5. Les tests de gazéification.....	75
5.1. Suivi de la température.....	75
5.2. Test de l'inflammabilité du gaz de synthèse	76
5.3. Taux de conversion de la biomasse	76

Chapitre 4 Résultats et discussions

1. Introduction :.....	78
2. Prospection sur terrain.....	78
2.1. Dénombrement des différents déchets générés du palmier dattier (<i>Phoenix dactylifera L.</i>) variété Takarbouche	79
2.2. Prise de poids des différents déchets générés du palmier dattier (<i>Phoenix dactylifera L.</i>) variété Takarbouche	80
2.3. Rapport poids /longueur des déchets générés du palmier dattier (<i>Phoenix dactylifera L.</i>) variété Takarbouche	83
2.4. Proportion de la biomasse générés du palmier dattier (<i>Phoenix dactylifera L.</i>) variété Takarbouche	85
2.5. Evaluation du potentiel de biomasse lignocellulosique du palmier dattier (<i>Phoenix dactylifera L.</i>) variété Takarbouche dans la wilaya d'Adrar	86
3. Caractérisation physico-chimique :.....	90
3.1. Densité.....	90
3.2. Analyse immédiate de la biomasse phoenicicole	90
3.3. Analyse approximative de la biomasse phoenicicole	93

3.4	Rapport atomique :	95
4.	Tests de gazéification :	97
4.1.	Évolution de la température en fonction du temps	97
4.2.	Évolution de la température en fonction de la hauteur	103
4.3.	Système d'épuration	106
4.4.	Test de l'inflammabilité du gaz de synthèse	106
4.5.	Taux de conversion de la biomasse	108
5.	Estimation de la composition du gaz de synthèse en utilisant un modèle thermodynamique :... III	
5.1.	Introduction	111
5.2.	Les modèles mathématiques.....	112
5.3.	Processus et réactions dans le gazéificateur à contre-courant	116
5.4.	Analyse thermodynamique.....	117
	Conclusion générale.....	127
	Références	
	Publication et communication	

Remerciement

Avant tout, je remercie Dieu qui m'a donné la foi, la santé, le courage et la volonté pour terminer ce modeste travail

Je veux tout d'abord à exprimer ma reconnaissance et profonde gratitude à mon directeur de thèse Pr Kalloum Slimane pour sa présence et sa disponibilité tout au long de ce travail, pour sa confiance, son encouragement et surtout sa patience.

Un grand merci aux membres du jury qui m'ont honoré et acceptés d'évaluer mon modeste travail, Mme Bousdira Khalida et Mr Arbaoui Ilyas, pour avoir accepté d'examiner cette thèse, Mr. Saadi Zine pour avoir accepté mon invitation à participer à ce jury, et enfin Mr. Iddou Abdelkadder pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider ce jury

Je tiens à exprimer mes remerciements et ma gratitude la plus profonde à mon cher collègue et ami le Dr Saadi Zine pour son soutien scientifique, humain et moral et sa grande contribution dans la finalisation de ce travail.

Mes sincères sentiments s'adressent à ma très chère famille, mon adorable maman, mon très cher Père, ma sœur, et mon frère pour leur grand soutien moral et leur encouragement pour mener à bien ce travail.

Mes vifs remerciements à mes précieux (ses) amis (es) pour leurs soutiens et leurs encouragements, merci d'être toujours à mes côtés dans tous mes états.

Mes vifs remerciements à tous les membre de l'équipe bioressources saharienne et bioénergies de l'URERMS d'Adrar chacun par son nom, pour leur soutien, leur encouragement et leur aide inconditionnée chacun à sa façon,

Je tiens aussi à remercier tous mes collègues de l'unité de recherches en énergies renouvelables en milieu saharien (UREMS-Adrar) qui ont contribué de près ou de loin dans la réalisation de ce travail chacun par son nom, ainsi que les ingénieurs et les employés de la société Ecomes Adrar,

En fin, je remercie chaleureusement toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à l'élaboration de ma thèse.

Liste des figures

Liste des figures

Figure 1: Répartition des oasis dans le monde (Burger & Cheneval, 2011)	6
Figure 2 : Répartition du palmier dattier dans le monde en 2012 (El-Mously & Darwish, 2020)	6
Figure 3 : Répartition des oasis en Algérie (Lakhdari, 2014)	7
Figure 4 : Répartition des palmier dattier (<i>Phoenix dactylifera</i> . L) par variété dans la wilaya d'Adrar (DSA, 2021)	8
Figure 5 : Schéma structural du palmier dattier (Tahri, 2018)	9
Figure 6 : Système racinaire du palmier dattier (Peyron, 2000; Bellabidi, 2019)	10
Figure 7 : Schéma d'une palme (Munier, 1973; Peyron, 2000)	12
Figure 8 : Schéma simplifié du mécanisme réactionnel de la gazéification de la biomasse. (Morin, 2017)	33
Figure 9 : Les différentes phases de pyrolyse de la biomasse (Christodoulou, 2013).....	35
Figure 10 : Différents modèles de gazéificateurs à lit fixe, y compris les zones de réaction caractéristiques de chaque modèle (Thanh Phong & Nguyen, 2020).....	39
Figure 11 : Schéma de principe des différents types de gazéificateurs à lit fluidisé. a) lit fluidisé dense ; b) Lit fluidisé à recirculation ; c) Lit fluidisé double (Bellouard, 2017)	42
Figure 12 Gazéificateur à lit entraîné : à alimentation par le haut (gauche)à alimentation latérale (droite) (Molino, et al., 2018).....	44
Figure 13 : Système de gazéification plasma (Bhui & Vairakannu, 2018)	47
Figure 14 : Les systèmes de plasma DC à torche transférée et non transférée (Tang, et al., 2013)	48
Figure 15 : Options d'utilisation de gaz synthétiques (Jameel & Keshwani, 2018)	58
Figure 16 : Procédé Fischer-Tropsch (Deydier, 2012)	59
Figure 17 : Processus simplifié de la production d'éthanol par fermentation du gaz de synthèse (Jameel & Keshwani, 2018).....	60
Figure 18 : Vue globale (haut) et découpe longitudinale (bas) du prototype préliminaire de gazéification	69
Figure 19 : amélioration de la fenêtre d'alimentation et sortie du gaz de synthèse.....	70
Figure 20 : Ancien (gauche) et nouveau (droite) lit de substrat	71
Figure 21 : Système de répartition de l'agent de gazéification	71
Figure 22 : Schéma descriptif et photo réel du cyclone	72
Figure 23 : Schéma descriptif et photo du prototype assemblé	73
Figure 24 : Nombre de déchets générés par échantillon de palmier dattier (<i>Phoenix dactylifera L.</i>) variété <i>Takarbouche</i>	80
Figure 25 : Poids des différents déchets générés par échantillon de palmier dattier (<i>Phoenix dactylifera L.</i>) variété <i>Takarbouche</i>	81
Figure 26 : Analyse de variances ANOVA	82
Figure 27 : Poids moyen des déchets de palmier dattier (<i>Phoenix dactylifera L.</i>) variété <i>Takarbouche</i>	82
Figure 28 : Rapport poids/longueur des déchets par échantillon de palmier dattier (<i>Phoenix dactylifera L.</i>) variété <i>Takarbouche</i>	83
Figure 29 : Rapport moyen poids/longueur.....	84
Figure 30 : Proportion des différents déchets par échantillon de palmier dattier (<i>Phoenix dactylifera L.</i>) variété <i>Takarbouche</i>	85
Figure 31 : Proportion moyenne des déchets de palmier dattier (<i>Phoenix dactylifera L.</i>) variété <i>Takarbouche</i>	86
Figure 32 : Potentiel de la biomasse lignocellulosique phoenicicole estimé au cours du nettoyage annuel pour les palmiers productifs et pour les palmiers totaux (productifs et non productifs) variété <i>Takarbouche</i>	89
Figure 33 : Evolution de la température au cours de la gazéification	97
Figure 34 : Evolution de la température en fonction du temps pour la sciure de bois	98

Liste des figures

Figure 35 : Evolution de la température en fonction du temps pour les palmes	99
Figure 36 : Evolution de la température en fonction du temps pour les pétioles	100
Figure 37 : Evolution de la température en fonction du temps pour les pédoncules du régime.....	101
Figure 38 : Evolution de la température en fonction du temps pour le régime	102
Figure 39 : Température en fonction de la hauteur pour le substrat sciure de bois	103
Figure 40 : Température en fonction de la hauteur pour le substrat palmes.....	103
Figure 41 : Température en fonction de la hauteur pour le substrat pétioles	104
Figure 42 : Température en fonction de la hauteur pour le substrat pédoncule du régime	104
Figure 43 : Température en fonction de la hauteur pour le régime	105
Figure 44 : Fraction molaire des gaz à l'intérieur du gazéificateur par modèle CFD. (a) monoxyde de carbone ; (b) hydrogène (c) méthane (d) dioxyde de carbone (e) azote (Pandey, et al., 2021)	113
Figure 45 : Résultats du modèle de réseau neuronal pour la prédiction de la température du gaz de synthèse (Mikulandrić, et al., 2014)	114
Figure 46 : Schéma de principe des réactions exothermiques et endothermiques dans un gazéifie à contre- courant (Pang, 2016)	116
Figure 47 : Structure du modèle d'équilibre thermodynamique.....	119
Figure 48 : diagramme général de l'équilibre énergétique du système d'étude	122

Liste des Photos

Liste des photos

Photo 1 : Tronc du palmier dattier.....	11
Photo 2 : Inflorescence femelle (gauche) et mâle (droite).....	13
Photo 3 : Pollinisation artificielle d'un palmier	14
Photo 4 : Opération de nettoyage d'un palmier dattier (<i>Phoenix dactylifera L.</i>)	15
Photo 5 : Déchets lignocellulosiques du palmier dattier	16
Photo 6 : Poupée en palmes (Battesti, 2005).....	17
Photo 7 : Quelques utilisations fréquentes des déchets de palmier dattier (a) piège à oiseau « mendef », (b) cuisson, (b) brise vent « afregh », (d) panier pour dattes, (e) système d'irrigation, (f) toit.....	19
Photo 8 : Quelques articles issu de l'activité de vannerie à base des déchets lignocellulosiques du palmier dattier.....	20
Photo 9 : Confection des articles (homme et femme)	21
Photo 10 : Déchets de palmier dattier brulés (<i>Mraguen, Adrar</i>)	22
Photo 11: Image par microscopie électronique à balayage de la surface des fibres du palmier dattier avant (a) et après (b) absorption des ions Cr ⁺⁶ (Rambabu, et al., 2020)	24
Photo 12 : Image microscopique de la structure de pétiole avant (gauche) et après activation physique à 950°C (droite) (Rezma, et al., 2017)	25
Photo 13 : Déchets de palmier dattier après nettoyage.....	64
Photo 14 : Mensuration des déchets de palmier dattier (<i>Phoenix dactylifera L.</i>) variété <i>Takarbouche</i> 65	
Photo 15 : Séchage et prise de poids des déchets de palmiers dattiers (<i>Phoenix dactylifera L.</i>) variété <i>Takarbouche</i>	65
Photo 16 : Déchiquetage et broyage des déchets de palmier dattier	66
Photo 17 : Nettoyage des déchets Phoenicicoles.....	67
Photo 18 : Deuxième broyage et tamisage pour caractérisation.....	67
Photo 19 : Ouverture pour allumage	72
Photo 20: Bac et conduite d'alimentation pour substrat.....	73
Photo 21 : Ajout d'un joint de silicone.....	74
Photo 22 : Compresseur d'air F.I.M.A	74
Photo 23 : Acquisition de données Fluck Hydra série II.....	75
Photo 24 : Emplacement des thermocouples.....	76
Photo 25 : Les six déchets lignocellulosique générés du palmier dattier (<i>Phoenix dactylifera L.</i>)	79
Photo 26 : Récupération du goudron éliminé par le système d'épuration cyclone	106
Photo 27 : Test d'inflammabilité pour la gazéification de la sciure de bois.....	107
Photo 28 : Test d'inflammabilité, de gauche à droite, palmes, régime, pétiole, pédoncule du régime 108	
Photo 29: Aspect générale du substrat à la fin de la gazéification	110

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau 1 : Utilisation traditionnelle et artisanale des déchets de palmier dattier, (Bousdira, 2007; Battesti, 2005)	18
Tableau 2 : Vertus et utilisation médicinale de quelques parties du palmier dattier (Senoussi, et al., 2017; Echegaray, et al., 2020).....	22
Tableau 3 : Elimination de quelques polluants des solutions aqueuses par fibres du palmier dattier ...	24
Tableau 4 : Principales réactions de la gazéification (Situmorang, et al., 2020; Kumar, et al., 2014)..	36
Tableau 5 : Type d'alimentation en chaleur par gazéification (Gräbner, 2015)	38
Tableau 6 : Avantages et défis techniques des différents agents de gazéification (Richardson, et al., 2015; Olwa, 2011)	38
Tableau 7 : Quelques études de co-gazéification réalisés pour différents déchets (Yang, et al., 2021)	49
Tableau 8 : Composition du gaz de synthèse en fonction des différents agents de gazéification (Kumar, et al., 2014).....	52
Tableau 9 : Composés de goudron identifiés sous des sous-groupes distincts (Ghosh, 2018).....	55
Tableau 10 : Impuretés et leurs techniques d'élimination (Ghosh, 2018; Dufour, 2007).....	57
Tableau 11 : paramètre methodes standard de caractérisation	68
Tableau 12 : Evaluation du potentiel de biomasse lignocellulosique du palmier dattier (<i>Phoenix dactylifera L.</i>) variété <i>Takarbouche</i> dans la wilaya d'Adrar par rapport au nombre de palmier productif.	87
Tableau 13 : Evaluation du potentiel de biomasse lignocellulosique du palmier dattier (<i>Phoenix dactylifera L.</i>) variété <i>Takarbouche</i> dans la wilaya d'Adrar par rapport au nombre total de palmier ..	88
Tableau 14 : valeurs de la densité ou masse volumique pour les substrats choisis pour les tests de gazéification	90
Tableau 15 : Analyses immédiates des déchets de palmier dattier.....	90
Tableau 16 : Analyse approximative des déchets de palmier dattier.....	93
Tableau 17 : Rapport atomique	95
Tableau 18 : Comparaison des valeurs du pouvoir calorifique obtenues avec d'autres études.....	96
Tableau 19 : Taux de conversion en fonction du temps de séjour :	109
Tableau 20 : La valeur de h_0f (kJ/mol) et les coefficients constants de l'équation empirique pour $\Delta g_0f, T, i$ (kJ/mol) (Basu, 2013).....	121
Tableau 21 : Les coefficients $a-d$ de la capacité thermique massique à pression constante de certains gaz (Jarunghammachote & Dutta, 2007)	122
Tableau 22 : Composition estimée du gaz de synthèse produit lors des essais de gazéification pour chaque substrat	124

Liste des abréviations

Liste des abréviations

\bar{h}_f^0 L'enthalpie de formation en kJ/kmol

$\Delta\bar{h}_T$ La différence d'enthalpie entre un état donné et l'état de référence

$\Delta\bar{g}_{f,T,i}^0$ Fonction de Gibbs standard de la formation d'espèces gazeuses

ΔG^0_T La différence de l'énergie libre de Gibbs entre les produits et les réactifs

μm micromètre

ANN *Artificial Neural Network* ou réseau de neurones artificiels

ANOVA *ANalysis Of VAriance* ou analyse de la variance

ASTM *American Society for Testing and Materials* ou Société Américaine pour les Essais des Matériaux

BFB *Bubbling Fluidized Bed gasifier* ou gazéificateur à lit fluidisé bouillonnant

C₃H₆O₃ acide lactique

C₆H₁₂O₆ glucose

Cd cendres

Cd(II) Cadmium

CF carbone fixe

CFB *Circulating Fluidized Bed gasifier* ou gazéificateur à lit fluidisé circulant

CFD *Computational Fluid Dynamics* ou dynamique des fluides numériques

CH₄ méthane

CO oxyde de carbone

CO₂ dioxyde de carbone

C_p capacité thermique spécifique à pression constante en kJ/Kmol K

CPG Chromatographie en Phase Gazeuse

Cr Chrome

DME éther diméthylique

DSA Direction des Services Agricoles

ER Equivalence Ratio ou rapport d'équivalence

ESP électrofiltres

Foa *Fusarium oxysporum f.sp. albedinis*

GES Gaz à Effet de Serre

GIEC Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

H humidité

Liste des abréviations

H₂ Hydrogène

HAP Hydrocarbures aromatiques polycycliques

INRAA Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie

KOH Hydroxyde de potassium

KW kilowatt

MgO Oxyde de magnésium

MJ/kg mégajoule par kilogramme

MJ/Nm³ mégajoules par Normo mètre cubes

MS matière sèche

MV matières volatiles

MW méga watt

N₂ Azote

NaOH Hydroxyde de sodium

Ni(II) Nickel(II)

OPEP Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole

Pb(II) Plomb

PCI Pouvoir Calorifique Inférieur

PCS Pouvoir Calorifique Supérieur

pH potentiel hydrogène

R constante des gaz parfait, 8,314 kJ/ (kmol K)

SCWG *Supercritical Water Gasification* ou gazéification d'eau supercritique

tr/min tours par minute

URERMS Unité de Recherches en Energies Renouvelables en Milieu Saharien

ρ Masse volumique en kg/m³

Résumé

Le présent travail se focalise sur la gestion et valorisation de la biomasse lignocellulosique par gazéification dans un réacteur à lit fixe contre-courant (up draft). La biomasse valorisée dans cette thèse est les déchets lignocellulosique issus des opérations de nettoyage annuels des palmiers dattiers Algériens (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche* de la wilaya d'Adrar.

Les principaux résultats de prospection du terrain montrent que les déchets produits durant l'opérations de nettoyage annuel des palmiers dattiers peuvent atteindre une quantité globale d'environ 5380,28568T de déchets, avec des pourcentages massiques de 53,55%, 17,41%, 12,91%, 6,89%, 4,87%, 4,36% pour les palmes sèches, pétioles, régime, pédoncule du régime, spathe et fibrilium respectivement. Cette quantité peut être augmenté de plus de la moitié, si les opérations de nettoyage touchent les palmiers dattiers non productifs.

La caractérisation de cette biomasse montre qu'elle possède un potentiel énergétique intéressant qui varie entre 11,81(MJ/kg) et 17,81 (MJ/kg) ce qui rend sa valorisation intéressante. Sa faible teneur en eau qui varie entre 3,32 et 5,81% et son taux élevé de matière volatile qui varie entre 82,47% et 94,05%, favorisent sa conversion thermique et facilite l'allumage lors de la gazéification. Les cendres à leur tour présentent des valeurs conformes au résultats des travaux sur d'autres palmiers dattier et varient entre 1,99% et 11,7%

Les tests de gazéification montrent une allure de température opératoire cohérente pour la gazéification avec l'air. Le gaz produit lors des tests est inflammable et sa température se situe dans l'intervalle donné par la bibliographie entre 200 et 400°C pour les palmes, pétioles, régime, tandis que les pédoncules du régime présentent un profile de température plus. Le taux de conversion obtenu à la fin des tests varie entre 89 et 95%. La composition du gaz produit est variable, en fonction de la composition du substrat et la température opératoire, avec un pouvoir calorifique intéressant qui varie entre 4,42MJ/Nm³ et 17,86MJ/Nm³.

Les résultats expérimentaux de cette thèse ne représentent qu'une modeste contribution à la nouvelle stratégie de développement des énergies renouvelables et gestion et valorisation des déchets.

Mots clés : Palmiers dattiers Algériens, variété *Takarbouche*, gazéification, réacteur contre-courant, température opératoire, gaz de synthèse, taux de conversion.

Abstract

This work focuses on the management and valorization of lignocellulosic biomass by gasification in fixed-bed up draft reactors. The biomass valued in this thesis is the lignocellulosic waste resulting from the annual cleaning operations of the Algerian date palms (*Phoenix dactylifera L.*) *Takarbouche* variety of Adrar.

The main field prospecting results show that the waste produced during the annual date palm cleaning operations can expect an overall quantity of waste of approximately 5380,28568T with mass percentages of 53,55%, 17,41%, 12,91%, 6,89%, 4,87%, 4,36% for dry palms, petioles, bunch, bunch peduncle, spathe and fibrilium respectively. This quantity can be increased by more than half, if the cleaning operations affect non-productive date palms.

The characterization of this biomass shows that it has an interesting energy potential which varies between 11,81 (MJ/kg) and 17,81 (MJ/kg) that makes its valuation interesting. Its low water content, which varies between 3,32% and 5,81%, and its high rate of volatile matter, which varies between 82,47% and 94,05%, promote its thermal conversion and facilitate ignition during gasification. The ashes in turn present values in line with the results of work on other date palms and vary between 1,99% and 11,7%.

Gasification tests show a coherent operating temperature curve for gasification with air. The gas produced during the tests is flammable and its temperature is within the interval given by the bibliography between 200 and 400°C for the palms, petioles, bunch, while the peduncles of the bunch have a temperature profile lower than this interval. The conversion rate obtained at the end of the tests varies between 89 and 95%. The produced gas composition is variable, depending on the composition of the substrate and the operating temperature, with an interesting calorific value which varies between 4,42MJ/Nm³ and 17,86MJ/Nm³

The experimental results of this thesis represent only a modest contribution to the new strategy for the development of renewable energies and waste management and recovery.

Keywords: Algerian date palms, *Takarbouche* variety, gasification, up draft reactors, operating temperature, produced gas, conversion rate.

ملخص

يركز هذا العمل على إدارة وتثمين الكتلة الحيوية السيلولوزية عن طريق التغويز في المفاعلات ذات الطبقة الثابتة المعاكسة. الكتلة الحيوية المستخدمة في هذه الأطروحة هي النفايات السيلولوزية الناتجة عن عمليات التنظيف السنوية لنخيل التمر الجزائري صنف تاقربوش بولاية أدرار

تظهر النتائج الرئيسية للدراسة الميدانية أن كمية الكتلة الحيوية السيلولوزية الناتجة عن عملية التنظيف السنوية لنخيل التمر المنتج تقارب 5380،28568 طن بنسب كتلة 53،55٪، 17،41٪، 12،91٪، 6،89٪، 4،87٪، 4،36٪ من جريد النخيل الجاف، كرناف، عراجين، أعناق العراجين، غلاف الطلع، والياف على التوالي. يمكن مضاعفة هذه الكمية بأكثر من النصف إذا شملت عمليات التنظيف أشجار النخيل غير المنتجة

يوضح توصيف هذه الكتلة الحيوية أن لديها قيمة طاقة هامة تتراوح بين 11،81 (ميغا جول/كغم) و 17،81 (ميغا جول/كغم) مما يجعل تثمينها مثيراً للاهتمام. نسبة الرطوبة المنخفضة التي تتراوح قيمتها بين 3،32٪ و 5،81٪ وكذا نسبة المواد المتطايرة العالية التي تتراوح بين 82،47٪ و 94،05٪ تدعم التحويل الحراري لنفايات النخيل كما تسهل الاشتعال أثناء عملية التغويز. يقدم الرماد بدوره قيمة تتراوح بين 1،99٪ و 11،7٪. وهي تتوافق مع نتائج مختلف الابحاث الأخرى حول نخيل التمر

تُظهر اختبارات التغويز ان شكل منحنى درجة حرارة مطابق لعملية التغويز بالهواء. الغاز الناتج أثناء الاختبارات قابل للاشتعال ودرجة حرارته تقع ضمن المجال المحدد في الببليوغرافيا بين 200 و 400 درجة مئوية بجريد النخيل، والكرناف، والعرجون، في حين أن ساق العرجون لها درجة حرارة أقل من هذا النطاق. يتراوح معدل التحويل الذي تم الحصول عليه في نهاية الاختبارات بين 89 و 95٪. تختلف تركيبة الغاز الناتج باختلاف تركيبة نفايات النخيل ودرجة حرارة التشغيل، كما يتميز بقيمة طاقة مثيرة للاهتمام تتراوح بين 4،42 (ميغا جول/م³) و 17،86 (ميغا جول/م³)

تمثل النتائج التجريبية لهذه الأطروحة مساهمة متواضعة فقط في الاستراتيجية الجديدة لتطوير الطاقات المتجددة وإدارة النفايات واستعادتها

الكلمات المفتاحية: نخيل التمر الجزائري، صنف تاقربوش، التغويز، مفاعلات الثابتة المعاكسة، درجة حرارة التشغيل، الغاز المنتج، نسبة التحويل.

Introduction générale

Introduction générale

L'industrialisation et la croissance de la population mondiale accélèrent les besoins énergétiques dans le monde. Les combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel présentent les principales sources d'énergie actuellement utilisés pour satisfaire les besoins énergétiques mondiaux. Cependant ces sources d'énergie risquent de s'épuiser au cours des 40 à 50 prochaines années, sans oublier leur impact négatif sur l'environnement tels que le réchauffement climatique, les pluies acides et le smog urbain (Saidur, et al., 2011; Bakhtawar, et al., 2021). La biomasse est classée en quatrième position comme source d'énergie, et fournis plus de 10% de l'énergie mondiale. Cette source a l'avantage d'être renouvelable, disponible en abondance et répartie de manière uniforme sur la terre (Farzad, et al., 2016) . Au fil des années, la biomasse est devenue une source d'énergie populaire avec un grand potentiel pour être à la fois une source renouvelable, fiable, propre et régulière pour répondre à nos besoins énergétique croissants. L'énergie issu de la biomasse peut être utilisée sous plusieurs formes, elle peut être convertie en chaleur, en électricité ou en biocarburants. L'utilisation des bioénergies continue d'augmenter dans de nombreux pays, du fait que c'est une alternative sûre qui permet d'éviter les émissions de dioxyde de carbone (CO₂), constitue également un avantage pour l'économie en difficulté en créant une industrie et en créant plus d'emplois, aussi elle permet de faire face aux problèmes liés à l'industrialisation et l'utilisation des énergies fossiles tell que le changement climatique et la gestion des déchets. (eia, 2021; Jain, et al., 2021)

L'Algérie, comme les autres pays du monde, s'est engagé sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques fossile. Pour cela une nouvelle stratégie est mise en place pour exploiter les énergies renouvelables. Cette stratégie vise à atteindre une production d'environ 22000 MW d'électricité à partir de ressources énergétiques renouvelables dont 1000MW à partir de la biomasse et une réduction de plus de **193** millions de tonnes de CO₂ d'ici 2030 (Ministère de l'énergie , 2019).

La wilaya d'adrar dispose d'un grand potentiel de biomasse composé principalement de palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) qui s'étend sur une surface d'environ 27 804 ha, avec un nombre total de 3.978.800 palmiers (DSA, 2021) . Chaque année en début de la nouvelle saison agricole ces palmiers subissent une opération d'entretien et nettoyage qui génère des quantités énormes de biomasse lignocellulosique, qui peuvent atteindre ou dépasser **65 kg/palmier** selon la variété (Bousdira, 2015), malheureusement cette biomasse n'est pas

Introduction Générale

valorisée et sa major partie est brûlée à l'air libre ce qui cause la perte d'un potentiel énergétique important et une pollution à la fois atmosphérique et visuelle. A partir de ce point il a été nécessaire de trouver un moyen pour mieux gérer ces quantités énormes de biomasse et exploiter son potentiel énergétique.

Plusieurs technologies sont développées pour valoriser la biomasse sous forme d'énergie ou de matière. Parmi ces diverses technologies la gazéification de la biomasse présente un processus renouvelable prometteur efficace qui permet d'obtenir un produit de valeur « le gaz de synthèse » qui a un large domaine d'application, comme la production d'électricité et des produits chimiques précieux. (Farzad, et al., 2016; Zhang, et al., 2021)

La gazéification est une technologie de pointe efficace et très performante qui permet la conversion thermique de la biomasse en combustible gazeux propre (Ali, et al., 2022). Cette technologie est considérée depuis longtemps comme une alternative à la combustion de charges solides ou liquides, sa première utilisation date de 1792 comme source d'éclairage publique (Basu, 2013). Ce procédé est basé sur l'utilisation de la chaleur et un agent oxydant tel que l'air ou l'oxygène pour décomposer la biomasse et la convertir en mélange gazeux composé principalement de CO, CO₂, H₂, H₂O et CH₄ ainsi que d'autres éléments sous forme liquide comme le méthanol et le goudron (Speight, 2020; Basu, 2013).

La gazéification de la biomasse, a regagné de l'intérêt depuis la fin du 20^{ème} siècle avec la prise de conscience des problèmes énergétiques et du changement climatique vu sa capacité à réduire considérablement les émissions de gaz à effet de serre (GES) par rapport aux systèmes à combustibles fossiles. La gazéification constitue également une solution pour diminuer les coûts d'élimination des déchets solides tout en compensant l'utilisation de combustibles fossiles et les coûts énergétiques (Broer & Peterson, 2019; Pommeret, et al., 2017; Farzad, et al., 2016).

L'objectif de cette thèse est l'étude du procédé de gazéification par la réalisation d'un prototype de gazéification et la valorisation de la biomasse lignocellulosique phoenicicole issu des opérations annuelles de maintenance et nettoyage du palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) dans la wilaya d'Adrar.

Le plan de cette thèse commence par la présente introduction générale, puis se base sur deux parties principales l'une théorique et l'autre est expérimentale, et se termine par une conclusion générale.

Introduction Générale

La partie théorique comporte deux chapitres, le premier est consacré aux palmier dattier, son histoire, sa répartition dans le monde, en Algérie et bien sûr dans la wilaya d'Adrar, sa culture et son cycle de vie ainsi que les différentes voies de valorisation des déchets lignocellulosique phoenicicole par les méthodes traditionnelles et artisanal, ainsi que les nouvelles technologies de valorisation développées. Le deuxième chapitre se focalise sur le processus de la gazéification de la biomasse, sa définition, son développement à travers le temps, ses étapes et les principales équations misent en jeu, les facteurs qui influencent la gazéification, les différentes technologies de gazéification qui existent, ainsi que les produits qui résultent de la gazéification, sans oublier les différentes méthodes d'épuration du gaz de synthèse ainsi que ses voies de valorisation.

La partie expérimentale contient deux chapitres, le premier commence par la présentation du lieu et une prospection sur terrain ainsi que la méthode d'échantillonnage suivi par les différentes méthodes de caractérisation de notre substrat. Par la suite les détails des étapes de réalisation du prototype de gazéification ainsi que les modifications apportées jusqu'à obtention de la conception finale, la dernière étape c'est les tests de gazéification et les paramètres à suivre au cours du processus. Le deuxième chapitre de la partie expérimentale comprend la discussion des résultats des prospections sur terrains au niveau du lieu d'étude et leur interpolation à l'échelle de la wilaya d'Adrar, l'interprétation et la discussion des résultats de la caractérisation et des tests de gazéification, et en dernier une estimation de la composition du gaz de synthèse est établie à l'aide d'un modèle thermodynamique.

Cette thèse est finalisée par une conclusion générale et des perspectives.

*Chapitre 1 : Généralité sur le
palmier dattier (Phoenix
dactylifera L.)*

1. Introduction :

Le palmier dattier, plante emblématique du désert, est le plus ancien arbre fruitier cultivé dans les régions arides et semi-arides de la planète depuis 6,000 à 8,000 ans, ses premiers cultivateurs sont les Sumériens. La première émergence du palmier dattier remonte à 4000 av. en Mésopotamie (Irak actuellement), on le trouve dans les iconographies mésopotamiennes, pour eux le dattier symbolisé la fertilité de la terre et la source de richesse. (Michel-Dansac & Caubet, 2013; El-Mously & Darwish, 2020; Wakil, et al., 2015)

Le nom scientifique (*Phoenix dactylifera L.*), du palmier dattier dénommé par Linné en 1734, provient du mot phénicien "*Phoenix*" qui signifie palmier, alors que "*dactylifera*" provient du mot grec "dactylos" qui signifie le doigt, illustrant la forme en doigt des dattes.

Une autre hypothèse dit que les Grecs ont donné le nom *phœnix* comme l’oiseau qui renait de ses cendres en raison de la capacité du palmier à survivre après avoir été partiellement brûlé. Tandis que le terme *dactylifera* vient de l’association de deux mots latin *daktulos* et *fero* le premier signifie le doigt, illustrant la forme en doigt des dattes et le deuxième signifie « porté » (Gros-Balthazard, et al., 2013; Munier, 1973)

2. Répartition géographique du palmier dattier

2.1 Dans le monde

Le palmier dattier est l’arbre symbolique des régions arides et semi-arides de l’Ancien Monde ; il est cultivé et exploité depuis plusieurs millénaires au Moyen-Orient et dans le nord de l’Afrique (Gros-Balthazard, et al., 2013) . Cependant la culture du palmier dattier n’est pas limitée à cette zone car il a été introduit dans plusieurs régions dans le monde (figure 1) pour son utilisation comme arbre fruitier ou plante ornementale, comme les Etats-Unis d’Amérique qui a commencé sa culture vers les années 1900 suite à l’importation des variétés algériennes, en particulier *Deglet-Nour* et des variétés Irakiennes. (Hilgeman, 1972)

Chapitre 1 : Généralité sur le palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.)

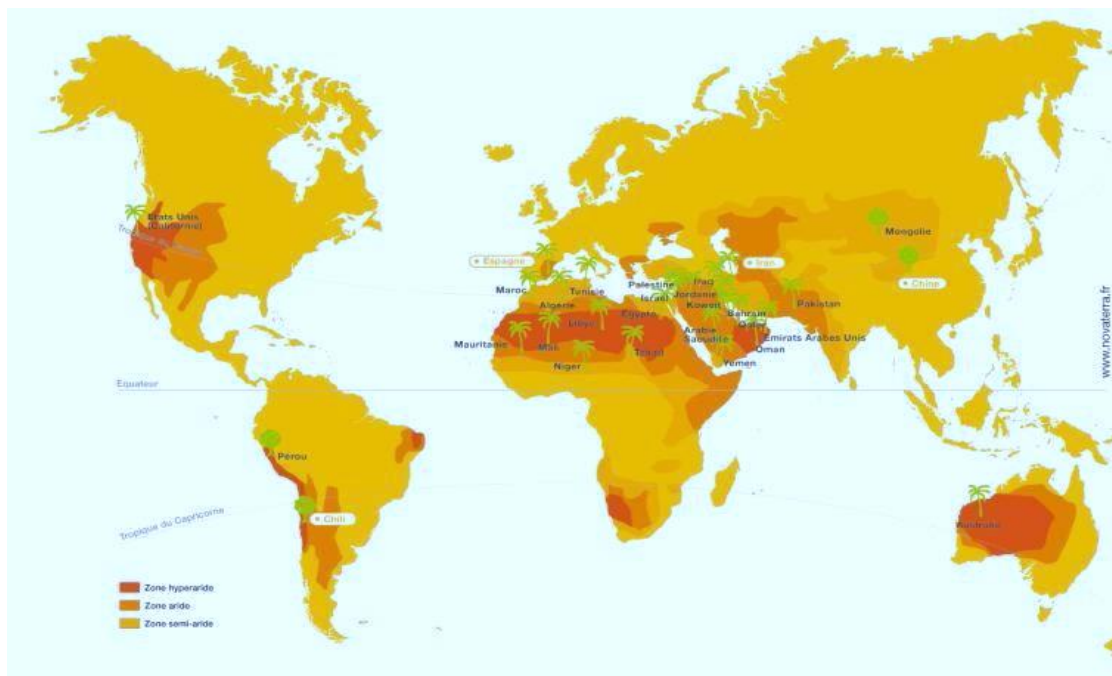


Figure 1: Répartition des oasis dans le monde (Burger & Cheneval, 2011)

Actuellement, le monde compte plus de 120 millions de palmiers dattiers étendus sur une superficie de **800000 ha** produisant plusieurs millions de tonnes de dattes par an. (Zafar, 2020)

Le monde arabe compte plus de 84 millions de palmiers dattiers, la majorité en Égypte, en Irak, en Arabie saoudite, en Iran, en Algérie, au Maroc, en Tunisie et aux Émirats arabes unis (Zafar, 2020). La figure 2 montre la répartition mondiale du palmier dattier en 2012.

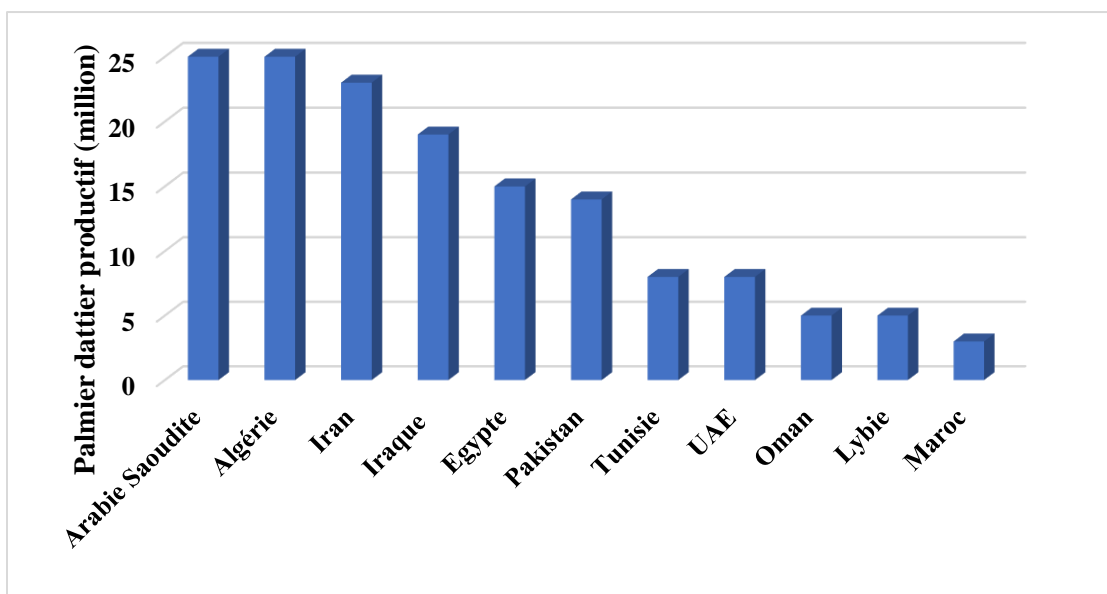


Figure 2 : Répartition du palmier dattier dans le monde en 2012 (El-Mously & Darwish, 2020)

Chapitre 1 : Généralité sur le palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*)

2.2 En Algérie

Les oasis Algériennes représentent la plus grande superficie des oasis du Maghreb sont localisées dans 14 wilayas allant du nord du Sahara jusqu'à l'extrême sud, réparties principalement entre deux régions :

- **La région nord** avec les oasis des Zibans, de l'Oued Righ, El Oued et Ouargla ;
- **La région sud-ouest** avec les oasis du M'zab, du Touat et du Gourara. (Moulai & Yahaya, 2019)

L'agriculture dans ces régions sahariennes repose sur la phœniciculture vue ses capacités d'adaptation aux conditions climatiques difficiles et qui constitue l'élément essentiel sur lequel repose tout l'écosystème Oasien. Le palmier dattier domine les surfaces agricoles oasiennes **167 279 ha**, avec plus de 18 millions palmier et une diversité d'environ 1000 cultivars. (Ministère de l'Agriculture et de Développement Rural, 2019)

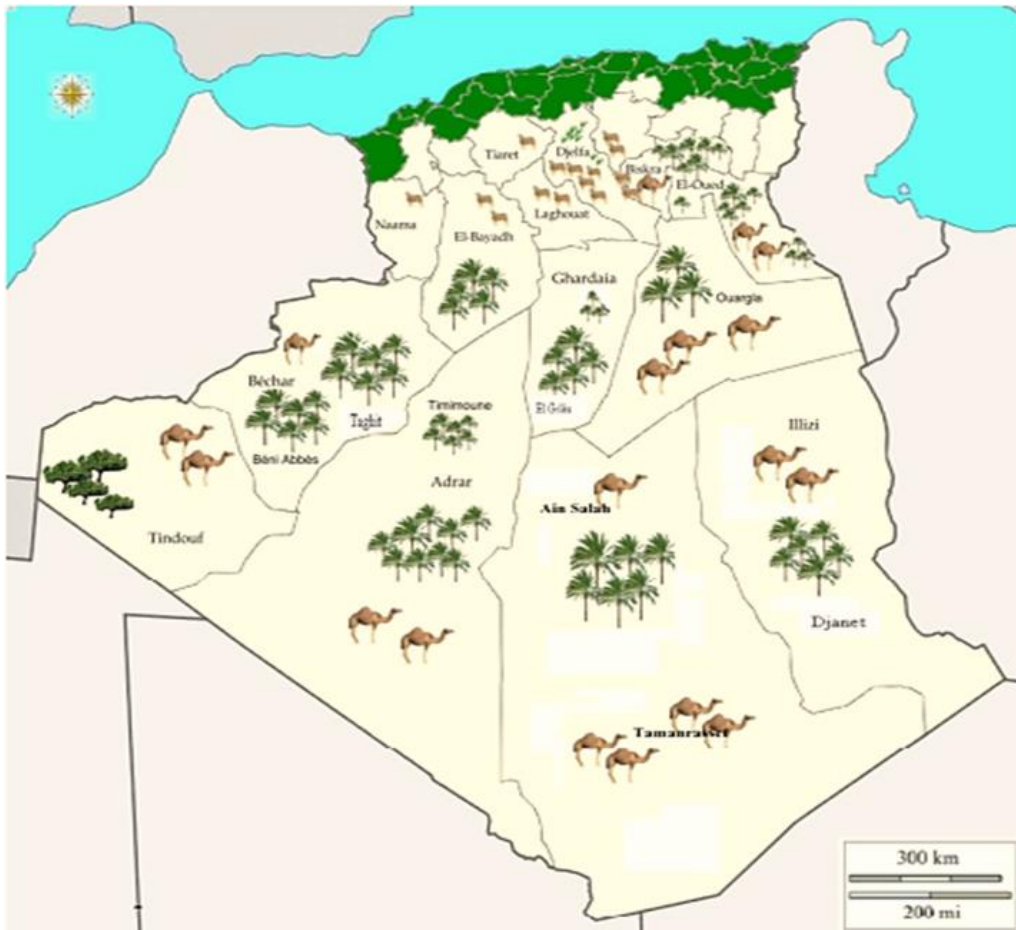


Figure 3 : Répartition des oasis en Algérie (Lakhdari, 2014)

2.3 Dans la région Touat, Gourara et Tidikelt

La surface réservée à la phœniciculture dans la région Touat, Gourara et Tidikelt est d'environ 27 804 ha, avec un nombre total de 3.978.800 palmiers, dont cinq variétés dominantes existent, à savoir Hmira qui représente 42.46% des palmiers dattiers de la région, Tinacer, Aghamou, Teggaza et Takarbouche, dont les proportions sont données dans la figure 4 (DSA, 2021).

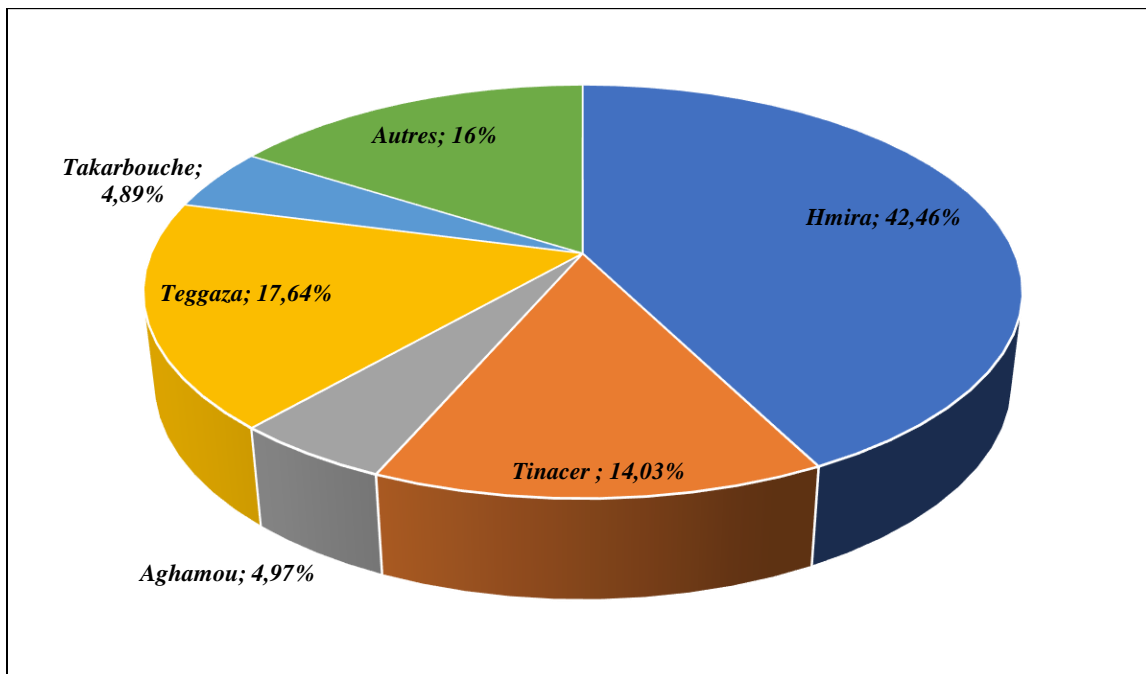


Figure 4 : Répartition des palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) par variété (DSA, 2021)

3. Systématique et morphologie du *phoenix dactylifera L.*

Le palmier dattier (*phoenix dactylifera L.*) est une espèce dioïque, monocotylédone de la famille des plantes tropicales (*Palmae* ou *Arecaceae*), qui très souvent ne possède pas de branche et peut vivre jusqu'à 100 ans et plus (El-Mously & Darwish, 2020). Le palmier dattier peut atteindre jusqu'à 30 mètres d'hauteur, avec de longues feuilles pennées (4 à 7 mètres) finement divisées nommées palmes qui couronnent un tronc cylindrique (Munier, 1973; Sallon, et al., 2008). La figure 5 montre un schéma structural détaillé du palmier dattier.

Comme toutes les espèces du genre *Phoenix*, il existe des arbres mâles appelés communément *Dokkars* et des arbres femelles appelés *Nakhla*.

Chapitre 1 : Généralité sur le palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.)

Les inflorescences mâle et femelle appelées spadices sont enveloppées d'une très grande bractée membraneuse qu'on appelle la spathe (Sallon, et al., 2008; Chaibi, et al., 2002)

La classification botanique du palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) selon (Kwaasi, 2003) est comme suit :

Groupe : Spadiciflores.

Ordre : Palmales.

Famille : Palmacées.

Sous famille : Coryfoïdées.

Tribu : Phoenicées.

Genre : *Phoenix*.

Espèce : *Dactylifera*. L

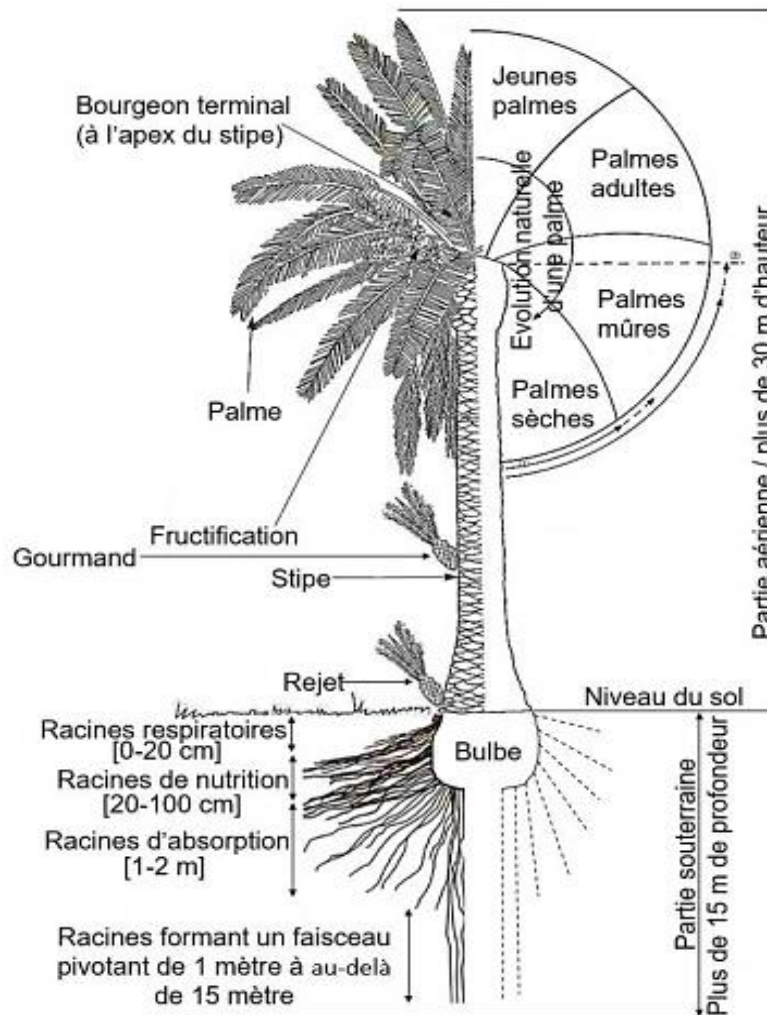


Figure 5 : Schéma structural du palmier dattier (Tahri, 2018)

3.1 Système racinaire :

Le système racinaire du palmier dattier est fasciculaire, la bulbe ou plateau racinal est volumineux et émerge en partie au-dessus du niveau du sol.

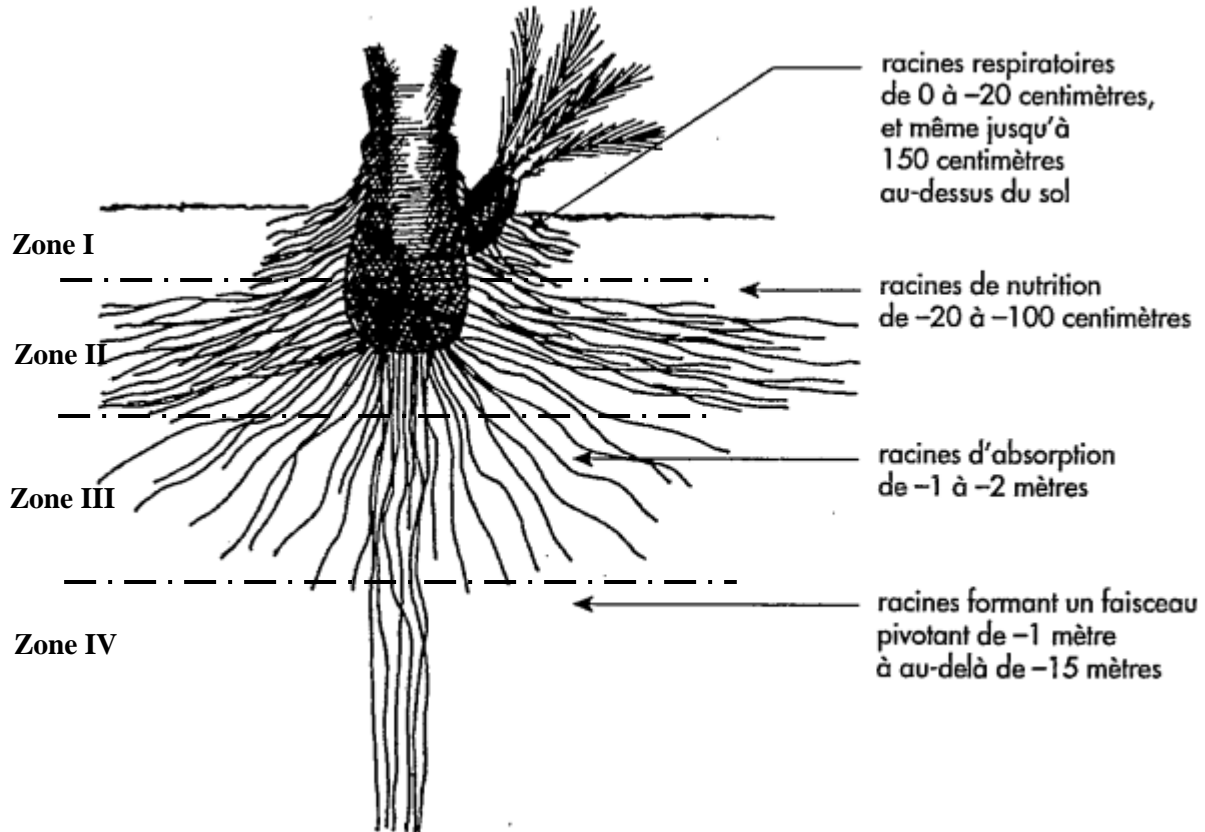


Figure 6 : Système racinaire du palmier dattier (Peyron, 2000; Bellabidi, 2019)

Le système racinaire du palmier (figure 6) est généralement très puissant et sa distribution dépend de plusieurs facteurs à noter, la nature du sol, le mode d'irrigation, le cultivar et son origine, et niveau de la nappe phréatique. Ce système compte quatre zones d'encastrement :

Zone I : les racines respiratoires poussent en faisant éclater les *Kornafs* et comprennent des racines adventives aériennes et des racines souterraines qui ne dépassent pas 0,20 m de profondeur, et s'étendent au maximum à 0,5 m du stipe. Ces racines jouent un rôle respiratoire grâce aux aérifères ou lenticelles qui permettent des échanges gazeux avec l'air de l'atmosphère du sol.

Zone II : comprise entre 0.2 et 1 m de profondeur et contient les racines de nutrition, elles sont latérales, courte et présentent la plus forte proportion du système racinaire ;

Chapitre 1 : Généralité sur le palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*)

Zone III : il s'agit des racines d'absorption qui ont pour fonction de chercher l'eau, ces racines peuvent atteindre le niveau phréatique à une profondeur de 1 à 1.8 m ;

Zone IV : ce sont les racines d'absorption de profondeur qui ont pour rôle la recherche de l'eau en profondeur du sol, elles peuvent atteindre 20 m sous le sol. (Munier, 1973; Tahri, 2018; Peyron, 2000)

3.2 Organe végétatif

Le tronc : le tronc qu'on appelle « Stipe » est un monopodiale cylindrique lignifié, de couleur brune, couvert des bases de palmes mortes (*kornaf*) recouvertes à leurs tours par un fibrillum « *Lif* ». Le tronc peut atteindre 30m de hauteur (photo 1) et un diamètre de 60cm (Munier, 1973; Tahri, 2018)



Photo 1 : Tronc du palmier dattier

Chapitre 1 : Généralité sur le palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.)

Les palmes : la palme ou « *Djérid* » est une feuille pennée dont les folioles sont régulièrement disposées en position oblique le long du rachis qui s'étend au pétiole (*Kornaf*) dur et relativement rigide, comme le montre la figure 7. Les palmes forment la couronne du palmier dattier au sommet du stipe, leur nombre varie de 50 à 200 palmes et leur longueur de 2 à 6 m ; La longueur et le nombre de feuilles varient en fonction des cultivars et des conditions agroclimatiques.

Chaque année apparaît de 10 à 30 palmes qui demeurent en activité de 4 à 7 années puis elles se dessèchent, jaunissent, et meurent. (Munier, 1973; Meraneh, 2010)

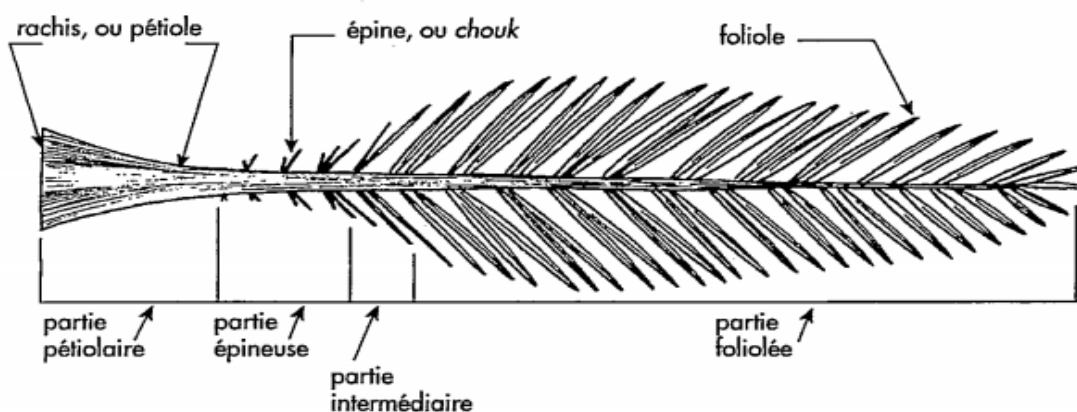


Figure 7 : Schéma d'une palme (Munier, 1973; Peyron, 2000)

Les bourgeons : chaque palmier dattier comprend un bourgeon apical ou terminal, ce dernier est responsable de la croissance en hauteur du palmier, du développement des feuilles et des bourgeons axillaires situés à l'aisselle de chaque palmier. La plupart des bourgeons axillaires finissent par avorter durant la phase juvénile du palmier, mais certains se développent pour donner naissance à un rejet (Moulay hassan, 2003)

3.3 Organe reproductif ou Organe floraux

Le palmier dattier est une plante dioïque composé d'inflorescences mâles ou femelles (photo 2) sous forme de grappes d'épis d'une longueur de 0,25 à 1 m et une couleur vert-jaunâtre protégées par une bractée appelée spathe. (Gros-Balthazard, 2012; Munier, 1973; Meraneh, 2010)



Photo 2 : Inflorescence femelle (gauche) et mâle (droite)

La pollinisation est le transport du pollen des anthères (organe floral mâle) au stigmate (organe floral femelle) (Salomón-Torres, et al., 2021). Dans les jardins oasiens traditionnels ainsi que les endroits où les palmiers sont très hauts et présentent un risque d'escalade pour les travailleurs, la pollinisation est effectuée naturellement par le vent ou les insectes. dans les palmeraies spontanées soit artificiellement par les exploitants. Pour une meilleure fécondation en phœniciculture et une production commerciale, la pollinisation artificielle est pratiquée (Meraneh, 2010). Elle consiste à consistait à placer des brins d'inflorescences mâles entre les brins d'inflorescences femelles (voir photo 3).

La pollinisation avec du pollen en suspension liquide est une autre technique de pollinisation artificielle qui consiste à pulvériser une suspension liquide qui contient de la poudre de pollen sur les inflorescences femelle via un pulvérisateur à main. (Salomón-Torres, et al., 2021)



Photo 3 : Pollinisation artificielle d'un palmier

4. Cycle de développement du palmier dattier

Selon (Munier, 1973), le cycle de développement du palmier dattier peut être divisé en quatre principales phases :

1. **Phase I jeune (5-7 ans)** : c'est la phase de croissance et de développement du palmier ;
2. **Phase II juvénile (30 ans)** : c'est l'étape d'entrée en production ;
3. **Phase III adulte (60 ans)** : début de croissance de production ;
4. **Phase IV de sénescence (80 ans et plus)** : c'est l'étape de chute de la production

5. Nettoyage des palmiers dattier

Chaque année après la récolte, les palmiers dattiers subissent un entretien ou une taille pour préparer le palmier à la nouvelle récolte et améliorer la production. La période de taille varie d'un endroit à l'autre, mais elle est effectuée pendant une de 3 périodes suivante : en automne après la récolte, au début du printemps pendant la pollinisation, et en été lors de la maturation des feuilles. (El-Mously & Darwish, 2020)

Au cours de cette opération les organes qui n'ont plus d'activité végétative et ceux qui ont une faible activité sont éliminés à l'aide d'un outil bien tranchant (voir photo4) (Munier, 1973). Selon (Agoudjil, et al., 2011) environ 13 palmes, 13 pétioles et 7 régimes, en moyenne, sont coupées lors de la taille annuelle.

Chapitre 1 : Généralité sur le palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*)

Cette opération est importante et permet de :

- Se débarrasser des feuilles sèches et jaunes ou infectées ce qui diminue la menace de prendre feu.
- Atteindre la symétrie la plus appropriée pour garantir la position verticale de la palme
- Éliminer les tissus anormaux et morts qui peuvent prendre la nutrition des fruits
- Stimuler la production de fruits et la floraison nécessaires à la pollinisation.
- Enlever les épines et les feuilles en excès qui entraveraient les processus de pollinisation ou de récolte.
- Permettre à la lumière du soleil d'atteindre les fruits pour une haute qualité du processus de photosynthèse.
- Collecte des produits de la taille qui représentent des matières premières abondantes pour plusieurs formes d'utilisation traditionnelles.
- Récupération des bourgeons apparus sur le tronc, à l'aisselle des palmes, avant leur développement.



Photo 4 : Opération de nettoyage d'un palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*)

Chapitre 1 : Généralité sur le palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*)

Les déchets lignocellulosique du palmier dattier issu de l'opération de nettoyage annuel sont composés principalement de palmes, fibrillum (lif), spath, pétioles (kernaf), régimes et quelque panicules de régime (voir Photo 5).

En plus des déchets déjà cités, le tronc du palmier dattier est considéré comme un sous-produit précieux récupéré à la fin de vie du palmier, et utilisé principalement comme substitut du bois. (El-Mously & Darwish, 2020)



Photo 5 : Déchets lignocellulosiques du palmier dattier

Selon l'étude de (Bousdira, 2015) la quantité de déchets produite annuellement par palmier diffère selon la variété, selon la même étude, la variété *Deglet Nour* produit environ 65.45 kg/palmier/an de déchet, tandis que la variété *Degla Baida* génère 32.36kg/palmier/an de déchet.

Chapitre 1 : Généralité sur le palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*)

De son côté (Agoudjil, et al., 2011) estime qu'en Algérie, 210 000 tonnes de pétioles de palmier dattier, 73 000 tonnes de palmes et 52 000 tonnes de régimes sont générés annuellement lors des opérations de taille.

6. Valorisation des déchets lignocellulosiques phoenicicoles

Symbole de fertilité et de prospérité, le palmier dattier assure aussi bien à la population oasienne qu'à son cheptel, une large gamme de déchet lignocellulosique avec une énorme quantité dont le potentiel est estimé à 730 000 tonnes / an. (Eko Sb Setyawan, 2020)

Ces déchets phoenicicoles sont utilisés traditionnellement à des fins domestiques telles que l'alimentation de bétail, le chauffage, la cuisson, les constructions, fabrication des meubles et clôtures, fabrication des brises vent ainsi que les différentes activités de vanneries et même dans la médecine traditionnelle. (Chehema & Longo, 2001; Senoussi, et al., 2017)

6.1 Valorisation traditionnelle et artisanal des déchets lignocellulosiques du palmier dattier.

La valorisation des déchets lignocellulosiques du palmier dattier existe depuis la naissance des oasis le palmier accompagne les habitants des oasis de la naissance jusqu'à la mort (berceau, poupée, cercueil). Ce savoir-faire est transmis de génération en génération par l'apprentissage pratique. La photo 6 montre une poupée traditionnelle faite à base de déchet de palmier dattier. (Battesti, 2005)



Photo 6 : Poupée en palmes (Battesti, 2005)

Chapitre 1 : Généralité sur le palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*)

Le tableau 1 montre quelques articles traditionnels fabriqués à base des différentes parties lignocellulosiques du palmier dattier.

Tableau 1 : Utilisation traditionnelle et artisanale des déchets de palmier dattier, (Bousdira, 2007; Battesti, 2005)

Partie du palmier		Son utilisation
Tronc		Toit, portes, lits, chaise, ponts et poutres, protection des conduites d'irrigation, cercueils, support de ponts, pilier pour brise vent.
Palmes	Palme	Brise vent (<i>Afrag</i>), toitures, des abris rustiques, poupée, <i>zriba</i> , piège pour oiseau (<i>mendaf</i>)
	Kornaf	Décoration, lavage des vêtements et de la laine, ponçage, piège pour poisson
	Rachis	Lit, chaise, cage, porte et berceau. Les emballages, les lattes, confection de nattes, de corbeilles
	Folioles	Chapeau, ventailles, tapis de prière (<i>Sedjada</i>), panier, tapis, couscoussier, plats (<i>Tbag</i>), cordes.
Régime sans dattes		Balai, aliment de bétail
Lif		Corde, lavette pour vaisselle, filtre, semelle, filets, conservation des dattes et aliments (<i>Kalouch</i>)

Chapitre 1 : Généralité sur le palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.)



Photo 7 : Quelques utilisations fréquentes des déchets de palmier dattier (a) piège à oiseau « *mendef* », (b) cuisson, (b) brise vent « *afregh* », (d) panier pour dattes, (e) système d'irrigation, (f) toit.

Chapitre 1 : Généralité sur le palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*)

Le tissage des vanneries fait partie des activités des cultivateurs des oasis, vue la disponibilité de la matière première tirée du palmier dattier qui permet de produire un nombre considérable d'objets indispensables au travail agricole et à la vie quotidienne.



Photo 8 : Quelques articles issu de l'activité de vannerie à base des déchets lignocellulosiques du palmier dattier

Généralement dans les activités de vannerie sans motifs décoratifs sont élaborés par des hommes, principalement les objets à usage masculin comme les bissacs, les paniers et les couffins, fabriqués essentiellement par les cultivateurs pour transporter les charges à dos d'âne ou de chameaux, contenir les réserves de céréales ou de dattes, puiser l'eau dans les puits ou encore présenter la marchandise sur les marchés. Les femmes sont particulièrement sensibles à la richesse décorative des vanneries, les ustensiles ménagers fabriqués par les femmes sont souvent décorés et finement tressés comme les plats (*Tbags*), les couscoussiers (Senoussi, et al., 2017; Benfoughal, 2009)



Photo 9 : Confection des articles (homme et femme)

Les articles confectionnés à base de la biomasse lignocellulosique phoenicicole sont des produits biologiques et bénéfiques pour l'environnement.

En 1980, le Ministère de l'Education Nationale Algérien a programmé un cours obligatoire hebdomadaire d'une heure et demi dédiée aux activités culturelles pour les niveaux primaires et secondaires, avec une liberté de choisir les thèmes. Parmi les institutions, l'école du ksar *Ikiss* (commune de Tamest) a opté pour une initiation culturelle du savoir-faire traditionnelle du palmier dattier, et les élèves apprenaient pendant ce cours les différentes techniques traditionnelles, notamment de la vannerie. (BENFOUGHAL, 2007)

En plus de la confection des articles et la construction, la biomasse lignocellulosique phoenicicole était largement utilisée dans les préparations thérapeutiques Malheureusement, les mutations socio-économiques ont fait disparaître de nombreuses préparations. Le tableau montre l'utilisation de quelques parties du palmier dattier dans la médecine traditionnelle. (Senoussi, et al., 2017; Babahani & Senoussi, 2011)

Plusieurs vertus des déchets lignocellulosiques du palmier dattier ont fait l'objet de nombreuses études scientifiques récentes. L'étude de (Echegaray, et al., 2020) a mis le point sur les multiples effets thérapeutiques des dattes et des déchets lignocellulosiques de palmier dattier. Selon cette étude les palmes possèdent des vertus anti-inflammatoire, anti-hyperglycémique, anticancérigène et anti-hypertendue.

Chapitre 1 : Généralité sur le palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*)

Tableau 2 : Vertus et utilisation médicinale de quelques parties du palmier dattier (Senoussi, et al., 2017; Echegaray, et al., 2020)

Partie du palmier	Utilisation médicinale
Penne	Ophtalmologie, Podologie (maladie des pieds)
Spathes	Diabète
Lif	Troubles dermatologiques
Stipe	Brulures et plaies
Palmes	Anti-inflammatoire, Anti-hyperglycémique, Anticancérigène, Anti-hypertendue

Les utilisations traditionnelles et artisanales des déchets lignocellulosiques du palmier dattier sont nombreuses, cependant avec la modernisation et l’envahissement des produits à bas prix, ces activités de valorisations demeurent en délaissements. La présence de déchets de palmier sur le sol après les opérations de nettoyage est devenue une charge pour les agriculteurs des oasis, et rend le déplacement et le travail du sol difficile, dans la plupart des cas, ces déchets sont brûlés directement à l’air libre (voir photo10). (Bensalah, 2014)



Photo 10 : Déchets de palmier dattier brûlés (Mraguen, Adrar)

6.2 Nouvelles technologies de valorisation de la biomasse lignocellulosique phoenicicole :

6.2.1 Production de glucose

Le glucose ($C_6H_{12}O_6$) est un sucre simple avec une large utilisation industrielle (fabrication vitamine C, acide citrique, éthanol, ...etc.), commercialement il peut être produit par plusieurs méthode à noter : l'hydrolyse, l'hydrolyse enzymatique ainsi que la fermentation des déchets biologiques riches en cellulose.

Les déchets lignocellulosiques du palmier dattier constituent un matériau de choix pour la production du glucose comme l'a prouvé (Alrumman, 2016) dans son étude, vu la richesse de ce substrat en cellulose (45.3%), sa disponibilité ainsi que son moindre coût. Cependant avant de procéder à la saccharification de la biomasse lignocellulosique phoenicicole un prétraitement est nécessaire afin d'éliminer la lignine, réduire la cristallinité et le degré de polymérisation de la cellulose augmenter la surface de contact et améliorer la sensibilité aux enzymes (Azam & Asif, 2019; Alrumman, 2016)

6.2.2 Production d'acide lactique :

L'acide lactique ($C_3H_6O_3$) connu également sous le nom d'acide 2-hydroxypropionique est un acide organique très utilisable dans l'industrie pharmaceutique, du cuir, du plastique biodégradable et de l'industrie alimentaire, il est produit par l'action de bactéries spécifique pendant un processus de fermentation.

L'utilisation des déchets agricoles bon marché tels que les déchets lignocellulosique du palmier dattier pour la production d'acide lactique demeure une alternative très intéressante qui permet d'atteindre une conversion élevée du substrat avec une productivité élevée (Nujic, et al., 2019)

6.2.3 Bioabsorbant / filtre naturel pour le traitement des eaux :

Le palmier dattier contient quatre types de fibres, à savoir, les fibres de feuilles dans le pédoncule, les fibres libériennes dans la tige, les fibres de bois dans le tronc et les fibres de surface autour du tronc.

Les études réalisées par les scientifiques ont montré que la surface grossière et poreuse riche en groupes fonctionnels hétérogènes (-OH, -COO, -COC, -NH₂, C=C) des fibres de palmier

Chapitre 1 : Généralité sur le palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*)

dattier (photo14) les classe comme adsorbant efficace, écologique et économique pour l'élimination de divers polluants des eaux usées, tels que les colorants synthétiques, les métaux lourds, la matière organique et les nutriments. (Nujic, et al., 2019)

Une étude réalisée par (Rambabu, et al., 2020) a montré que les fibres de palmier dattier issus des régimes vides ont éliminé 58,02% du Cr^{+6} dans un milieu aqueux à pH 2 après 120 min de contact, et la capacité de biosorption théorique maximale avait été estimée de de 70,49 mg/g (photo 11).

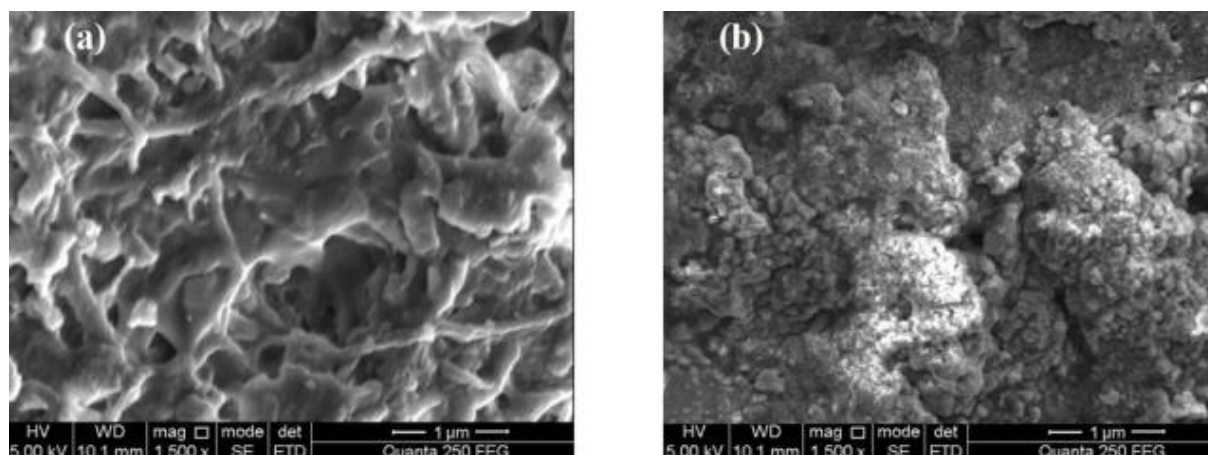


Photo 11: Image par microscopie électronique à balayage de la surface des fibres du palmier dattier avant (a) et après (b) absorption des ions Cr^{+6} (Rambabu, et al., 2020)

Le tableau 3 montre quelques études réalisées sur la capacité d'élimination de différents polluants en solution aqueuse par biosorption sur fibres de palmier dattier.

Tableau 3 : Elimination de quelques polluants des solutions aqueuses par fibres du palmier dattier

N°	Absorbant	Polluant	Référence
1.	Fibres de surface du tronc	PO_4^{3-}	(Riahi, et al., 2009)
2.	Fibres de palmier dattier	Vert malachite	(Alshabanat, et al., 2016)
3.	Fibres de palmier dattier	Violet cristal	(Alshabanat, et al., 2013)
4.	Base de palm de palmier dattier	Rouge Congo	(Alsenani, 2014)
5.	Palmes du palmier dattier	Bleu de méthylène	(Gouamid, et al., 2013)
6.	Fibres de palmier dattier	Ni(II) et Cd(II)	(Boudaoud, et al., 2017)
7.	Fibres de palmier dattier	Cr(VI)	(Haleem & Abdulgafoor, 2010)
8.	Pétiole	Pb(II)	(Hikmat, et al., 2014)
9.	Fibres de palmier dattier	Pb(II)	(Hikmat, et al., 2014)
10.	Régimes vides des palmier dattier	Cr^{6+}	(Rambabu, et al., 2020)

Chapitre 1 : Généralité sur le palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*)

D'autres études sur le traitement des eaux ont démontré que la filtration des eaux sur une fibre de palmier dattier s'avère être une méthode économique et efficace pour l'élimination de la turbidité, le phosphate, les matières organiques, et les œufs d'helminthes présent dans les eaux usées (Riahi, et al., 2009)

6.2.4 Production de charbon actif :

Le besoin de produire un charbon actif de qualité avec un matériaux disponible et moins couteux a orienté les recherches scientifiques vers les déchets lignocellulosiques de palmier dattier considérés comme matière première durable et renouvelable pour produire du charbon actif par une activation physique ou bien chimique.

Le charbon actif obtenu par (Haghbin & Shahrak, 2021) à partir des écorces de palmier dattier par activation chimique et thermique, était de très bonne qualité avec une surface spécifique de 902 m²/g, les tests ont prouvé sa grande capacité pour éliminer plusieurs polluants à savoirs l'arsenic (V), le bleu de méthylène, l'orange de méthyle et la quercétine grâce à sa forte porosité et la présence de groupes fonctionnels acides sur sa surface. Dans une autre étude (Khadhri, et al., 2019) a montré que le charbon produit à partir de pétiole du palmier dattier par activation chimique avait une structure mésoporeuse avec une surface spécifique de 655 m²/g qui lui a permis d'éliminer le carmin d'indigo d'une solution aqueuse avec succès. En parallèle, (Rezma, et al., 2017) a produit du charbon actif à partir des pétioles du palmier dattier par activation physique (photo 12) avec une surface spécifique de 546 m²/g.

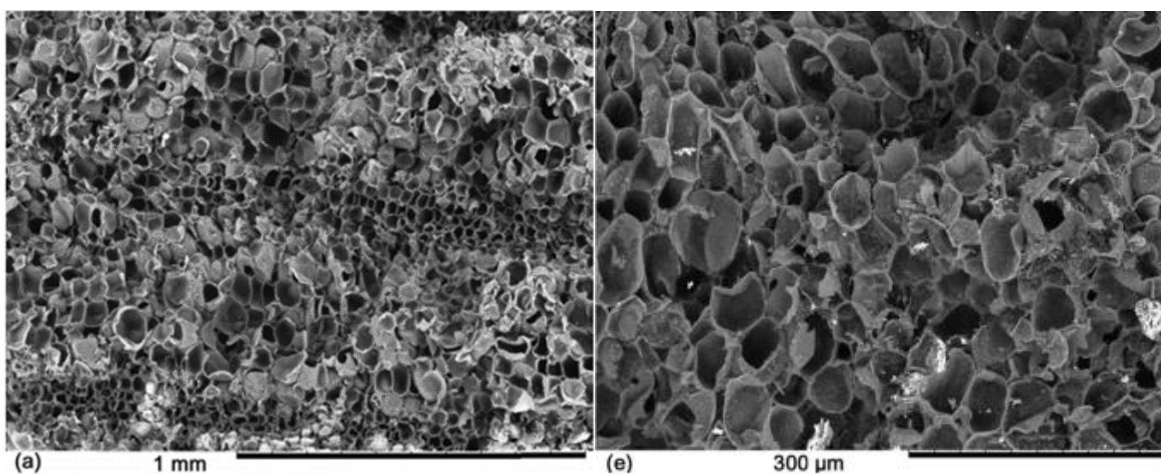


Photo 12 : Image microscopique de la structure de pétiole avant (gauche) et après activation physique à 950°C (droite) (Rezma, et al., 2017)

6.2.5 Utilisation pour isolation et matériau composite :

Les caractéristiques thermiques de la biomasse phoenicicole la classent comme un très bon matériau d'isolation, plusieurs recherches ont été conduites dans ce domaine. (Benmansour, et al., 2014) ont testé la possibilité d'utiliser un nouveau matériau de construction isolant composé principalement de sable, ciment et fibre naturelle du palmier dattier, l'utilisation des fibres de palmier dattier a réduit la conductivité thermique et la résistance à la compression du composite tout en réduisant le poids du matériau.

Une bonne isolation augmente le rendement thermique des capteurs solaires, dans ce contexte vient l'étude de (Nadir, et al., 2019) qui a démontré que l'utilisation d'un mélange de pétiote + gypse comme isolant dans les capteurs solaires augmente leur rendement thermique de 37% comparé à l'utilisation de la fibre de verre. (Asim, et al., 2020) a trouvé de son côté que le renforcement des composites phénoliques par les fibres de palmier dattier améliore leurs propriétés mécaniques et thermiques, à l'exception de la résistance à la traction.

6.2.6 Production d'un compost :

Le co-compostage des déchets de palmier dattier et du fumier de chèvre s'avère être une solution respectueuse de l'environnement et efficace et pour le traitement des déchets de palmier dattier selon l'étude faite par (Abid, et al., 2020), le compost obtenu au cours de l'étude était de bonne qualité et ne présentait aucune phytotoxicité.

La possibilité d'utiliser la luzerne (*Medicago sativa L.*) comme source d'azote au cours du compostage des déchets de palmier dattier a été étudiée par (HABCHI, et al., 2020), les résultats démontrent que l'utilisation d'un taux de 50% de luzerne dans le mélange du compostage donne un compost très proche de la maturité après 90 jours de réaction.

La lutte biologique contre les phytopathogènes du sol avec du compost est actuellement une approche horticole établie. Dans ce contexte une étude de (Ou-Zine, et al., 2020) a évalué l'effet des extraits de compost dans le biocontrôle de bayoud *Fusarium oxysporum f.sp. albedinis* (Foa) et leur mécanisme d'action. Les résultats obtenus au cours de cette étude ont prouvé l'efficacité du compost de déchets de palmier dattier dans la suppression de Foa.

Chapitre 1 : Généralité sur le palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*)

6.2.7 Alimentation de bétail :

L'étude comparative sur la valeur alimentaire des déchets lignocellulosiques du palmier dattier, la paille d'orge et le drinn, réalisé par (Chehema, et al., 2002) a montré que le dromadaire et beaucoup mieux adapté à l'utilisation digestive des parois cellulaires, lignocellulosiques, contrairement aux sucres cytoplasmiques simples, facilement fermentescibles, qui sont mieux utilisés par les ovins.

Les déchets lignocellulosiques du palmier présentent une importante source locale d'éléments nutritifs pour le cheptel, l'investigation et l'étude analytique faites par (Meradi, et al., 2016) ont montré que la valeur nutritive des déchets de palmier dattier permet leur valorisation comme aliment pour tout type de cheptel et toute catégorie d'âge, les analyses ont même montrés que la composition chimique des pédicelles est comparable à celle de la paille.

6.2.8 Production du bioalcohol

L'étude réalisée par (Fang, et al., 2015) a permis de produire du bioéthanol à partir des folioles de palmier dattier en utilisant un prétraitement hydrothermal par de l'eau de mer. Les résultats obtenus ont montré que l'eau de mer pourrait être une alternative prometteuse à l'eau douce dans les bioraffineries utilisant la biomasse lignocellulosique sans affecter le rendement.

Le travail de (Boulal, et al., 2018) a prouvé que les déchets lignocellulosiques du palmier dattier sont utilisable pour la production de bioéthanol de deuxième génération. En utilisant un mélange de palme et pédicelle il était possible de produire un bioéthanol de 75° avec un rendement de 10ml /50gr de substrat.

Selon (Taghizadeh-Alisaraei, et al., 2019), environ 3260 millions de litres d'éthanol peuvent être produits à partir des palmes du palmier dattier à l'échelle mondiale, avec un coût global de 0,34 \$ le litre.

6.2.9 Production de biogaz

Selon l'étude de (Djaafri, et al., 2019), la digestion anaérobie de la foliole sèches de palmier dattier algérien (*Phoenix dactylifera L.*) *Hmira* permet d'obtenir un rendement en méthane de 130 ± 6 ml CH₄/g VS, un résultat satisfaisant mais qui reste loin de la valeur du rendement théorique estimé entre 499 - 538 ml CH₄/g VS.

Chapitre 1 : Généralité sur le palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*)

Une deuxième étude faite par (Djaafri, et al., 2020) a montré que l'utilisation d'un prétraitement alcalin à base de NaOH à 12% avant la digestion de la foliole sèches du palmier dattier algérien (*Phoenix dactylifera L.*) *Hmira* permet d'améliorer le rendement jusqu'à 133,55%.

Pour le travail de (Chandrasekhar, et al., 2020), il a évalué le potentiel biochimique en méthane pour chaque type de biomasse lignocellulosique du palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) ainsi que pour le mélange de ces mêmes déchets, les résultats ont montré que la biomasse lignocellulosique de palmier dattier peut être considérée comme une matière première potentielle pour la production de biogaz, cependant un prétraitement approprié est nécessaire pour mieux exploiter son potentiel.

6.2.10 Production d'énergie par conversion thermique

La caractérisation du profil thermique des principaux constituants de la biomasse phoenicicole du cultivar *Deglet Nour* sous atmosphère oxydante et inerte réalisé par (Bousdira, et al., 2017) montre que le processus de combustion pourrait être une alternative intéressante de récupération d'énergie à partir de la biomasse phoenicicole.

Au cours de l'étude de (Al-Wabel, et al., 2019) du biocharbon et de l'hydrocharbon ont été produits à partir de folioles de palmier dattier par pyrolyse et carbonisation hydrothermale respectivement, les deux produits ont été évalué en tant qu'additif de sol pour voir leur caractéristiques et leur effet toxicologique sur les plantes. Les résultats ont montré que contrairement à l'hydrocharbon qui a inhibé la germination, le biocharbon a amélioré la croissance de la laitue.

Le travail de (Bensidhom, et al., 2021) a démontré le potentiel bioénergétique remarquable des tiges de fruits et des pétioles de palmier dattier en tant que matière première pour le processus de pyrolyse dans un réacteur à lit fixe.

7. Conclusion

Ce chapitre s'est concentré sur le palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*). Son historique, sa nomination, sa morphologie, son cycle de vie, sa distribution, dans le monde, l'Algérie et bien sûr dans les régions du Touat, Gourara et Tidikelt ont été discuté en détail, tout en présentant les

Chapitre 1 : Généralité sur le palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*)

derniers statistiques déterminant le nombre de palmier dattier actuel ainsi que les variétés dominantes pour ces régions.

Chaque année après l'opération de taillage des palmiers dattiers des quantités énormes de déchets sont générés, composés principalement de déchets lignocellulosiques ainsi que les rebuts des dattes et les noyaux au cours de ce chapitre nous avons parlé en détail de ces opérations ainsi que de l'issue réservée à ces déchets traditionnellement. A la fin de ce chapitre, un aperçu sur les nouvelles voies de valorisation ainsi qu'une synthèse des travaux scientifiques sur les techniques de valorisation énergétique et non énergétique.

Parmi les différentes nouvelles voies de valorisation énergétique des déchets lignocellulosiques du palmier dattier, la conversion thermique par gazéification demeure un processus simple qui permet une conversion efficace et rapide des déchets lignocellulosiques du palmier dattier pour obtenir une énergie sous forme de mélange gazeux inflammable avec un potentiel énergétique élevé. Le chapitre suivant traite en détail cette méthode de conversion depuis sa découverte.

|

Chapitre 2 : Etude théorique de la gazéification

1. Introduction

La conversion thermochimique de la biomasse est un procédé alternatif aux énergies fossiles qui permet de produire des produits à haute valeur énergétique, directement utilisables pour produire de la chaleur ou de l'électricité ou comme produits intermédiaires pour la synthèse de carburant liquide ou produits chimiques.

La gazéification est une méthode très efficace pour la production d'énergie à partir des différents types de matières organiques, et l'élimination des déchets verts. Elle permet de convertir un substrat organique en mélange gazeux combustible par une réaction thermochimique à des températures très élevées en présence d'un agent gazeux. Le mélange gazeux obtenu, appelé « Gaz de synthèse » ou tout simplement « *Syngas* », est lui-même un carburant, ce dernier est plus facile à épurer que les carburants solide ou liquide et peut être converti en d'autres carburants et en produits chimiques par différentes méthodes. (Speight, 2020; Kumar & Aarthi, 2020)

2. Historique

La gazéification est presque aussi ancienne que la combustion, elle est considérée comme l'alternative de cette dernière, mais reste moins développée car l'intérêt commercial pour la gazéification n'a pas été aussi fort que celui pour la combustion. La première enquête sur la gazéification a été faite en **1659** par Thomas Shirley (Basu, 2010). Elle fut utilisée pour la première fois en **1792** lorsque l'ingénieur écossais William Murdoch, utilisa le gaz de synthèse du charbon pour l'éclairage domestique (Basu, 2013). En **1798**, William Murdoch utilisa le gaz de charbon pour éclairer le bâtiment principal de la fonderie Soho, puis, en **1804**, l'Allemand Friedrich Winzer breveta l'éclairage au charbon-gaz.

La gazéification est finalement devenue un procédé commercial, en **1812** suite à la fondation de la première usine à gaz, la société *London Gas, Light and Coke* (Higman & Burt, 2008; Stirling, 1950).

Le premier grand développement industriel dans la gazéification a été marqué lorsque les deux frères Siemens ont breveté leur premier gazéificateur combiné au four régénératif en **1861** ; ainsi les gazéificateurs ont été utilisés pour chauffer les fours dans l'industrie du fer (Basu, 2013).

Chapitre 2 : Etude théorique de la gazéification

En Angleterre, entre **1879-1881**, J. E. Dawson, développe un procédé de refroidissement et d'épuration de gaz et prouve que les moteurs à gaz pouvaient être alimentés par un gazéificateur. (Rambush, 1923)

La plupart des gazéificateurs décrit et utilisés à cette époque étaient du type contre-courant (up draft) c'est-à-dire que le combustible est introduit par le haut tandis que l'agent de gazéification est lui introduit par le bas et le gaz produit est fortement chargé en goudron. En **1843** en Suède, ou Gustaf Ekman décrit un gazéificateur à co-courant (down draft) ou le combustible et l'agent de gazéification s'écoulent dans le même sens, de haut en bas avec la production d'un gaz à faible teneur en goudrons.

En **1920** la technologie de gazéification était assez métrisée et développée pour pouvoir utiliser de nouveaux combustibles celluloses à la place du charbon et du coke. Georges Imbert réalise le gazéificateur à bois, une année après, 60 véhicules équipée d'un gazéificateur circulaient en Angleterre (Ojolo, et al., 2012; Deparis, et al., 2010)

En **1923**, les deux chimistes allemands, *Fischer* et *Tropsch* parviennent à breveter le premier procédé qui permet de liquéfier le gaz synthétique produit à partir du charbon : le procédé ***Fischer-Tropsch***. Durant la seconde guerre mondiale le procédé ***Fischer-Tropsch*** a permis à l'Allemagne de synthétiser du pétrole à partir de charbon-gaz pour alimenter son énorme machine de guerre après le bombardement de ses raffineries et routes d'approvisionnement en pétrole. (Basu, 2013)

Entre **1940** et **1975**, la gazéification a connue deux domaines d'application en tant que carburants synthétiques : les moteurs à combustion interne et la synthèse chimique d'huile et autres produits chimique.

Après la guerre **israélo-arabe** ou **guerre d'Octobre** en **1973**, qui a déclenché l'embargo pétrolier, les membres de l'Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole (OPEP) ont interdit les exportations de pétrole vers les États-Unis et d'autres pays occidentaux, qui dépendaient à l'époque fortement du pétrole du Moyen-Orient. Un acte qui a choqué l'économie occidentale mais a donné un grand coup de pouce au développement de technologies alternatives comme la gazéification afin de réduire la dépendance à l'égard du pétrole importé. (Basu, 2013)

Chapitre 2 : Etude théorique de la gazéification

De nos jours, la gazéification, principalement du bois et la biomasse lignocellulosique en général, fait partie des énergies renouvelables prometteuse car elle ne rajoute pas de CO₂ dans l'atmosphère et la matière première est abondante, renouvelable et moins couteuse.

De nos jours, la gazéification, particulièrement de la biomasse, a regagné de l'intérêt depuis la fin du 20^{ème} et le début du 21^{ème} siècle avec la prise de conscience des problèmes énergétiques et du changement climatique vu sa capacité à réduire considérablement les émissions de gaz à effet de serre (GES) par rapport aux systèmes à combustibles fossiles, une stratégie d'atténuation du climat récemment approuvée par le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC). La gazéification constitue également une solution pour diminuer les coûts d'élimination des déchets solides tout en compensant l'utilisation de combustibles fossiles et les coûts énergétiques. (Broer & Peterson, 2019; Pommeret, et al., 2017; Farzad, et al., 2016)

3. Processus de la gazéification

La gazéification de la biomasse est une réaction chimique induite par la chaleur dans laquelle la fraction organique est oxydée à haute température en présence d'un agent de gazéification (ex : oxygène pur, air, CO₂, H₂O / vapeur) pour produire un combustible gazeux appelé gaz de synthèse, composé principalement de H₂, CH₄, CO, CO₂, la figure 8 montre un schéma simplifié du mécanisme réactionnel de la gazéification d'une biomasse. (Yang, et al., 2021)

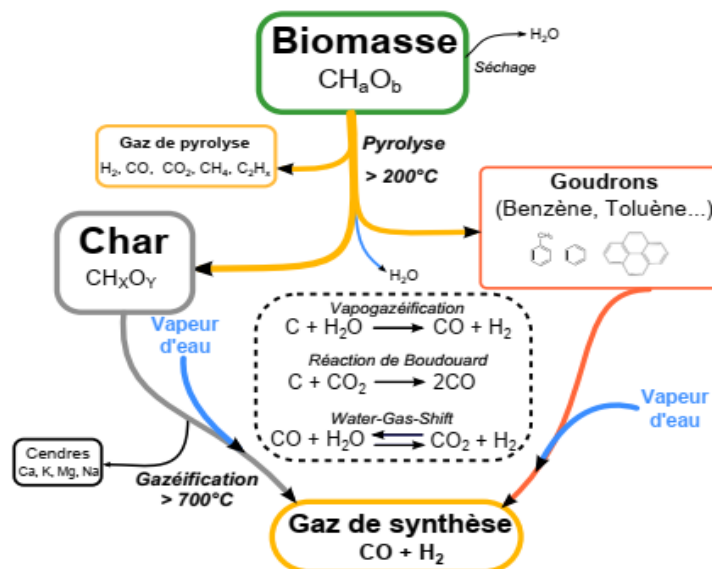


Figure 8 : Schéma simplifié du mécanisme réactionnel de la gazéification de la biomasse. (Morin, 2017)

Chapitre 2 : Etude théorique de la gazéification

Cette transformation se déroule en plusieurs étapes simultanément ou successivement en fonction de la technologie et des conditions opératoires.

Généralement quatre principales étapes successives et fortement couplées entre en jeu pendant la gazéification de la biomasse, à savoir le séchage (étape endothermique), la pyrolyse (étape endothermique), l'oxydation ou combustion (étape exothermique) et la réduction ou gazéification (étape endothermique) une autre étape peut intervenir selon le procédé utilisé c'est le craquage et reformage des goudrons. (Molino, et al., 2018; Teixeira, 2012; Speight, 2020)

3.1. Séchage

Le séchage est la première phase dans un traitement thermique. Au cours de cette étape endothermique, l'humidité présente dans la biomasse est évacuée par évaporation sous une température supérieur à 100°C.

La vapeur d'eau produite joue un rôle important car elle constitue un réactif pour les étapes ultérieures de reformage des gaz et de gazéification du char (Morin, 2017). Une biomasse à haute teneur d'humidité et/ou une mauvaise gestion de l'humidité à l'intérieur sont l'une des raisons les plus courantes de l'échec de la production de gaz de synthèse propre. (Speight, 2020)

3.2. Pyrolyse

La phase suivante est la pyrolyse, appelée aussi *carbonisation* lorsque le but est la production du charbon de bois ou *dévolatilisation* lorsqu'elle est considérée comme première étape de la combustion. Au cours de cette phase, la biomasse subit une décomposition sous l'effet de la chaleur qui dépasse les 300°C, en absence d'air pour obtenir des matières volatiles incondensables (CO, CO₂, H₂, CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆), des matières volatiles condensables (goudron, vapeur d'eau) et un résidu poreux carboné appelé le char (ou charbon du bois) (Speight, 2020; Rehm, 2013; Bellouard, 2017). La dégradation de la biomasse se déroule en trois étapes distinguées par des intervalles de température comme le montre la figure 9 une pyrolyse primaire, une conversion secondaire et une conversion tertiaire.

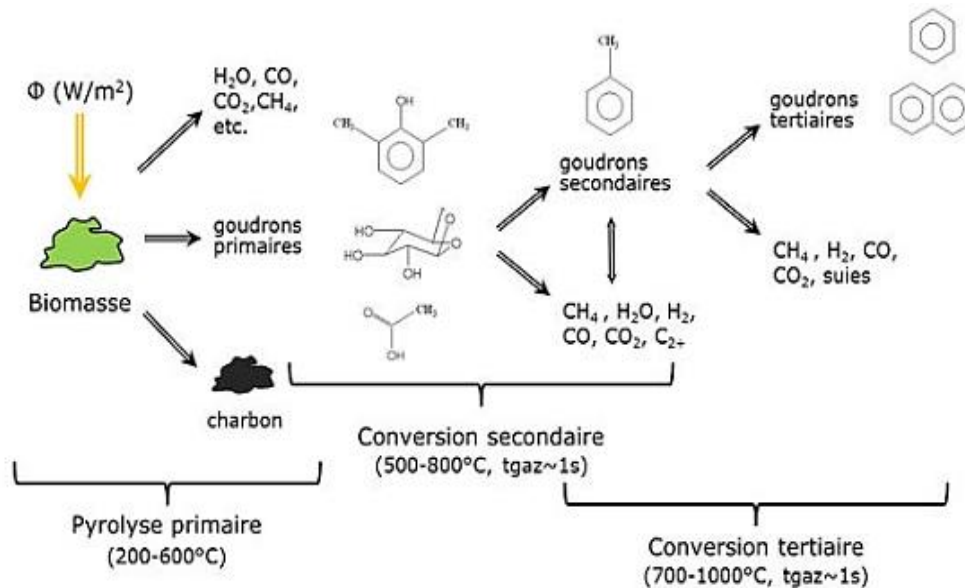


Figure 9 : Les différentes phases de pyrolyse de la biomasse (Christodoulou, 2013)

3.3. Oxydation ou la combustion

L'oxydation est le seul processus exothermique dans le procédé de gazéification. Grâce à un apport d'air (ou d'oxygène), Le char et les matières volatiles matière volatile produit lors de la pyrolyse vont s'oxyder, ce qui permet d'atteindre des températures très élevées générant ainsi l'énergie nécessaire pour la phase suivante. (Speight, 2020; Rehmet, 2013; Morin, 2017)

3.4. Craquage et reformage des goudrons

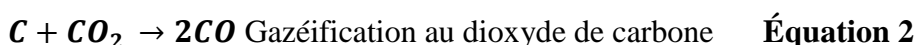
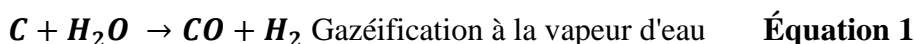
L'élimination du goudron est importante pour assurer une combustion correcte du gaz, et éviter les problèmes liés à la valorisation du gaz de synthèse (encrassement, corrosion, empoisonnement des Catalyseurs...etc).

Le craquage est un procédé thermique qui permet de fractionner les molécules lourde (goudron) afin d'obtenir des molécules plus légères. Lorsqu'il se déroule en phase gazeuse et à des températures élevées ($>1200^{\circ}\text{C}$), on parle de craquage homogène. Lorsqu'il est réalisé au contact d'un solide (catalyseur ou char) à des températures plus faibles ($700-1000^{\circ}\text{C}$) on parle alors de craquage hétérogène.

Un autre processus qui permet de convertir les goudrons c'est le reformage. Ce procédé assure la conversion des goudrons en CO et de l' H_2 sous l'effet de la température ($>1000^{\circ}\text{C}$) en présence de vapeur d'eau pour former du (Speight, 2020; Teixeira, 2012)

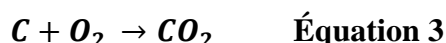
3.5. Réduction

Au cours de la phase de réduction, la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone réagissent avec le carbone du char à des températures élevées (800 °C et 1200° C), pour former du syngas. En l'absence d'oxygène seulement deux réactions endothermiques sont prises en compte, la première réduit le dioxyde de carbone par le carbone et produit deux molécules de monoxyde de carbone, la deuxième réduit l'eau par le carbone et produit de l'hydrogène et du monoxyde de carbone :

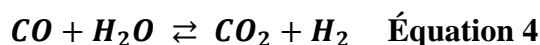


(Réaction de Boudouard)

Une autre réaction doit être prise en compte, car elle permet d'apporter de l'énergie pour le déroulement du procédé, c'est celle de l'oxygène résiduel avec le carbone :



D'autres réactions ont lieu en phase homogène et influent sur la composition finale du gaz de synthèse, tel que la réaction gaz-eau (*Water-Gas-Shift reaction*) :



(Speight, 2020; Morin, 2017; Tagutchou, 2008; Teixeira, 2012)

Au cours des différentes phases du procédé de gazéification plusieurs réactions entrent en jeu. Le tableau 4 montre les principales réactions impliquées dans la gazéification de biomasse :

Tableau 4 : Principales réactions de la gazéification (Situmorang, et al., 2020; Kumar, et al., 2014)

	Réaction	Type de réaction
1.	$CH_xO_yN_zS_s \rightarrow aCO + bCO_2 + cCH_4 + dH_2 + eNH_3 + fH_2S + gH_2O + h \text{ tar}$	Décomposition de la biomasse
2.	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$	Réaction au carbone (<i>Boudouard</i>)
3.	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	Réaction au carbone (<i>Reformage primaire à la vapeur</i>)
4.	$C + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	Réaction au carbone (<i>Reformage secondaire à la vapeur</i>)
5.	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$	Hydrogazéification
6.	$C + 0.5O_2 \rightarrow CO$	Réactions d'oxydation
7.	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	
8.	$C + 0.5O_2 \rightarrow CO_2$	
9.	$CH_4 + 2O_2 \leftrightarrow CO_2 + H_2O$	
10.	$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O$	

11.	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	Réaction de décalage (<i>Shift reaction</i>)
12.	$2CO + H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2$	Réaction de Méthanisation
13.	$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$	
14.	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$	Réactions à la vapeur
15.	$CH_4 + 0.5O_2 \rightarrow CO + 2H_2$	

4. Technologies de gazéification

Les technologies de gazéification peuvent être classées selon trois principaux critères à savoir : la production de la chaleur, le nature de l'agent de gazéification, le processus de transport.

4.1. Production de la chaleur

Selon cette classification on distingue, les gazéificateurs autothermique ou directe, dans lesquels les processus de production de chaleur et de consommation de chaleur ne sont pas séparés et la chaleur nécessaire de réaction est fournie grâce à la combustion d'une partie de biomasse à l'intérieur du gazéificateur, ce qui augmente la température et fournit la chaleur nécessaire aux réactions de gazéification endothermique.

Ce procédé a l'avantage d'être simple et facile à faire fonctionner dans des conditions sous pression et permet de chauffer directement les réactifs ce qui permet une utilisation plus efficace de l'énergie.

En parallèle nous avons les gazéificateurs allothermique ou indirecte, dans lesquels la biomasse non gazéifiée est brûlée dans une chambre séparée et des tubes d'échangeur de chaleur conduisent la chaleur de la chambre de combustion à la chambre de gazéification. Ce type de gazéificateur assure la conversion complète du carbone sans production de déchets problématiques, et produit généralement deux flux de gaz : un gaz calorifique moyen avec peu ou pas d'azote et un gaz de combustion. (Rauch, et al., 2014; Kumar, et al., 2009)

Une comparaison entre les deux types d'alimentation en chaleur dans les procédés de gazéification est illustrée dans le tableau 5

Chapitre 2 : Etude théorique de la gazéification

Tableau 5 : Type d'alimentation en chaleur par gazéification (Gräbner, 2015)

	Autothermique	Allothermique
Fourniture de chaleur	Interne, réaction d'oxydation	Externe, source de chaleur
Agent gazéifiant	O ₂ /air et H ₂ O	H ₂ O et/ou CO ₂
Température	800–1800 °C	750–950 °C
Gaz produit	CO, H ₂ , CO ₂ , CH ₄	CO, riche en H ₂
Pression	1–100 bars	1–40 bars
Résidu	Cendres ou scories	Cendres

4.2.Type de l'agent de gazéification

Selon cette classification nous avons la gazéification à l'air, l'oxygène, la vapeur d'eau, et avec mixture ; la nature de l'agent de gazéification influe sur les caractéristiques du gaz produit. Pour une gazéification avec l'air comme agent on obtient un gaz avec un pouvoir calorifique compris entre 4 et 7 MJ / m³, tandis que l'utilisation d'oxygène pur ou de vapeur comme oxydant permet de produire un gaz avec des valeurs calorifiques nettement plus élevées de l'ordre de 10 –18 MJ / m³. (Pommeret, et al., 2017; Rauch, et al., 2014)

Le tableau 6 montre les différents avantages et défis techniques des différents agents de gazéification.

Tableau 6 : Avantages et défis techniques des différents agents de gazéification (Richardson, et al., 2015; Olwa, 2011)

Agents gazéifiant	Principaux avantages	Principaux défis techniques
Air	Fournit une combustion partielle pour l'alimentation en chaleur de la gazéification Donne des teneurs modérées en charbon et en goudron	Fournit un faible pouvoir calorifique (3-6MJ / Nm ³) avec une grande quantité de N ₂ dans le gaz de synthèse Détermination difficile de l'ER (généralement 0,2-0,4)
Vapeur	Donne un gaz de synthèse à haut pouvoir calorifique (10-15 MJ / Nm ³) Donne un gaz de synthèse riche en H ₂	Nécessite un apport de chaleur indirect ou externe pour la gazéification Donne une teneur élevée en goudron dans le gaz de synthèse Nécessite un reformage catalytique du goudron
Dioxyde de carbone	Donne un gaz de synthèse à haut pouvoir calorifique Donne des teneurs élevées en H ₂ et CO et faible teneur en CO ₂ dans le gaz de synthèse	Nécessite un apport de chaleur indirect ou externe pour la gazéification Nécessite un reformage catalytique du goudron

4.3 Processus de transport

Cette classification est la plus utilisée, elle englobe trois gazéificateurs de base, à savoir les gazéificateurs à lit fixe, les gazéificateurs à lit fluidisé et les gazéificateurs à écoulement entraîné. (Rauch, et al., 2014; Basu, 2013).

4.3.1 Gazéificateurs à lit fixe

C'est la conception de gazéification la plus ancienne et la plus réussie à ce jour, développée historiquement pour des applications à plus petite échelle, elle est généralement simple et robuste. Le nom peut être un peu trompeur ; car ce qui est effectivement "fixe" c'est la hauteur du lit et non pas la position d'une particule de charge individuelle. Le combustible biomasse forme un lit dense au sein du réacteur et se déplace verticalement, traversant ainsi des zones consécutives de séchage, de pyrolyse, de gazéification et de combustion. (Broer & Peterson, 2019; Speight, 2020)

Les gazéificateurs à lit fixe sont sensibles à la taille et à la consistance des particules de carburant entrantes ; aussi, ils génèrent un taux élevé de cendres vu les températures élevées atteintes dans les zones de combustion, ce qui influe sur leur fiabilité (Broer & Peterson, 2019) comme on peut voir sur la figure 10, trois conceptions de réacteurs à lit fixe existent : le gazéificateur à contre-courant, à co-courant et à courant croisé.

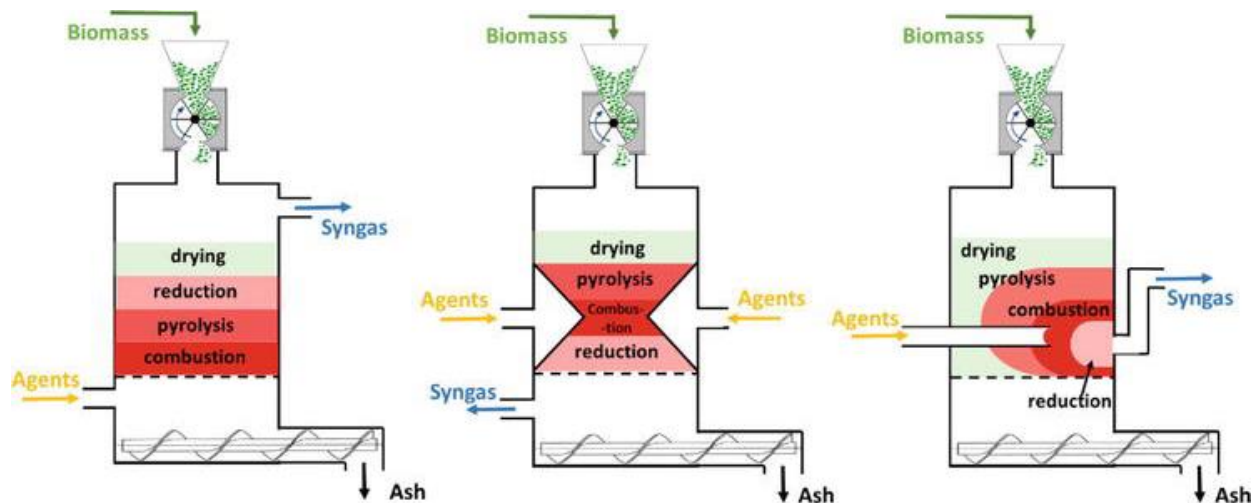


Figure 10 : Différents modèles de gazéificateurs à lit fixe, y compris les zones de réaction caractéristiques de chaque modèle (Thanh Phong & Nguyen, 2020)

a. Gazéificateur à contre-courant (*up draft*)

Le gazéificateur à contre-courant est le premier et le plus simple gazéificateur utilisé. Comme le montre la figure 1, la biomasse est alimentée par la partie haute vers le bas et le milieu

Chapitre 2 : Etude théorique de la gazéification

de gazéification est alimenté par le bas vers le haut. Le charbon non brûlé et les cendres sont collectés au bas de l'équipement.

La température est la plus élevée près de la grille, où l'agent de gazéification rencontre le combustible et le brûle. Le gaz chaud se déplace vers le haut, fournissant de la chaleur aux réactions de gazéification endothermique et rencontre la biomasse pyrolysée à basse température (200-500 °C). Le gaz produit par ce type de gazéificateur sort à des températures relativement basses (80–100 °C), chargé de grandes quantités de goudrons (10 à 20% p/p), ce qui peut boucher le tuyau de sortie. Pour cette raison le gaz produit dans les gazéificateurs à contre-courant est directement dirigé vers un four ou une chaudière afin de produire de la vapeur ou de l'eau chaude (Basu, 2013; Broer & Peterson, 2019; Basu, 2010; Thanh Phong & Nguyen, 2020).

b. Gazéificateur à co-courant (down draft)

La gazéification à lit fixe co-courant est un procédé relativement simple et peu coûteux, Le combustible est introduit par la partie haute du gazéificateur et s'écoule vers le bas. Il est séché et pyrolysé avant d'être partiellement brûlé par le milieu de gazéification entrant au niveau des buses. Le gaz produit par ce type de gazéificateur sort à des températures généralement élevées (~700 °C).

Le gazéificateur à co-courant consomme jusqu'à 99,9% p/p du goudron formé, un cyclone n'est pas vraiment nécessaire dans ce type de procédé vu que les matières premières minérales restent avec le charbon / les cendres, cependant il reste plus sensible à la qualité de la biomasse traitée. (Speight, 2020; Chopra & Jain, 2007; Basu, 2013)

c. Gazéificateur à courant croisé (Cross draft)

Dans le gazéificateur à courant croisé, le combustible se déplace de haut vers le bas, l'agent de gazéification est introduit d'un côté du réacteur et le gaz produit sort du côté opposé au même niveau, pour les cendres, elles sont retirées du fond du réacteur.

Contrairement aux deux gazéificateurs précédents, les gazéificateurs à courant croisé possèdent un bac à cendres séparé de la zone de feu et de réduction ce qui limite le ce gazéificateur aux combustibles à faible teneur en matières minérales tel que le bois, le charbon de bois et le coke. (Speight, 2020; Chopra & Jain, 2007; Thanh Phong & Nguyen, 2020)

Chapitre 2 : Etude théorique de la gazéification

Le gaz produit est chargé de goudron avec une température très élevée (800-900 °C), il est généralement utilisé dans les chaudières monobloc. (Nouh, 2016)

4.3.2 Gazéificateurs à lit fluidisé

Dans un gazéificateur à lit fluidisé, le substrat est alimenté par le côté ou par le haut du réacteur et passe par un lit de matériaux inertes (sable, alumine, olivine calcinée, dolomite...etc.) qui sert de caloporteur et de mélangeur (Bellouard, 2017; Erakhrumen, 2012). Les particules de biomasse sont chauffées à la température du lit et subissent un séchage et une pyrolyse rapides, produisant du charbon et des gaz, et qui se décomposent à leur tour en gaz non condensables après contact avec des solides chauds. L'agent de gazéification alimenté par le bas, agit comme gaz de fluidisation.

Une petite taille des particules (< 6 mm) favorise leur fluidisation dans le réacteur. Généralement ce type de gazéification fonctionnent entre 800 et 1000 °C ce qui permet de convertir 90 à 95% du carbone et décomposer la plupart des goudrons, huiles, phénols et autres sous-produits liquides. (Speight, 2020; Broer & Peterson, 2019; Farzad, et al., 2016) Contrairement au gazéificateur à lit fixe, ce type à l'avantage d'assurer une distribution uniforme de la température dans la zone de gazéification. (Panwar & Richa Kothari, 2012)

Ce type de gazéificateur est largement utilisé depuis plusieurs années pour la gazéification du charbon. Actuellement cette technologie demeure des plus prometteuses dans le domaine de gazéification de la biomasse vu son pouvoir de convertir une très large gamme de substrat, sa capacité élevée de mélange, son taux élevés de transfert de chaleur et d'une masse, ainsi que, la possibilité d'utiliser des catalyseurs dans le cadre du lit. (Farzad, et al., 2016)

Comme le montre la figure 11, On distingue trois types de gazéificateur à lit fluidisé :

le gazéificateur à lit fluidisé dense, le gazéificateur à lit fluidisé circulant et le gazéificateur à lit fluidisé double.

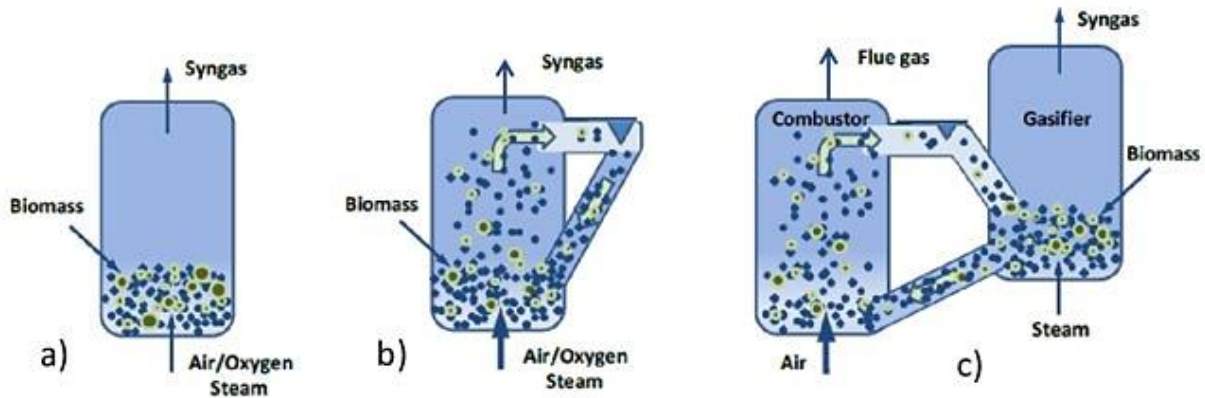


Figure 11 : Schéma de principe des différents types de gazéificateurs à lit fluidisé. a) lit fluidisé dense ; b) Lit fluidisé à recirculation ; c) Lit fluidisé double (Bellouard, 2017)

a. *Gazéificateur à lit fluidisé dense ou "Bubbling Fluidised Bed"*

Dans ce type de gazéificateur, la vitesse de fluidisation est relativement faible (1-2 m/s) pour permettre le brassage des particules et par la suite un bon transfert thermique, et massique et la séparation nette des phases solide (lit) et gazeuse sans entraînement des particules inertes hors du lit. (Kple, 2015; Teixeira, 2012).

Parmi les inconvénients majeurs des gazéificateurs à lit fluidisé dense c'est la diffusion lente de l'oxygène des bulles vers la phase d'émulsion, ce qui diminue l'efficacité de la gazéification. (Basu, 2013)

b. *Gazéificateur à lit fluidisé circulant ou "Circulating Fluidized Bed"*

Dans ce deuxième type, la vitesse de fluidisation est plus élevée que le précédent et varie entre 4 et 6 m.s⁻¹ par conséquent, une partie des particules du lit est entraînée hors du réacteur (Kple, 2015; Tagutchou, 2008)

Comparé au procédé à lit fluidisé dense, le procédé à lit fluidisé circulant dispose d'une plus grande tolérance vis-à-vis du combustible.

Le combustible circule entre la zone de réaction et le cyclone qui permet de séparer la phase solide, puis la réinjectée dans la zone de réaction ce qui permet de la maintenir en mouvement dans le réacteur. (Rehmet, 2013; Kple, 2015; Speight, 2020)

Chapitre 2 : Etude théorique de la gazéification

c. *Gazéificateur à lit fluidisé double " Dual fluidized bed"*

Pour le procédé de gazéification à lit fluidisé double, le réacteur est séparé en deux parties, une chambre de combustion qui permet la combustion de la biomasse en présence de l'air, les hautes températures qui en résultent sont acheminées vers la chambre de gazéification, via les produits ou du sable, pour la gazéification à la vapeur d'eau. Cette configuration permet d'éviter la dilution du gaz de synthèse par l'azote. (Rehmet, 2013)

Comme pour les autres procédés, le gaz de synthèse produit peut être utilisé pour générer de la chaleur et l'électricité, mais il peut également être appliqué dans différentes synthèses tels que la production de carburant liquide par le procédé **Fischer-Tropsch** ou des produits chimiques tels que des alcools mixtes. (Mauerhofer, et al., 2019)

4.3.3 Gazéificateurs à lit entraîné

Ces gazéificateurs sont très efficaces pour les procédés à grande échelle, avec des températures et pressions très élevées (1300 à 1500 °C) (20 à 70 bars), et une biomasse préalablement traitée (torréfié et finement broyée (<75 µm)) (Farzad, et al., 2016; Basu, 2010)

Dans le gazéificateur à lit entraîné, le combustible (solide, liquide ou en suspension) est gazéifié avec un agent de gazéification (souvent l'oxygène, beaucoup moins fréquent l'air) injectés à co-courant. Les températures et pressions élevées imposent un débit plus élevé, et un rendement thermique inférieur, en parallèle le gaz produit est propre et dépourvu de goudron et méthane qui peut être valoriser en carburant liquide par le procédé Fischer-Tropsch ; cependant, les besoins en oxygène sont plus élevés comparé aux autres types de gazéificateurs. (Farzad, et al., 2016; Speight, 2020; Morin, 2017)

Chapitre 2 : Etude théorique de la gazéification

Selon le lieu d'injection du combustible on distingue deux types de gazéificateurs à lit entraîné (figure 12) : le gazéificateur à alimentation par le haut et le gazéificateur à alimentation latérale.

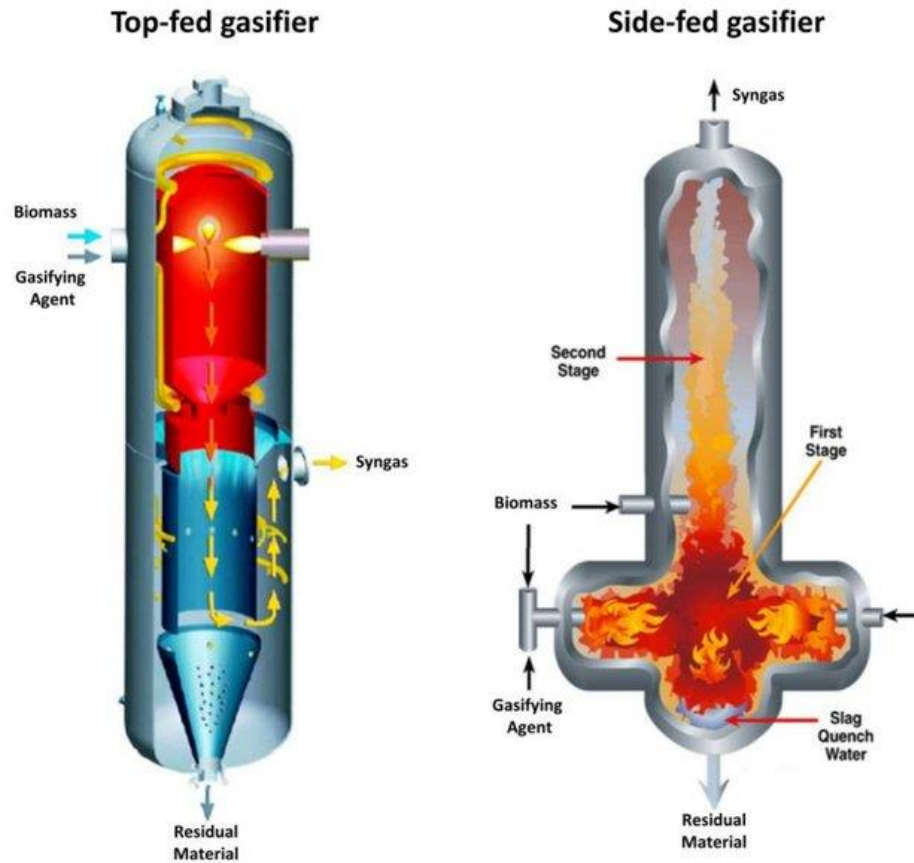


Figure 12 Gazéificateur à lit entraîné : à alimentation par le haut (gauche) à alimentation latérale (droite) (Molino, et al., 2018)

a. Gazéificateur à alimentation par le haut "Top-Fed Gasifier"

Ces gazéificateurs sont des réacteurs à cylindre verticale, dans laquelle l'agent de gazéification et le combustible pulvérisé sont injectés sous forme d'un jet par le haut.

Le gaz de synthèse est prélevé sur le côté de la section inférieure tandis que le laitier est extrait du fond du réacteur.

Ce type de conception présente de nombreux avantages, à noter : sa construction axisymétrique permet de réduire les coûts d'équipement, nombre de brûleurs à contrôler réduit. (Basu, 2010; Molino, et al., 2018)

Chapitre 2 : Etude théorique de la gazéification

b. Gazéificateur à alimentation latérale "Side-Fed Gasifier "

Le combustible pulvérisée et l'agent de gazéification sont injectés par des buses horizontales placées dans la section inférieure du réacteur. Le gaz de synthèse est extrait du haut.

Le taux élevé de l'oxygène dans la zone de mélange engendre des réactions exothermiques rapides, qui augmentent la température au-dessus du point de fusion des cendres ($> 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$), et par conséquent, les cendre sont séparées dans cette zone sous forme de laitier du combustible, et drainées. (Molino, et al., 2018; Basu, 2010)

4.4 Autres technologies de gazéification

Plusieurs nouvelles techniques gazéification existent actuellement tel que la gazéification étagée, la gazéification d'eau supercritique (Super Critical Water Gasification), la gazéification plasma

4.4.1 Gazéificateur de sel fondu (gazéificateur de métal fondu)

Ce type de gazéificateur utilise un milieu fondu d'un sel inorganique (ou métal fondu) pour générer la chaleur nécessaire au procédé de gazéification, c'est-à-dire au lieu d'utiliser une chambre de gazéification, les combustibles sont gazéifiés dans un bain fondu de sel ou de métal. Ce type de conception offre un traitement plus complet du biocombustible et permet de traiter efficacement plus grande variété de combustible dans le même gazéificateur.

Pour maintenir le bain fondu des températures très élevées sont nécessaire ($\geq 900^{\circ}\text{C}$ selon la nature de la masse fondu). Un tel niveau de température engendre des vitesses et des débits de réaction élevés avec de faibles temps de séjour d'un côté, d'un autre côté la production de goudron et des produits pétroliers volatils est minime voir absente. (Speight, 2020; Speight, 2015; Yosim, 1981)

4.4.2 Gazéification d'eau supercritique (SCWG)

L'eau est qualifiée de supercritique au-dessus de son point critique ($T = 374,12\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $P = 221,2$ bars) lorsque les phases liquide et gazeuse n'existent pas séparément.

Cette particularité a été explorée pour la première fois dans les années 1970, comme milieu réactionnel utile pour le raffinage hydrothermique de composés organiques en produits gazeux. (Farzad, et al., 2016; Basu, 2010; Heidenreich, et al., 2016)

Chapitre 2 : Etude théorique de la gazéification

L'utilisation d'eau supercritique pour la gazéification de la biomasse et la production de H₂ et / ou de CH₄ est considéré comme une méthode très prometteuse qui gagne de plus en plus d'intérêt, car c'est une technologie sûre, non toxique, facilement disponible, peu coûteuse et sans danger pour l'environnement, en plus il s'applique à la biomasse solide, à la biomasse humide et même la biomasse liquide telle que l'eau du moulin à huile (Pinkard, et al., 2019; Farzad, et al., 2016)

Le procédé de gazéification d'eau supercritique tire parti de la grande quantité d'eau contenue dans les biomasses et utilise les propriétés changeantes de l'eau dans la région supercritique agissant comme solvant et catalyseur pendant la gazéification et également comme réactif dans les réactions d'hydrolyse. (Ciuta, et al., 2018; Bhaskar, et al., 2011)

Dans des conditions supercritiques, les composés organiques et l'oxygène deviennent totalement miscibles dans l'eau, permettant à l'oxydation de se produire en une seule phase fluide avec d'excellentes propriétés de transport. (Pinkard, et al., 2019)

La gazéification d'eau supercritique produit des rendements de gaz élevés et une plus faible quantité de matériau goudronneux et de charbon. Bien que ces derniers agissent comme un sécheur pour assurer une gazéification complète, ils entraînent une réduction de l'efficacité énergétique du processus. L'inconvénient majeur de cette technologie reste l'apport d'énergie nécessaire pour chauffer l'eau dans les matières premières très humides. (Ciuta, et al., 2018; Pinkard, et al., 2019; Bhaskar, et al., 2011)

4.4.3 Gazéification plasma (gazéification à l'arc plasma)

Le plasma est un gaz hautement ionisé à température très élevée, formé en passant une décharge électrique à travers un gaz comme l'air ou l'oxygène (O₂), l'interaction de ce dernier avec l'arc électrique le dissocie en électrons et ions, ce qui provoque une augmentation significative de la température qui peut dépasser 6000°C (Speight, 2015).

La gazéification plasma est une méthode relativement nouvelle de gazéification, qui utilise le plasma pour convertir la biomasse en gaz de synthèse, elle a été introduite pour la première fois en **1973** par le Dr Camacho. Le réacteur est chauffé par une torche plasma situé près du fond.

La biomasse est chargée dans le réacteur à la pression atmosphérique. Un souffle d'air surchauffé, qui peut être enrichi en oxygène, est fourni au fond du gazéificateur, à la quantité

Chapitre 2 : Etude théorique de la gazéification

stœchiométrique requise pour la gazéification. (Speight, 2020; Speight, 2015; Bhui & Vairakannu, 2018)

La gazéification plasma s'applique à la biomasse humide quelle que soit sa structure et la taille des particules, et son utilisation est envisagée pour plein d'autre déchets comme les déchets solides municipaux et les déchets dangereux, grâce aux températures extrêmement élevées de ce procédé. (Farzad, et al., 2016; Speight, 2015)

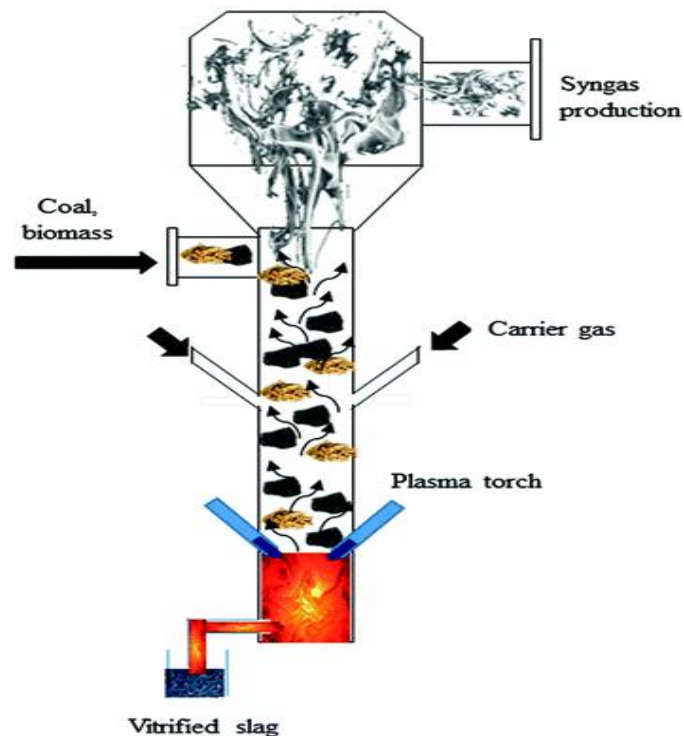


Figure 13 : Système de gazéification plasma (Bhui & Vairakannu, 2018)

Plusieurs méthodes de génération plasma existent à savoir : les décharges électriques DC/ AC ou des arcs transitoires (lampes, disjoncteurs ou arcs pulsés), des décharges RF et micro-ondes.

La majorité des procédés plasma thermique développés à ce jour ont utilisé des générateurs de plasma DC vue la stabilité des arcs générés, cependant ce système nécessite une électronique et des contrôles coûteux et le panache de plasma est très étroit.

Les systèmes de plasma DC : ce système fournit une densité d'énergie élevée avec une zone de haute température entre deux électrodes. En présence d'un débit gazeux suffisamment élevé, le plasma s'étend au-delà de l'une des électrodes sous la forme d'un jet de plasma.

Chapitre 2 : Etude théorique de la gazéification

Comme le montre la figure 14, le système de plasma DC peut être divisés en deux techniques, une torche plasma non transférée (*Nontransferred torch*) ou torche plasma indirecte et une torche à arc transférée (*Transferred torch*) ou troche plasma directe. (Speight, 2015; Tang, et al., 2013)

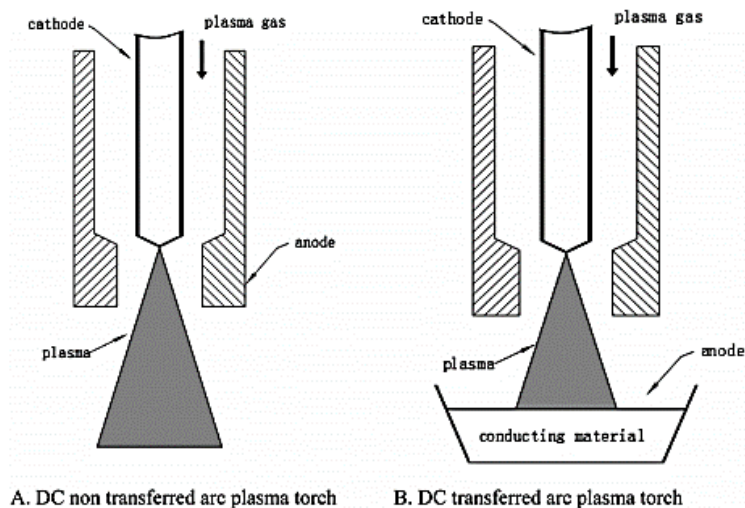


Figure 14 : Les systèmes de plasma DC à torche transférée et non transférée (Tang, et al., 2013)

La gazéification plasma offre plusieurs avantages à savoir, un gaz de synthèse sans goudron, une grande variété de substrat, une conversion élevée du carbone, réduction jusqu'à 90% (v/v%) des substrats. Cependant, le coût d'investissement élevé et la température de procédé très haute de cette méthode qui reste nouvelle et pas bien développée, restent des inconvénients majeurs. (Bhui & Vairakannu, 2018)

5. Co-gazéification

La co-gazéification est la gazéification d'un mélange de combustible, cette technique est utilisée depuis des années pour convertir les solides et liquides organiques en combustibles solides gazeux et liquides propres ce qui contribue à la réduction les émissions de gaz à effet de serre (GES) par la suite protège l'environnement.

Ces dernières années, la co-gazéification de la biomasse et du charbon a gagné de l'intérêt auprès des chercheurs, car elle permet de gérer les grandes quantités de déchets agricoles et ligneux combustibles issus des différentes industries. D'un autre côté, le coût d'adaptation des centrales déjà existante est nettement inférieur à celui de construction de nouveaux systèmes dédiés uniquement à la biomasse. (Farzad, et al., 2016; Speight, 2020)

Chapitre 2 : Etude théorique de la gazéification

Le tableau 7 montre quelques exemples de co-gazéification réalisés pour différents déchets

Tableau 7 : Quelques études de co-gazéification réalisés pour différents déchets (Yang, et al., 2021)

Substrat	Température de gazéification	Valeur énergétique du gaz de synthèse
Fumier de porc et copeaux de bois	530-700°C	14MJ
Boues d'épuration et biomasse ligneuse	550-850°C	5.5MJ
Lignite et polyéthylène	850°C	19MJ
Coquille de palmiste et polyéthylène	650-800°C	46MJ
Charbon et switchgrass	700°C	18MJ
Charbon bitumineux et sciure de pin	500-800°C	11.4MJ
Coquille de noix de coco et polyéthylène haute densité	600-800°C	13.4MJ
Boues d'épuration et résidus d'hydrolyse	600-800°C	6.8MJ
Hydrochar de banane et charbon anthracite	850°C	10.1MJ
Paille de riz sous pression de gaz et charbon	950°C	23.8MJ

Cependant, pour une gazéification optimale un séchage plus une réduction et uniformisation de taille est requis, sans oublier les prétraitements (torréfaction) qui demeurent une étape importante avant la co-gazéification. (Speight, 2020)

6. Paramètres affectant la gazéification

Plusieurs paramètres clé influent sur le processus et affectent la composition des produits finaux. Selon (Kumar, et al., 2014) on peut classer ces paramètres en deux catégories : les propriétés de la biomasse, et les variables de fonctionnement.

6.1 Propriétés de la biomasse

Les caractéristique physique et chimique de la biomasse affectent la conversion thermique. Ces caractéristiques varient selon le type de biomasse, ce qui influent directement sur la performance processus de gazéification. Les principales propriétés pertinentes pour la gazéification sont :

6.1.1 Taille et forme des particules

La taille de la biomasse joue un rôle important dans la gazéification, une petite taille signifie une plus grande surface de transferts de chaleur et de masse, et par conséquent une libération plus rapide des substances volatiles de la biomasse.

La sphéricité est utilisée pour décrire la forme des particules de biomasse. Elle désigne le rapport de surface d'une particule sphérique à celui de surface d'une particule donnée avec le même

Chapitre 2 : Etude théorique de la gazéification

volume. Une faible sphéricité signifie un meilleur transfert de chaleur et de masse. (Kumar, et al., 2014; Basu, 2010; RECORD, 2009)

6.1.2 Densité

Généralement, deux densités sont utilisées pour caractériser la charge de biomasse : la densité des particules et la densité apparente de biomasse.

La densité des particules est classée en deux catégories :

- **La densité réelle des particules** est le rapport entre la masse des particules et le volume sans tenir compte du volume poreux interne de la particule.
- **La densité apparente de particule** est le rapport de la masse de particule et son volume y compris le volume poreux à l'intérieur de la particule, et à l'exception du volume de vide entre les particules.

La densité apparente d'une biomasse désigne le rapport du poids par unité de volume de cette biomasse, y compris les espaces vides. Cette densité est influencée par la taille, la forme et le type de la biomasse. Une densité apparente élevée signifie une densité d'énergie élevée par mètre cube de volume et une meilleure fluidité et l'inverse. La densité apparente inadéquate peut être améliorée par briquetage ou granulation. (Speight, 2020; Basu, 2010; Kumar, et al., 2014)

6.1.3 Taux d'humidité

La teneur élevée en humidité de la charge réduit le rendement thermique et entraîne de faibles valeurs de chauffage du gaz. Les températures internes du gazéificateur diminuent pendant la phase d'évaporation ce qui cause un manque d'énergie nécessaire pour accomplir les réactions de réduction et la conversion de l'énergie thermique en énergie chimique (Speight, 2020; RECORD, 2009)

6.1.4 Analyses immédiates et ultimes et contenu énergétique

L'analyse immédiate de la biomasse comprend la matière volatile, carbone fixe et les cendres. Ces paramètres permettent d'évaluer l'aptitude du gazéificateur à convertir des charges d'alimentation particulières. (Kumar, et al., 2014; Bain & Broer, 2011)

Le taux de matière volatile détermine la facilité avec laquelle la biomasse peut être gazéifiée. Un taux de Matière volatile élevé signifie un taux de goudron élevé et l'inverse.

Chapitre 2 : Etude théorique de la gazéification

Généralement la teneur en matières volatiles de la biomasse est supérieure à celle du charbon, et varie de 70 à 85%, (Speight, 2020; Basu, 2010; Rubiera, et al., 2011; Jameel & Keshwani, 2018)

Les réacteurs de gazéification sont très sensibles à la production de cendres, car ils peuvent causer beaucoup de problèmes, surtout dans les gazéificateurs à co-courant ou contre-courant. Les taux élevés de cendres peuvent conduire à la formation de scories suite à leur fusion et agglomération, ce qui causera une difficulté dans le fonctionnement du gazéificateur, et peut même dans des cas graves boucher les canalisations d'air qui peut conduire à un risque d'explosion. (Speight, 2020; Basu, 2010)

Le carbone fixe est le résidu d'hydrocarbure aromatique polynucléaire qui résultent des réactions de condensation de l'étape de pyrolyse. Les matériaux de biomasse sont facilement pyrolysés, ce qui donne moins de résidus de carbone fixe. (Bain & Broer, 2011)

Les analyses ultimes désignent la composition élémentaire de la fraction organique sans cendres de la biomasse, composé généralement mais pas obligatoirement de C, H, N, S et O ; à titre d'exemple, la grande majorité de la biomasse ne contient pas de soufre (S) (Jameel & Keshwani, 2018; Bain & Broer, 2011; Basu, 2013)

Le pouvoir calorifique est l'une des propriétés les plus importantes de la biomasse en termes de conversion énergétique. Le pouvoir calorifique de la biomasse est environ cinq fois plus faible que celui du charbon. Cela est due à sa très faible densité et son taux d'oxygène élevé. (Speight, 2020; Basu, 2013)

6.2 Paramètres de fonctionnement

6.2.1 Agent de gazéification

L'agent de gazéification permet de décomposer les molécules lourdes de la biomasse en molécules plus légères et fournit, par réactions exothermiques, la chaleur nécessaire pour les réactions endothermiques.

Généralement, l'air, l'oxygène et la vapeur sont les principaux agents de gazéification couramment utilisés, le choix de l'agent de gazéification influe directement sur la composition du gaz de synthèse, le taux de goudron ainsi que le taux de conversion.

L'utilisation de **l'air** permet d'obtenir un gaz de synthèse à faible valeur calorifique, tandis que le gaz obtenu en utilisant **la vapeur d'eau** est plus approprié pour les conversions en

Chapitre 2 : Etude théorique de la gazéification

carburants et produits chimiques vu sa forte concentration de H₂ et CH₄. L'utilisation de l'**oxygène** permet d'obtenir un gaz de synthèse à forte concentrations de CO et H₂. Cependant, l'opération n'est pas économique car elle nécessite des installations de production d'oxygène (Kumar, et al., 2014). D'autres agents de gazéification peuvent être utilisés comme le dioxyde de carbone dont l'utilisation permet de réformer le goudron à la surface du catalyseur, aussi l'utilisation d'un mélange vapeur-oxygène fournit assez de chaleur pour rendre la réaction de gazéification autothermique et diminue le taux de goudron. (Basu, 2010)

Le tableau 8 montre la variation de la composition du gaz de synthèse en fonction de quelques agents de gazéification.

Tableau 8 : Composition du gaz de synthèse en fonction des différents agents de gazéification (Kumar, et al., 2014)

Agent de gazéification	Composition (Vol%)					PCI (MJ/Nm ³)
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	
Air	9÷10	12÷15	14÷17	2÷4	56÷59	3÷6
Oxygène	30÷34	30÷37	25÷29	4÷6	-	10÷15
Vapeur/CO ₂	24÷50	30÷45	10÷19	5÷12	-	12÷20

6.2.2 Température

La température de gazéification influe fortement sur la conversion, la distribution du produit et l'efficacité énergétique d'un gazéificateur. Une température élevée permet d'augmenter le rendement de gaz, diminuer teneur en goudron, et augmenter le taux conversion de carbone.

Une température élevée favorise les réactions endothermiques ce qui augmente les concentrations de CO, de H₂ et CH₄, en parallèle elle réduit la concentration de CO₂, donc une température plus basse est souhaitable pour une efficacité thermodynamique plus élevée. (Kumar, et al., 2014; Basu, 2013)

6.2.3 Pression

La pression de gazéification a effet majeur sur la conversion du carbone et par la suite sur la composition du gaz de synthèse. Une basse pression de gazéification signifie une haute concentration de CO et H₂ et une faible concentration CO₂ et CH₄. (Basu, 2010; Gräbner, 2015)

Chapitre 2 : Etude théorique de la gazéification

6.2.4 Equivalence Ratio

Le rapport d'équivalence est le rapport entre le rapport air-combustible réel et le rapport air-combustible stœchiométrique, c'est un paramètre important qui influe fortement sur la composition du gaz de synthèse.

La valeur du rapport d'équivalence doit être nettement inférieure à 1,0 pour garantir que le combustible soit gazéifié et non pas brûlé, Cependant, une valeur excessivement basse ($<0,2$) conduit à une gazéification incomplète, une formation excessive de charbon, avec une teneur en goudron plus élevée et un faible pouvoir calorifique du gaz produit. Généralement, pour la gazéification de la biomasse, le rapport d'équivalence est compris entre 0,2 et 0,3. Avec un optimum de 0.25 dans le cas des gazéificateurs à courant descendant. (Basu, 2010; Gautam, 2010)

6.2.5 Catalyseurs

Les catalyseurs permettent de gazéifier la biomasse à des températures plus basses, tout en maintenant un taux de conversion et un rendement thermique élevé à la fois. D'un autre côté les catalyseurs permettent de mieux gazéifier les composants difficiles à gazéifier tel que la lignine.

Trois types de catalyseurs peuvent être utilisés au cours de la gazéification :

- a) **Les catalyseurs basiques** : tel que le NaOH, KOH, Na_2CO_3 , K_2CO_3 et $\text{Ca}(\text{OH})_2$; bien que ces catalyseurs offrent de meilleures performances, ils restent difficiles à récupérer de l'effluent.
- b) **Les catalyseurs à oxyde métallique** : ils peuvent être récupérés, régénérés et réutilisés, ceux à base de nickel sont efficaces, comme le Ni / MgO (nickel supporté sur un catalyseur MgO) présente une activité catalytique élevée, surtout pour la biomasse. Cependant le principal inconvénient de ce type de catalyseur reste leur effet de corrosion sévère dans certaine plage de température.
- c) **Les catalyseurs à base de carbone** : tel que le charbon qui permet d'obtenir rendements élevés de gaz sans formation de goudron. (Basu, 2013)

6.2.6 Temps de séjour

Un temps de séjour plus long est favorable pour la gazéification de la biomasse et augmente considérablement son rendement. Cependant à une température plus élevée, le temps de séjour nécessaire pour une conversion optimale est plus court. (Basu, 2013)

Chapitre 2 : Etude théorique de la gazéification

6.2.7 Prétraitements

Le choix de prétraitement dépend de la nature de la biomasse et son origine, le type du réacteur ainsi que les conditions opératoires.

Généralement, le prétraitement physique est la première étape de préparation de la charge d'alimentation, il peut comprendre la réduction de taille, le criblage et la mise en suspension, aussi un séchage est recommandé dans le cas des biomasses très humides.

Un prétraitement chimique peut être appliqué lors de l'utilisation du charbon comme substrat de gazéification ou dans la co-gazéification. Ce dernier implique une douce oxydation réalisée par chauffage à basse température en présence d'air ou d'oxygène, capable de détruire les caractéristiques d'agglomération et facilite sa manipulation. (Speight, 2020)

La torréfaction est un prétraitement thermique réalisé en l'absence d'oxygène entre 230 et 300°C. ce prétraitement permet d'améliorer la densité énergétique, augmenter la teneur relative en carbone et par la suite réduire le rapport oxygène-carbone (O /C) ainsi que caractère hygroscopique de la biomasse. (Basu, 2010)

7 Produits de la gazéification

Les produits de la gazéification de la biomasse peuvent être classés en trois catégories : un produit gazeux combustible également connu sous le nom de gaz de production ou gaz de synthèse, c'est le produit principal de la gazéification, un produit liquide qui est le goudron considéré comme indésirable et nécessite d'être éliminé, et finalement des produits solides qui sont le charbon et les cendres c'est des sous-produits riches en minéraux et peuvent être valorisés comme amendements pour les sols. Les proportions et propriétés de ces produits varient selon les paramètres de fonctionnement et de gazéification de la biomasse. (Speight, 2020; Indarto & Palguandi, 2013)

7.1 Gaz de synthèse

Le but principal de la gazéification était la production d'un gaz combustible destiné à l'usage domestique (les maisons, l'éclairage public) et les procédés industriels. Le gaz de synthèse (appelé aussi gaz de production) issu de la gazéification de la biomasse, est un mélange gazeux composé principalement de CH₄, CO, CO₂, H₂ et N₂ avec une certaine quantité de vapeur d'eau. Des hydrocarbures tels que C₂H₂, C₂H₄ et C₂H₆ sont également présents dans le gaz de synthèse à faible concentration.

Chapitre 2 : Etude théorique de la gazéification

D'un autre côté, une partie du charbon non converti et des particules de cendres volantes sont aussi transportées par le gaz producteur pendant la gazéification. (Ghosh, 2018; Speight, 2020; Gautam, 2010; Indarto & Palguandi, 2013)

Les recherches sur la gazéification se focalisent sur l'augmentation des concentrations de CO et H₂ dans le gaz de synthèse car ce sont les composants de base pour la production de nombreux combustibles liquides et produits chimiques d'un côté, et d'un autre côté ces deux composants détiennent environ **75% à 95%** de l'énergie du gaz de synthèse. Les autres composants présents en petites fractions ou traces sont considérés comme nocifs, et le gaz de synthèse nécessite d'être nettoyé de ces composants avant son utilisation finale. (Kumar & Ashokkumar Sharma, 2014)

7.2 Goudron

Le goudron est un liquide noir, épais et très visqueux, composé d'une gamme d'éléments organiques oxygénés produits lors de la gazéification. Le goudron peut se trouver dans le courant de gaz chaud sous forme de matériau vaporisé ou d'aérosols persistants et se condense dans les zones à basse température du gazéificateur.

La composition réelle du goudron est complexe et dépend de plusieurs paramètres comme les conditions opératoires (température, agent de gazéification, temps de séjour...), la composition de la biomasse ainsi que la conception de réacteur. (Basu, 2010; Rezaian & Cheremisinoff, 2005)

Tableau 9 : Composés de goudron identifiés sous des sous-groupes distincts (Ghosh, 2018)

Sous-groupes	Composés
Composés aromatiques	Indène, mésitylène, phénylacétylène, styrène
Composés azotés aromatiques	Carbazole, isoquinoléine, indole, quinoléine
Furanes	2-méthylbenzofurane, benzofurane, dibenzofurane
Gaïacols	Eugénol, Guaiacol, Isoeugenol
Naphtalènes	1-méthylnaphtalène, 2-méthylnaphtalène, naphtalène
HAP (à l'exception des naphtalènes)	4,5-méthylphénanthre, acénaphtylène, acénaphène, anthracène, Biphényle, fluorène, fluoranthène, phénanthrène, pyrène
Phénols	Phénol, 2-méthylphénol, 4-méthylphénol, 2,6 diméthylphénol; 2,4-diméthylphénol, 3,5-diméthylphénol, catéchol

Chapitre 2 : Etude théorique de la gazéification

Le goudron est un sous-produit vraiment indésirable qui peut causer plusieurs problèmes dans les installations, mais sa présence est inévitable ce qui implique la nécessité d'un prétraitement pour éliminer le goudron. (Basu, 2010; Rezaian & Cheremisinoff, 2005)

7.3 Charbon ou biocharbon

C'est un matériau solide à base de carbone avec une structure très poreuse (Benedetti, et al., 2018). Dans les réacteurs à lit fluidisé, le biocharbon est généralement brûlé pour produire de la chaleur, de la vapeur ou de l'électricité vu son pouvoir calorifique qui varie de 15 à 30 MJ/kg selon la nature de la biomasse. Cependant le biochar s'est avéré efficace dans diverses applications notamment l'élimination des polluants des eaux et des sols contaminés et les études ont montré que le biochar peut améliorer amplement les propriétés du sol, grâce à la rétention d'eau et de nutriments. Il a même été exploré et approuvé récemment comme méthode pas cher pour récupérer les éléments nutritifs provenant du ruissellement liquide de la fertilisation des champs ou des effluents de la digestion anaérobie afin de les réappliquer par la suite dans les champs pour une libération lente de ces nutriments. (Pecha & Garcia-Perez, 2020; Kamali, et al., 2022)

7.4 Cendres

Les cendres sont les résidus solides issus de la conversion thermique de la biomasse, contenant une variété de macronutriments et de micronutriments résistants à l'incinération. Les taux de cendres élevés peuvent causer plusieurs difficultés dans les réacteurs de gazéifications. Pour cela, une élimination des cendres est nécessaire pour éviter tout problème pendant la valorisation.

La valeur des différents éléments contenus dans les cendres, rend leur valorisation un choix intéressant, surtout dans le domaine agricole. (Knapp & Insam, 2011; Speight, 2020)

8 Epuration du gaz de synthèse

Pour une meilleure valorisation du gaz de synthèse, on procède à l'épuration pour éliminer les impuretés et contaminants qui peuvent endommager les installations de valorisations. Plusieurs techniques d'épuration existent. Le choix d'une technique ou d'une série de techniques d'épuration combinés dépend de la voie de valorisation finale. Le tableau 10 résume quelques impuretés les problèmes qu'elles causent ainsi que leurs techniques d'épuration

Chapitre 2 : Etude théorique de la gazéification

Tableau 10 : Impuretés et leurs techniques d'élimination (Ghosh, 2018; Dufour, 2007)

Impuretés	Problèmes causés	Technique d'épuration
Particules (cendres, charbon non convertis)	Érosion	Cyclones, électrofiltres (ESP), filtres à manche, filtre à barrière (céramique ou métallique)
Goudrons (vapeurs et liquide)	Colmatage et dépôt, corrosion	Lavage humide (eau ou solvants), électrofiltres (ESP), lits catalytiques, craquage thermique et/ou catalytique, adsorption, filtres à manche
Métaux alcalins (sels Na / K)	Corrosion des gaz chauds	Refroidisseur, épurateur (scrubber), filtre
N (ammoniac / HCN)	NOx de combustion	Lavage humide, transformation catalytique en N ₂
Halogénures (Cl, F)	Intoxication au catalyseur, corrosion	Lavage, charbon actif
Soufre (H ₂ S, COS, SO ₂)	Corrosion	Lavage, adsorption (charbon actif / Fe, ZnO)

*ESP : précipitateur électrostatique

9 Applications de gaz de synthèse

Après épuration, le gaz de synthèse issu de la gazéification peut être valorisé sous différentes formes ciblant principalement la production d'électricité, de carburants ainsi que la production de produits chimiques.

La figure 15 montre les principales options d'utilisation de gaz synthétiques

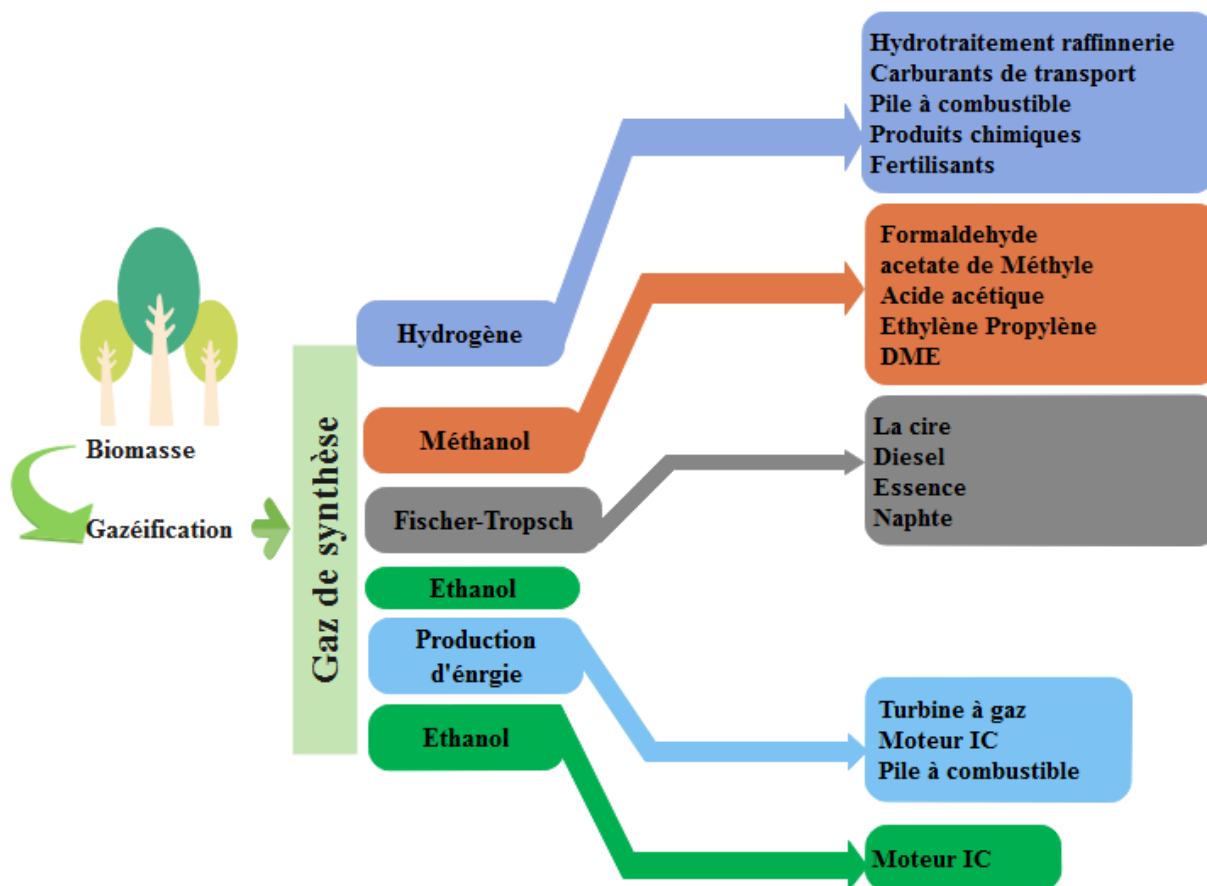


Figure 15 : Options d'utilisation de gaz synthétiques (Jameel & Keshwani, 2018)

La principale application de la gazéification est la **production d'électricité et/ou de chaleur** par cogénération. Trois types de moteur peuvent être utilisés lors de cette application, à savoir :

- **Les moteurs à gaz** ou **moteur à combustion interne**, ces derniers peuvent tolérer des teneurs en goudrons allant jusqu'à 150 mg/Nm^3
- **Les turbines à gaz**, implique des grandes exigences en termes de pureté du gaz de synthèse (teneur en goudrons $<5 \text{ mg/Nm}^3$).
- **Les turbines à vapeur**, ces installations utilisent la chaleur produite lors de la combustion du gaz de synthèse, pour produire la vapeur d'eau et alimenter la turbine.

(Deydier, 2012)

La deuxième application possible est la **production d'un gaz naturel de synthèse** composé majoritairement de méthane (CH_4), par transformation catalytique, qui peut être injecté directement dans le réseau de gaz de ville ou utilisé comme carburant pour les moteurs à gaz et les turbines à gaz.

Chapitre 2 : Etude théorique de la gazéification

Une autre application intéressante est **la production d'hydrogène**, ce dernier dont la production devient de plus en plus intéressante vu son utilisation potentielle dans les piles à combustible.

Généralement, le gaz de synthèse contient déjà de l'hydrogène, mais peut être encore enrichi en H_2 par la réaction de déplacement eau-gaz (*water-Gas shift reaction*) vue précédemment. (Basu, 2010; Deydier, 2012; Jameel & Keshwani, 2018)

La synthèse des carburants liquide à partir du gaz de synthèse par le procédé **Fischer-Tropsch** (figure 16) est une autre option d'application. Ce procédé mis au point en 1920, permet de produire une variété de produits synthétique tels que l'essence et le biodiesel à très faible teneur en soufre, ce pendant il est peu utilisé vus les couts élevés engendrés. (Deydier, 2012; Jameel & Keshwani, 2018)

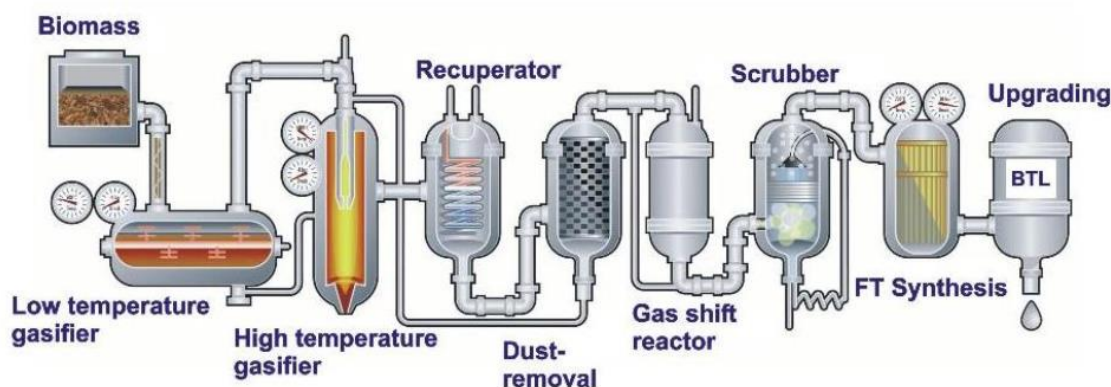
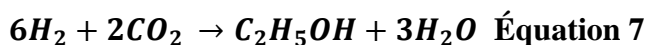
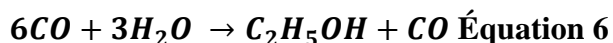


Figure 16 : Procédé Fischer-Tropsch (Deydier, 2012)

Le gaz de synthèse peut être utilisé pour produire **des alcools**, principalement le méthanol et l'éthanol selon la réaction suivante :



D'autres travaux ont montré qu'il était possible de produire de l'**éthanol** à partir du gaz de synthèse refroidi à environ $100^\circ C$ par **fermentation** à l'aide de bioréacteurs contenant des bactéries et des nutriments, selon les équations :



(Jameel & Keshwani, 2018)

Chapitre 2 : Etude théorique de la gazéification

La figure 17 montre un schéma simplifié du processus de production d'éthanol par fermentation du gaz de synthèse

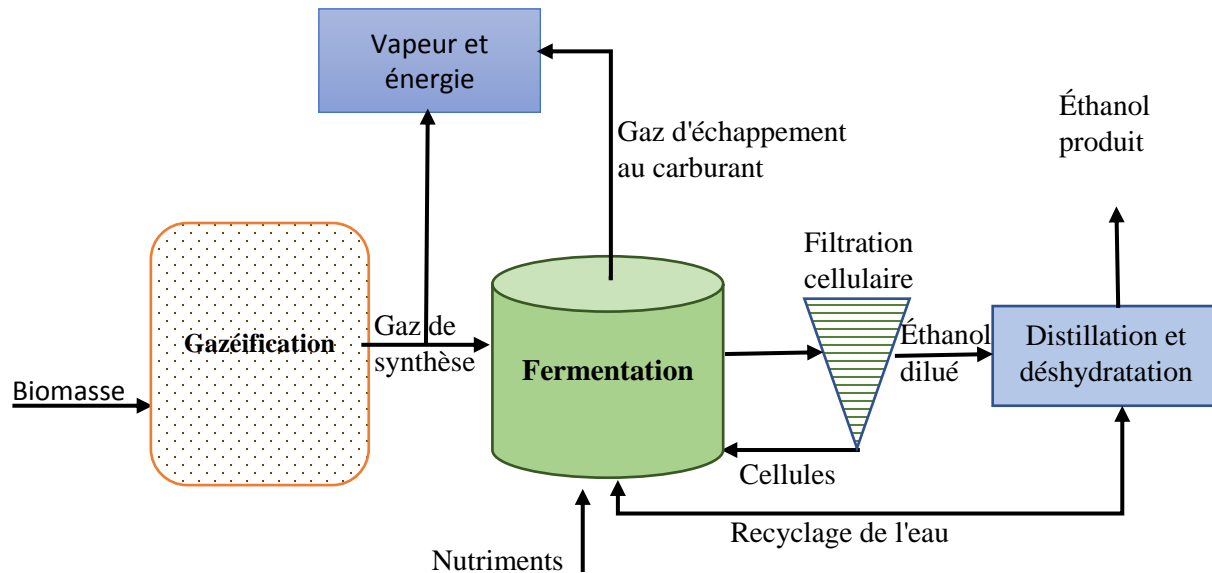


Figure 17 : Processus simplifié de la production d'éthanol par fermentation du gaz de synthèse
(Jameel & Keshwani, 2018)

Le gaz de synthèse est aussi utilisé pour produire **Le méthanol**, par la réaction du CO, du H₂ et de la vapeur sur un catalyseur à base d'oxyde de cuivre et de zinc à 260 ° C et 100 psi. Le méthanol produit peut être utilisé comme carburant, ou utilisé dans la production **d'éther diméthylque (DME)** considéré comme biocarburant de choix en Europe pour les voitures diesel vu ses émissions nettement inférieures par rapport au carburant diesel (Jameel & Keshwani, 2018).

10 Conclusion

Ce deuxième chapitre est destiné à l'étude de la gazéification. Cette technique, dont la découverte ne date pas d'hier, à jouer un rôle important dans la production d'énergie à travers l'histoire, bien que son utilisation ait pris un grand recule face aux énergies fossiles, la crainte de l'épuisement de ses derniers ainsi que les différents problèmes de santé et de pollution générés par les énergies fossile a fait revivre cette technique. Le présent chapitre aborde avec précision tous

Chapitre 2 : Etude théorique de la gazéification

les détails de cette technique, son principe, son développement, ses avantages ainsi que ces problèmes, les différents facteurs qui l'influencent, ses produits et leurs applications

Plusieurs travaux scientifiques se focalisent sur l'étude et l'amélioration des techniques de gazéification, de même notre actuelle étude, vu que c'est une technique simple qui permet une conversion rapide et une production instantanée de l'énergie.

Chapitre 3 : Matériels et Méthodes

1. Introduction

Ce chapitre est destiné à la description des détails d'échantillonnage, les étapes de fabrication et d'améliorations du prototype de gazéification, les tests de gazéification ainsi que les différentes techniques de mesures et de calculs utilisés au cours de ce travail.

La sciure de bois est utilisée comme substrat de référence. Les échantillons collectés sont lavés, séchés et finement broyé pour les caractériser, tandis que les échantillons destinés aux tests de gazéification sont broyés grossièrement. Les différentes étapes de construction de notre prototype sont détaillées dans ce chapitre avec la description de chaque partie ainsi que les modifications apportées ainsi que le but de chaque modification. Les tests de gazéification sont menés en double pour plus de précision et la température, l'inflammabilité du gaz produit, ainsi que le taux de conversion sont étudiées pour chaque substrat.

2. Lieu et procédure d'échantillonnage

Les échantillons de déchet lignocellulosique du palmier ont été prélevés en mois d'octobre, durant deux années successives (2017-2018), au cours des opérations de nettoyage des palmiers de l'Institut National de Recherche en Agronomie d'Algérie à Adrar (27 ° 52'00 "nord, 0 ° 17 '00" ouest à 264m d'altitude)

Le choix de l'échantillon s'est posé sur le palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche* pour deux principales raisons, la première c'est que c'est la variété la plus dominante dans notre site d'échantillonnage. La deuxième c'est que la variété *Takarbouche* figure parmi les cinq variétés dominantes de palmier dattier dans la région d'Adrar selon les statistiques de la DSA, ce qui rend la valorisation des déchets générés par cette dernière intéressante.

La station expérimentale INRAA d'Adrar est située à la périphérie de la communauté d'Ouled Aissa, à 3 km du chef-lieu de la commune d'Ouled Ahmed Timmi et à 5 km de la ville d'Adrar. Cette station créée depuis l'époque coloniale, plus précisément en 1951, et connue par son éolienne qui date de 1953, s'étend sur une superficie de 69 ha avec une extension de 30 ha qui a été ajoutée au début des années 1990, destinée à la création d'un champ de pieds mère de la variété *Takarbouche* résistante au Bayoud ; Actuellement la superficie plantée de *Takarbouche* dépasse des 15 ha. (Bellahreche, 2020)

L'INRAA compte environ 2000 Palmiers dattier plantés durant les années 1992-1993 et étendus sur une superficie de 30ha. Dix variétés de palmiers dattiers existent à l'INRAA d'Adrar, dont plus de la moitié de cette superficie est destinée à la variété *Takarbouche*, le reste est départagé entre les neuf autres variétés, à savoir : *Teggaza*, *Tinacer*, *Hmira (Tilamsou)*, *Aghares*, *Deghla baida*, *Tazarzai*, *Bamakhlouf*, *Timdoukal* et *Ahartane*.

Les palmiers sont placés avec un espace de 8m entre la ligne et entre les colonnes, leur irrigation est assurée par deux systèmes : le goutte à goutte qui est principalement destiné aux jeunes palmier et l'irrigation par submersion pour les palmiers adultes mais peut des fois être utilisé pour les jeunes palmiers.

Le nettoyage ou le taillage des palmiers dattier est un entretien annuel principal des palmiers qui permet d'éliminer les déchets, tel que les dattes et palmes sèches, les pétioles morts et le fibrillum qui les entoure ainsi que les spaths et faire place pour les nouvelles récoltes (photo.13)



Photo 13 : Déchets de palmier dattier après nettoyage

Le choix des palmiers pour échantillonnage est basé sur deux principaux critères, le premier est le bon état du pied, le second est que le palmier soit productif. Après nettoyage des palmiers dattier, les déchets lignocellulosiques sont collectés, classifiés, puis caractérisés.

3. Caractérisation des échantillons

3.1. Caractérisation physique :

La collecte de données est effectuée via des enquêtes prospectives, au cours desquelles nous avons assisté à toutes les étapes de l'opération de nettoyage des palmiers dattiers (*Phoenix*

dactylifera L.) pendant les saisons 2017-2018 successivement. Après la collecte et le tri des déchets, on procède au dénombrement et au mensurations nécessaires (photo 14).



Photo 14 : Mensuration des déchets de palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche*

Les déchets du palmier dattier sont séchés à l'air libre puis pesé séparément comme le montre la photo 15.



Photo 15 : Séchage et prise de poids des déchets de palmiers dattiers (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche*

La masse unitaire des déchets générés par le palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche* est calculée comme suit :

$$\text{masse unitaire}_{\text{déchets}} = \frac{\text{masse total}_{\text{déchét}}}{\text{nombre}_{\text{déchét}}}$$

La masse totale des différents déchets générés par le palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche* est calculée comme suit :

$$\begin{aligned} \text{masse totale}_{\text{déchét cumulé}} &= \text{masse}_{\text{palm}} + \text{masse}_{\text{pétiole}} + \text{masse}_{\text{régime}} + \text{masse}_{\text{spathe}} + \text{masse}_{\text{lif}} \\ &+ \text{masse}_{\text{pédoncule du régime}} \end{aligned}$$

La proportion de chaque déchet est calculée par l'équation :

$$\text{proportion}_{\text{déchét}} = \frac{\text{masse total}_{\text{déchét}}}{\text{masse totale}_{\text{déchét cumulé}}}$$

3.2. Caractérisation physico-chimique

a. Préparation des échantillons

Les déchets de palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche* préalablement séché à l'aire libre, sont déchiqueté puis broyé grossièrement à l'aide d'un broyeur **SEZER** (de puissance 3KW, 2870tr/min). Le déchiquetage permet de réduire la taille du substrat ce qui facilite le broyage par la suite (photo 16).



Photo 16 : Déchiquetage et broyage des déchets de palmier dattier

Les déchets broyés sont lavés à l'eau de robinet puis à l'eau distillée pour éliminer toutes les impuretés, puis ils sont séchés une deuxième fois à l'air libre (photo 17). La réduction de taille des déchets permet de mieux les nettoyer



Photo 17 : Nettoyage des déchets Phoenicoles

Un deuxième broyage est réalisé, pour le substrat destiné à la caractérisation, à l'aide d'un micro-broyeur *Janke & kunkel* (de puissance 200w, 5000tr/min) pour obtenir des granulométries très fine ($\leq 2\text{mm}$), puis un tamisage si nécessaire (photo 18).



Photo 18 : Deuxième broyage et tamisage pour caractérisation

b. Caractérisation

La caractérisation de déchets de palmier est effectuée selon les méthodes standard mentionnées dans le tableau 11

Tableau 11 : paramètre méthodes standard de caractérisation

N°	Paramètre	Formule	Réf.
01	Densité	$\rho = m/V \text{ [Kg/m}^3 \text{]}$	(Dupraz, et al., 2009)
02	Humidité et matière sèche	$MS(\%) = \frac{P_3 - P_1}{P_2 - P_1} \times 100$ $H(\%) = 100 - MS$	ASTM E871
03	Matière volatile	$A(\%) = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100$ $MV(\%) = A - H$	ASTM E 872
04	Cendres	$Cd(\%) = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100$	ASTM D1102
05	Carbone fixe	$CF(\%) = 100 - (MV + Cd)$	(Adekiigbe, 2012)
06	Composition élémentaire	$C = -35.9972 + 0.7698MV + 1.3269CF + 0.3250Cd$ $H = 55.3678 - 0.4832MV - 0.5319CF - 0.5600Cd$ $O = 223.6805 - 1.7226MV - 2.2296CF - 2.2463Cd$	(Nhuchhen, 2016)
07	Pouvoir calorifique	$PCS = 19.2880 - 0.2135 MV/CF + 0.023 * CF / (Cd - 1.9584 Cd/MV) \text{ (MJ/kg)}$	(Nhuchhen & Salam, 2012)
08	Composition chimique	$x = \frac{\text{fraction massique (H)} \times \text{poids moléculaire (C)}}{\text{fraction massique (C)} \times \text{poids moléculaire (H)}}$ $y = \frac{\text{fraction massique (O)} \times \text{poids moléculaire (C)}}{\text{fraction massique (C)} \times \text{poids moléculaire (O)}}$	(Gan Gek, et al., 2016)

c. Le rapport atomique

Le rapport atomique est basé sur la teneur en hydrogène, oxygène et carbone du combustible le pouvoir calorifique supérieur (PCS) d'une biomasse est bien corrélé avec le rapport atomique. Lorsque le rapport augmente, le pouvoir calorifique effectif du carburant diminue, et l'inverse (Basu, 2013).

4. Prototype de gazéification

4.1. Prototype préliminaire de gazéification

Le prototype expérimental préliminaire réalisé est un cylindre en acier de **90cm** de hauteur, et **29 cm** de diamètre interne et un poids de **50kg**. Les conduites d'air sont faites à l'aide de vieux tuyaux en cuivre récupéré.

L'entrée de l'oxydant est située dans la partie inférieure du corps de gazéification à **12 cm** du fond, l'agent oxydant est alimenté à travers un tuyau en cuivre de **29cm** munie de trous de **~2-3 mm** de diamètre.

Un lit pour le substrat sous forme de grille est situé à **9cm** au-dessus de l'entrée de l'oxydant.

La sortie de gaz produit se situe au sommet du corps principal ainsi que l'entrée du substrat.

La figure 18 montre une vue globale ainsi qu'une découpe longitudinale du prototype de gazéification.

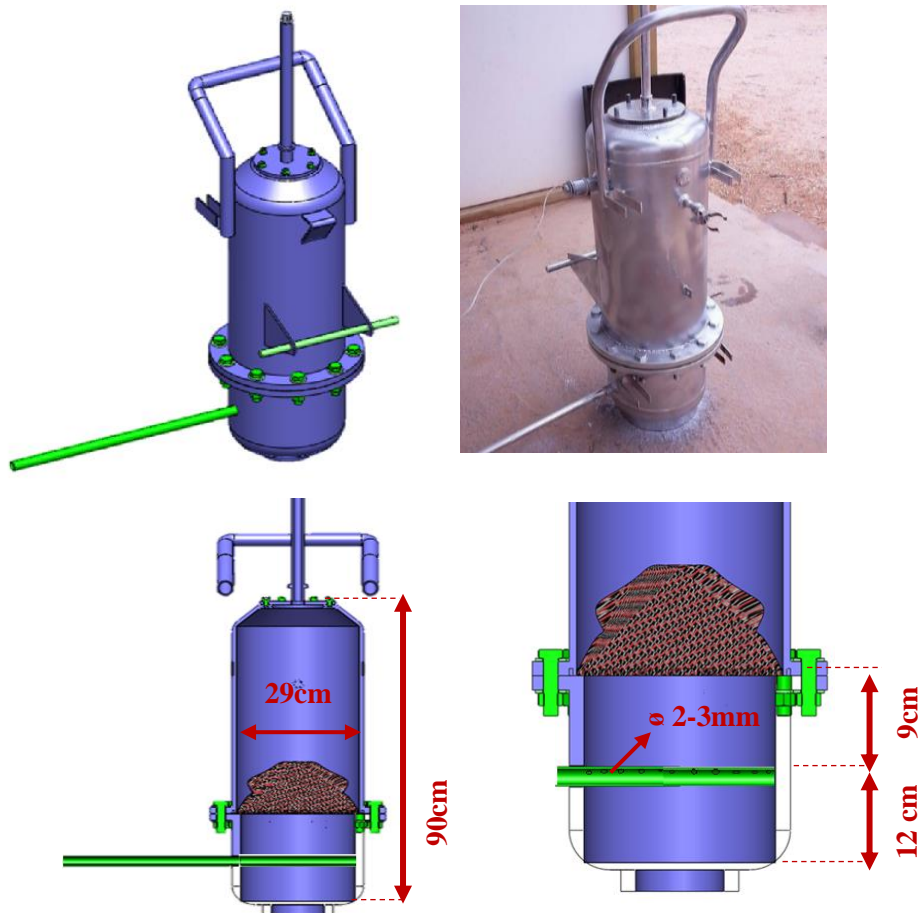


Figure 18 : Vue globale (haut) et découpe longitudinale (bas) du prototype préliminaire de gazéification

4.2. Amélioration du prototype de gazéification

Afin d'améliorer la performance du gazéificateur après le premier essai avec la sciure de bois, nous avons procédé à des améliorations à la conception préliminaire déjà réalisée.

L'alimentation du substrat est maintenue à la partie supérieure du corps de gazéification, avec l'ajout d'une fenêtre glissante qui permet l'ouverture et la fermeture du point d'alimentation.

La sortie du gaz de synthèse est déplacée du sommet vers le côté supérieur du corps de gazéification avec une augmentation du diamètre de sortie de 21cm à 40cm, et l'alimentation du substrat est munie d'une fenêtre coulissante de 8.5cm /7cm, comme on peut le voir dans la figure 19.

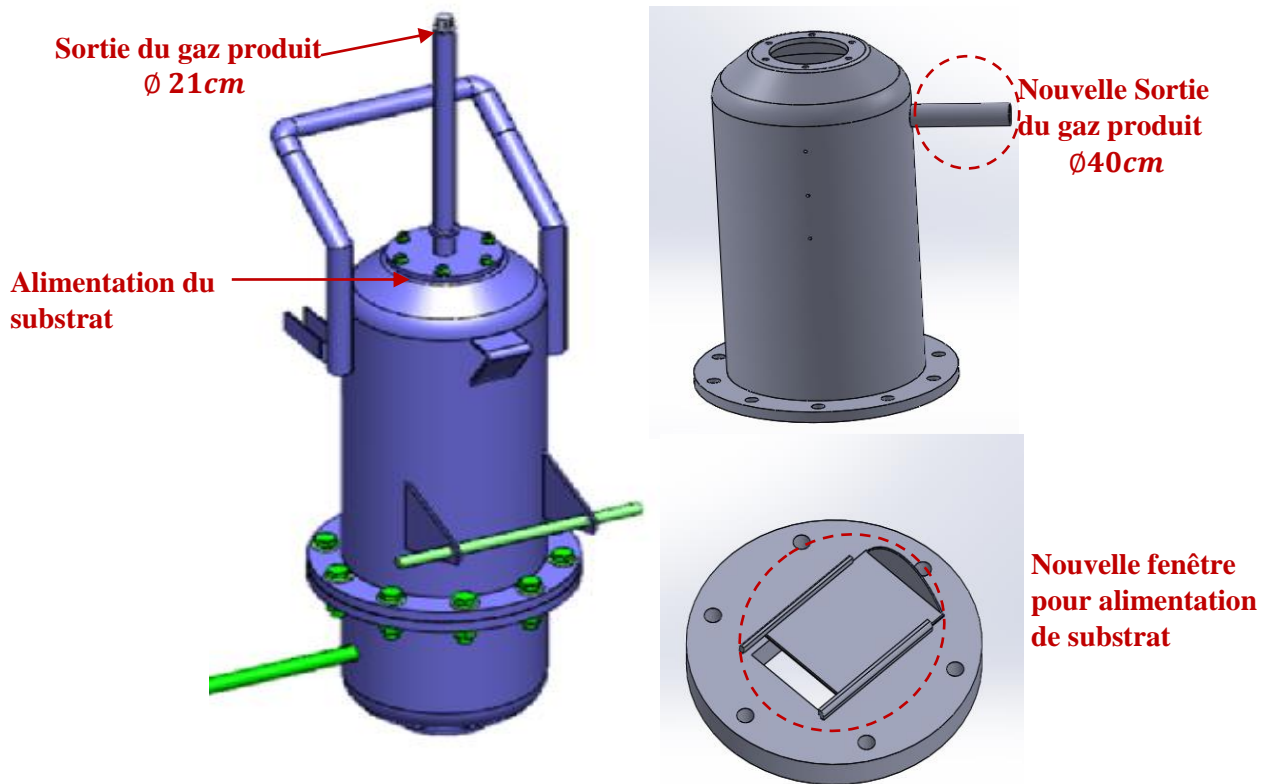


Figure 19 : amélioration de la fenêtre d'alimentation et sortie du gaz de synthèse



Figure 20 : Ancien (gauche) et nouveau (droite) lit de substrat

La grille utilisée comme lit de substrat est remplacée par un cercle en acier (figure 20) de **~27cm** de diamètre, avec des trous de **3.5mm** de diamètre situé à **9cm** au-dessus de l'entrée de l'agent de gazéification

Le système de répartition de l'agent de gazéification composé dans la conception de base d'un tuyau simple en cuivre de **29 cm** de longueur, est remplacé par un nouveau design, comme le montre la figure 21, pour offrir une meilleure répartition de l'air pendant la gazéification.



Figure 21 : Système de répartition de l'agent de gazéification

Pour l'épuration du gaz de synthèse un système d'épuration type cyclone est raccordé au corps de gazéification pour éliminer le goudron principalement

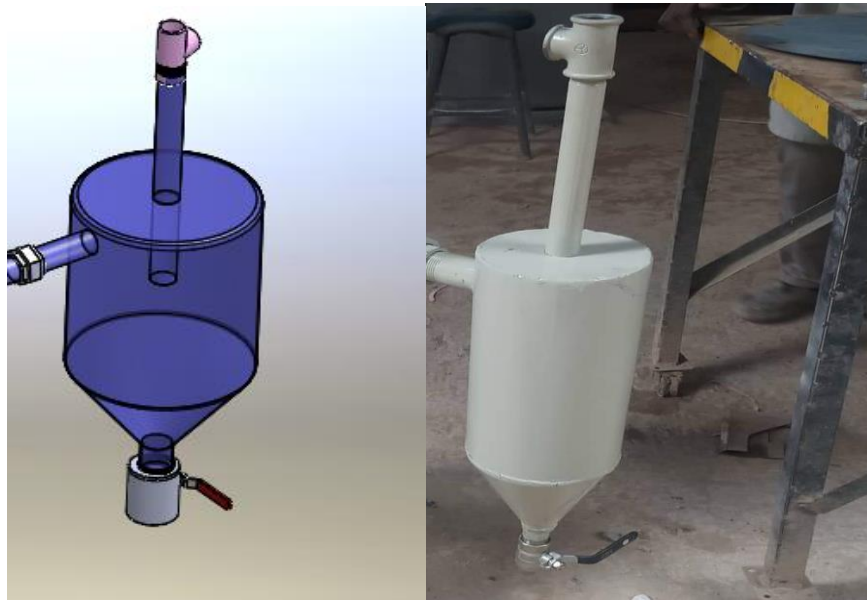


Figure 22 : Schéma descriptif et photo réel du cyclone

Pour l'allumage du combustible une petite ouverture avec bouchon de fermeture est placée au même niveau que le lit de substrat (photo 19)



Photo 19 : Ouverture pour allumage

La figure 23 montre un schéma descriptif et une photo réelle du prototype de gazéification assemblé après les différentes améliorations réalisées.

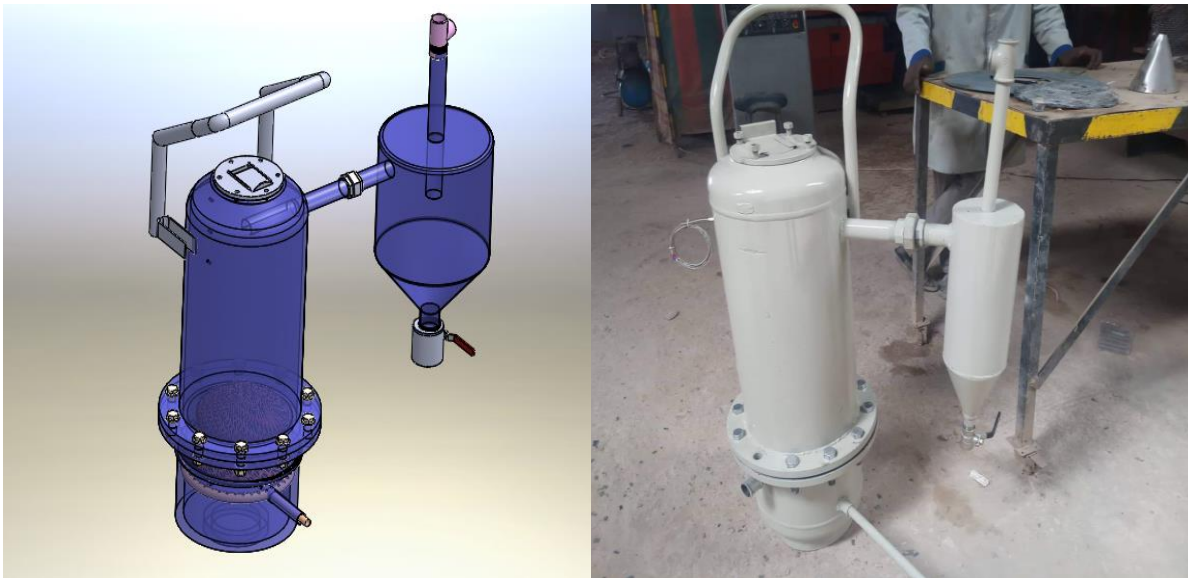


Figure 23 : Schéma descriptif et photo du prototype assemblé

Au cours des tests, on a constaté la présence des fuites dans plusieurs points de raccordement et surtout au niveau de l'entrée du substrat. Pour cela une nouvelle amélioration a été apporté au prototype, l'entrée du substrat avec fenêtre coulissante est remplacé par une conduite de 41mm de diamètre menée d'une vanne. Un bac de 10x10x10 cm est réalisé pour faciliter l'alimentation du substrat et limité les pertes comme on peut le voir sur la photo 20



Photo 20: Bac et conduite d'alimentation pour substrat

Pour les fuites au niveau des raccordement un joint de silicone est ajouté pour les éviter (photo 21).



Photo 21 : Ajout d'un joint de silicone

4.3. Agent da gazéification

L'agent de gazéification utilisé est l'air, l'alimentation en agent gazéifiant se fait par un compresseur d'air (Photo 22) de taille moyenne (25L) de marque F.I.M.A. le compresseur est muni d'une vanne pour contrôler le débit de l'air.



Photo 22 : Compresseur d'air F.I.M.A

Pour faciliter l'allumage du substrat à l'intérieur du gazéificateur, un agent inflammable est utilisé. Cet agent est du bioéthanol 100% à base de biomasse sans aucun dérivé pétrolier ni additifs chimiques pour rester dans le thème d'énergie renouvelable.

5. Les tests de gazéification

5.1. Suivi de la température

Un suivi de la température à l'intérieur du prototype de gazéification, ainsi que de la température du gaz de synthèse produit, est réalisé grâce à des thermocouples de type **k** haute température liés à une acquisition de données **Fluck Hydra série II** (Photo 23)

Pour le prototype préliminaire, deux thermocouples sont utilisés, le premier est un thermocouple céramique haute température (**+1260°C**) placé à la sortie du gaz produit. Le deuxième est un thermocouple aiguille (**1100+°C en continue**) placé au niveau de la zone de gazéification.



Photo 23 : Acquisition de données Fluck Hydra série II.

Pour le prototype amélioré le suivi de la température est effectué à l'aide de thermocouples sonde de type **k** haute température (**+700°C**) à travers **5** points à partir de **10 cm** au-dessus du lit du substrat et distribués tout au long du gazéificateur avec un intervalle de **10 cm** comme le montre la photo 24.



Photo 24 : Emplacement des thermocouples

5.2. Test de l'inflammabilité du gaz de synthèse

L'inflammabilité du gaz de synthèse est testée directement à sa sortie à l'aide d'un briqué.

5.3. Taux de conversion de la biomasse

Le taux de conversion de la biomasse est calculé directement par l'équation suivante :

$$t(\%) = \frac{(w_0 - w)}{w_0} * 100$$

Où :

w_0 : poids de la matière première

w : poids du résidu solide après la réaction (Sait, et al., 2012)

Chapitre 4
Résultats et discussions

1. Introduction :

Ce dernier chapitre est destiné au traitement et discussions des résultats obtenues au cours du présent travail. Les différentes caractérisations ainsi que les tests de gazéifications sont réalisées au niveau de la division de conversion thermique et thermodynamique de l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien.

Les déchets utilisés pour notre travail sont les déchets lignocellulosiques de palmiers dattier (*Phoenix dactylefera L.*) variété *Takarbouche*, collectés lors des opérations de nettoyage effectuées au niveau des jardins de l'INRAA d'Adrar pendant deux années successives. Le substrat de référence est collecté aux prés des menuiserie de la commune d'Adrar.

Les résultats sont classés en quatre volets, le premier destiné aux traitements des données de la prospection sur terrain et l'estimation du potentiel en biomasse lignocellulosique phoenicicole variété *Takarbouche* pour la région Touat, Gourara et Tidikelt. Le deuxième englobe les résultats des caractérisations des différents substrats collectés et l'estimation de leur composition élémentaire ainsi que leur pouvoir calorifique à l'aide de corrélations mathématiques. Le troisième volet se focalise sur les tests de gazéification qui sont réalisés avec le substrat de référence ainsi que les quatre déchets lignocellulosiques dominants et la dernière partie est basée sur l'évaluation de la composition du gaz de synthèse en utilisant un modèle thermodynamique. Les résultats obtenus sont discutés et comparés avec d'autres travaux effectués.

2. Prospection sur terrain

Au cours de l'opération de nettoyage des palmiers dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche*, six types de déchets lignocellulosiques ont été distingués comme on peut le voir sur la photo 25 : les palmes, la spathe, le fibrilium, le régime, le pédoncule du régime et les pétioles. Chaque palmier produit annuellement la totalité ou bien la majorité de ces déchets.



Régime



Palmes



Pédoncule du régime



Pétiole, kornaf



Spathe



Fibrilium, fdam

Photo 25 : Les six déchets lignocellulosique générés du palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*)

2.1. Dénombrement des différents déchets générés du palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche*

Après l'opération de nettoyage et le tri des différents types de déchets générés du palmier dattier, les résultats de dénombrement sont présentés dans la figure 24.

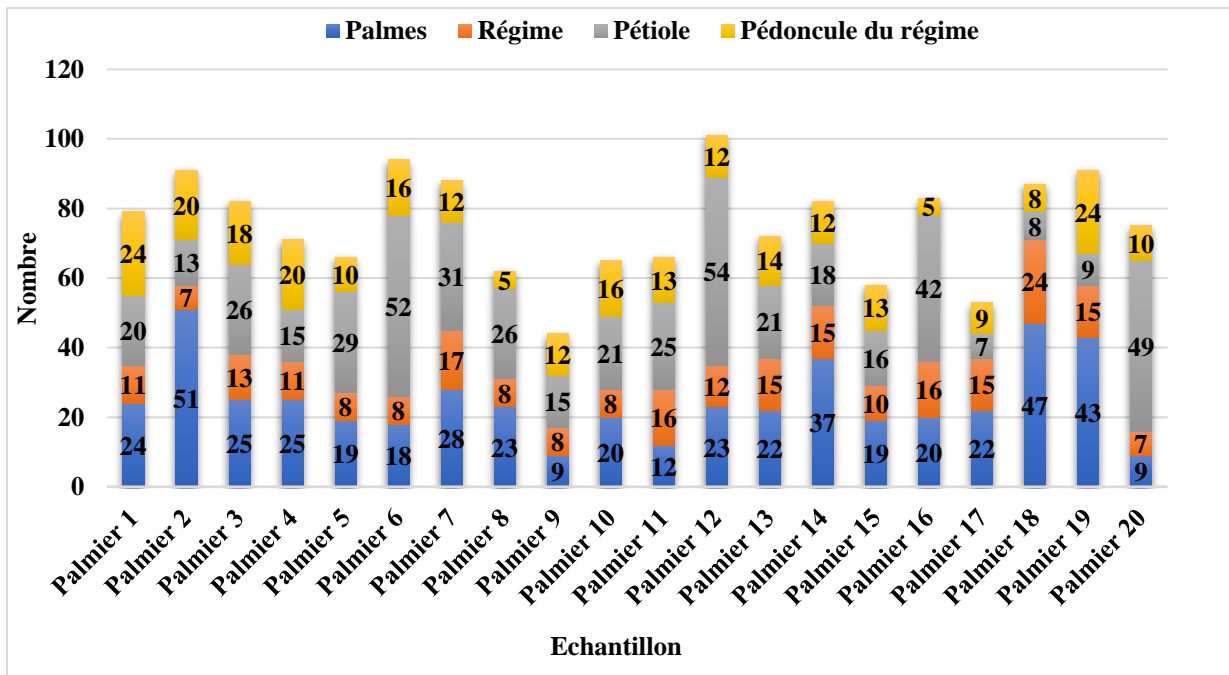


Figure 24 : Nombre de déchets générés par échantillon de palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche*

Nous constatant que le nombre de palmes varie entre 9 et 51 soit une moyenne de 24 palmes par palmier dattier ;

Le nombre de pédoncule de régime varie entre 5 et 24 soit une moyenne de 13 Pédoncule par palmier dattier,

Le nombre de régime varie entre 7 et 24 soit une moyenne d'environ 12 régimes par palmier dattier. On remarque que le nombre de régime est légèrement inférieur au nombre de sa pédoncule, vu qu'un certain nombre de régime est éliminé pour assurer un meilleur développement des fruits. On appelle cette opération le **ciselage**.

Le nombre de pétiole varie entre 7 et 54 Soit une moyenne de 24 pétioles par palmier dattier ;

2.2. Prise de poids des différents déchets générés du palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche*

La figure 25 illustre les poids totaux des principaux déchets générés lors de l'opération de nettoyage du palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche*

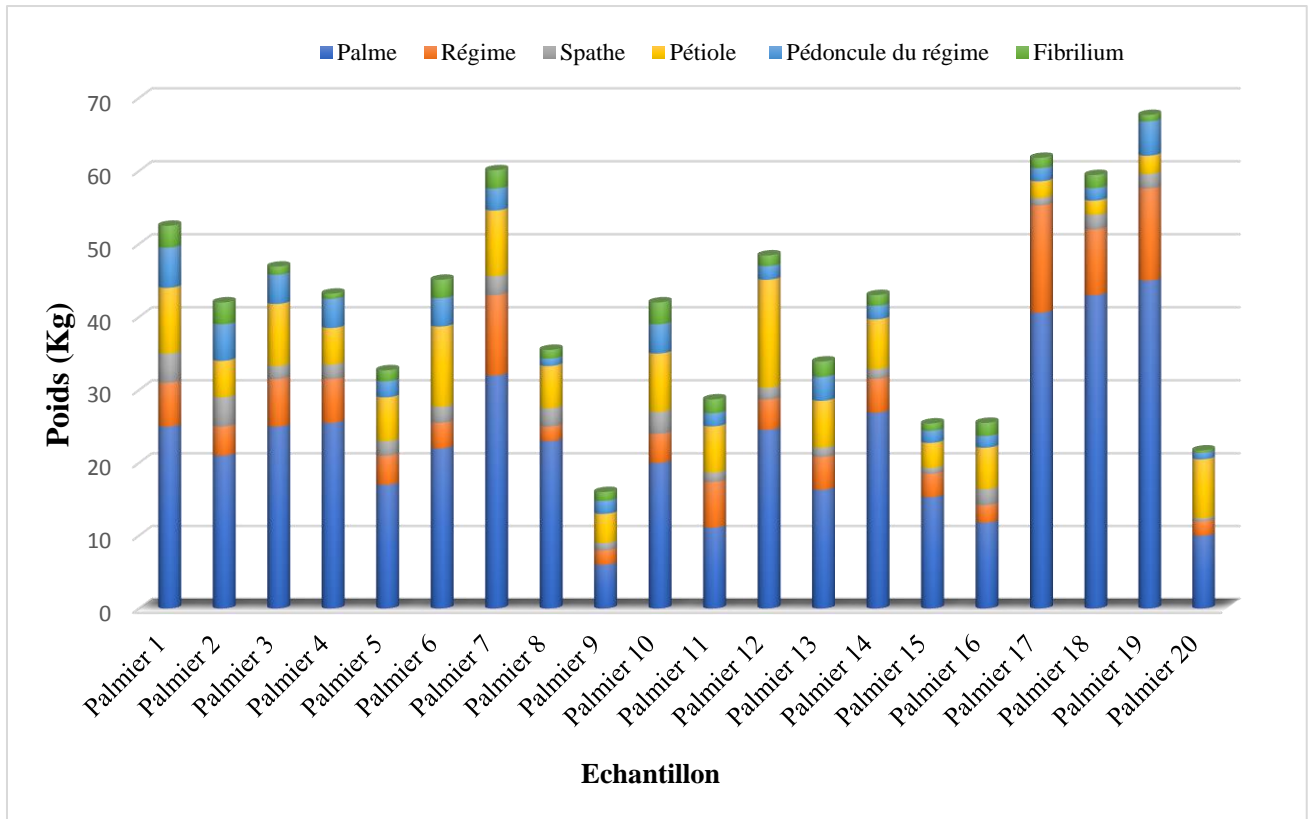


Figure 25 : Poids des différents déchets générés par échantillon de palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche*

Nous remarquons que pour tous les palmiers dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche* sélectionné pour échantillonnage au cours de cette étude, les palmes sont le déchet le plus dominant durant les opérations de nettoyage, où nous avons enregistré des quantités qui varient entre 6 et 45 Kg pour les palmes sèches, entre 2,3 et 14,8 Kg pour les pétioles, 2 et 14,7 pour le régime, 0,9 et 4 Kg pour la pédoncule du régime, 0,76 et 4 Kg pour la spathe et entre 0,31 et 3Kg pour le fibrilium.

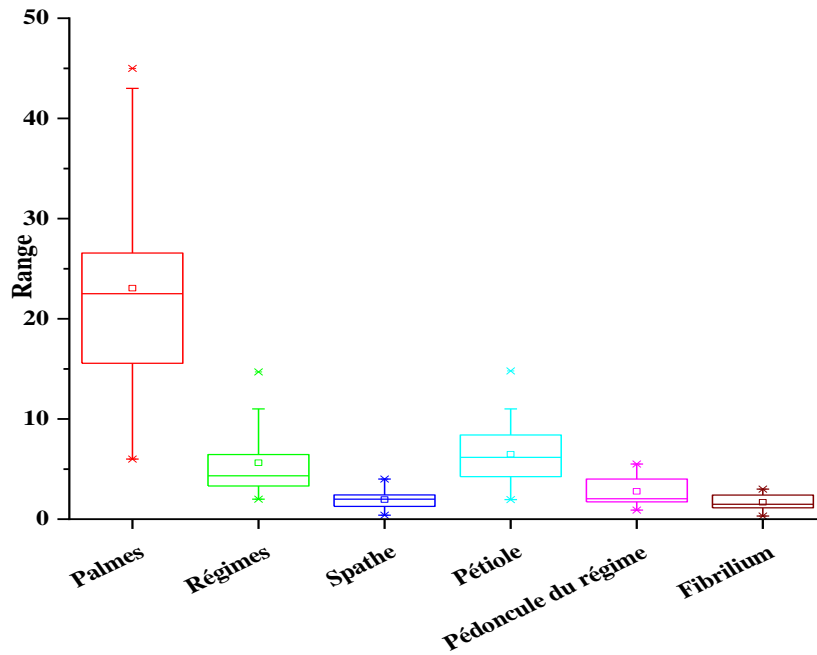


Figure 26 : Analyse de variances ANOVA

La figure 26 montre l'analyse des variances selon le test **Tukey**. L'analyse montre une différence très significative entre les palmes et reste des déchets, ce qui confirme que les palmes sont le déchet dominant en termes de poids. Une différence très significative est notée entre les pétioles et les spathes et aussi entre les pétioles et les fibrilium, pour le reste des déchets l'analyses statistique indique une différence non significative.

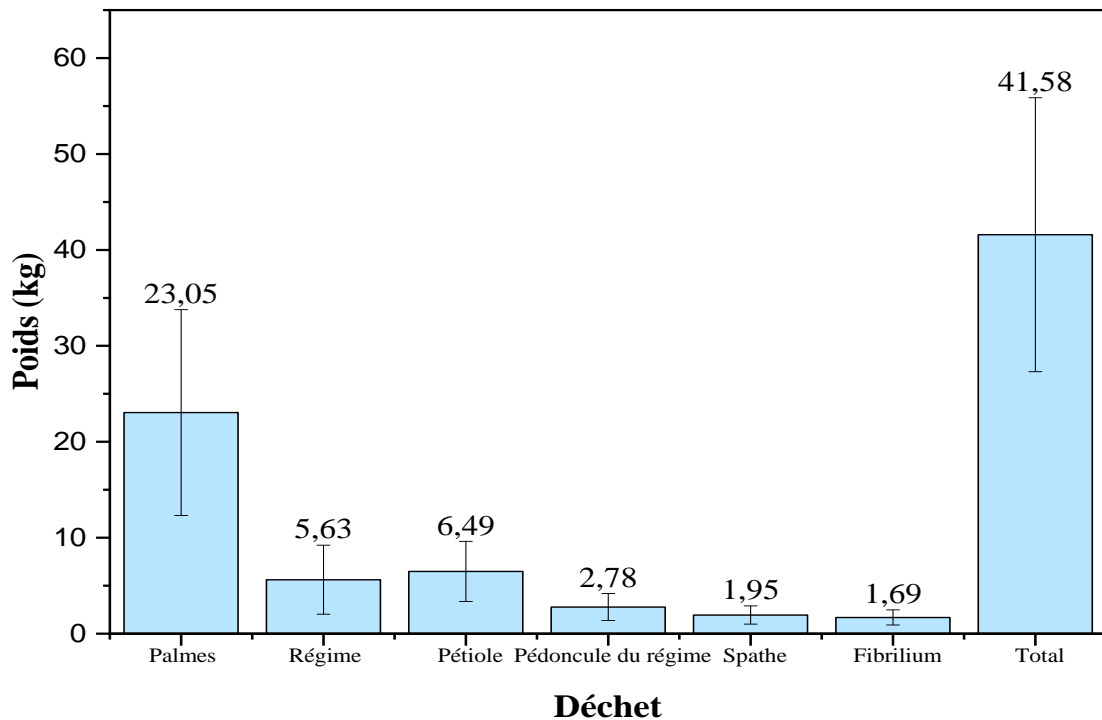


Figure 27 : Poids moyen des déchets de palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche*

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

La figure 27 illustre le poids moyen total des déchets ainsi que le poids moyen de chaque déchet généré annuellement au cours des opérations de nettoyage. D'après les résultats obtenus au cours de notre étude sur terrain chaque palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche* génère environ $41,58 \pm 14,28$ kg de déchet par an, dont environ $23,05 \pm 10,72$ kg sont des palmes, $6,49 \pm 3,13$ kg des pétioles, $5,63 \pm 3,59$ kg des régimes, $2,78 \pm 1,40$ kg des pédoncules du régime, $1,95 \pm 0,96$ kg et $1,69 \pm 0,79$ kg sont des spathes et fibrilium respectivement.

2.3. Rapport poids /longueur des déchets générés du palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche*

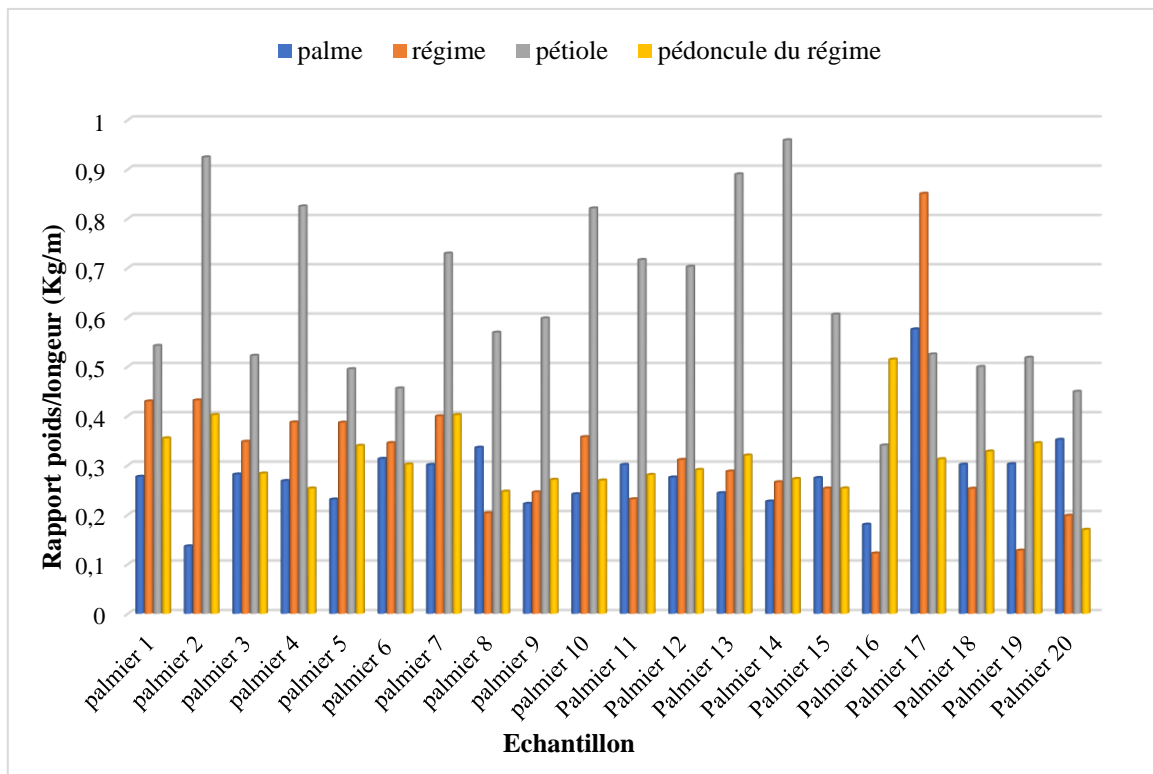


Figure 28 : Rapport poids/longueur des déchets par échantillon de palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche*

La figure 28 montre le rapport poids/longueur des différents déchets pour les 20 palmiers étudiés, on constate que les valeurs obtenues pour la majorité des palmiers dattiers classent les pétioles en première position avec des valeurs qui varient de 0,34 à 0,95Kg/m, pour le régime et les pédoncules du régime elles varient entre 0,12-0,85Kg/m et 0,16-0,51Kg/m respectivement, tandis que les palmes enregistrent des rapports entre 0,13 et 0,57Kg/m.

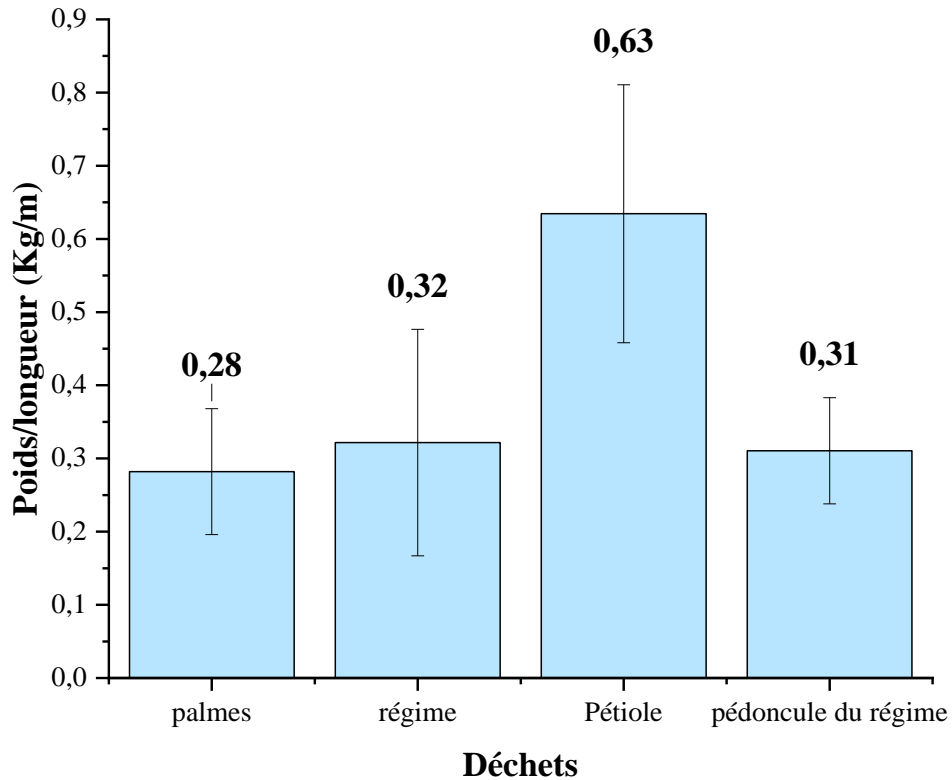


Figure 29 : Rapport moyen poids/longueur

La figure 29 illustre le rapport poids /longueur des déchets du palmier dattier. Ce rapport nous permet d’avoir une idée sur la texture du déchet, nous remarquons que les palmes ont le rapport le plus petit ($0,28 \pm 0,09$ kg/m) comparé aux autres déchets dont le rapport est nettement supérieur. Cela signifie que la texture des palmes est très fine par rapport aux autres déchets (Bousdira, 2015). Cela explique aussi le fait que du côté pondérale les palmes sont classés à la tête des déchets récoltés, car leur fine texture fait qu’ils sèchent facilement aux conditions climatiques de la région, est donc pendant le nettoyage du palmier ils sont collectés en grandes quantités. En revanche, pour les pétioles le rapport enregistré est plus grand que celui des palmes et des autres déchets avec une valeur de $0,63 \pm 0,15$ Kg/m vu sa texture résistante à la condition climatique et par conséquent sans faible poids lors du nettoyage.

2.4. Proportion de la biomasse générés du palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche*

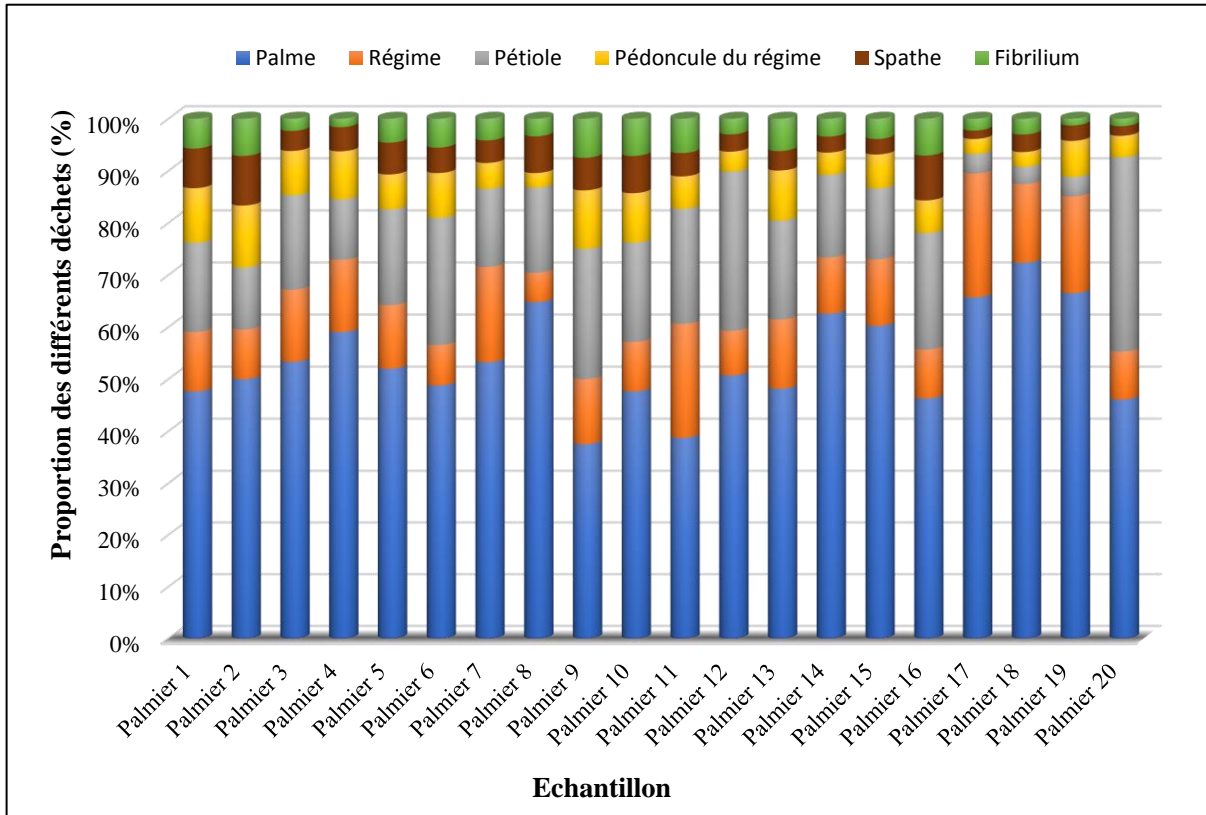


Figure 30 : Proportion des différents déchets par échantillon de palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche*

Selon la figure 30 les proportions des six différents déchets pour les 20 palmiers étudiés montrent que les palmes sont le déchet dominant avec des proportions qui varient entre 37,5 et 72,32% suivi par les pétioles dont la proportion varie entre 3,28 et 30,55% ainsi que le régime avec 5,63 et 23,78%. Pour les pédoncules des régimes, la spathe et le fibrilium leurs proportions varient entre 2,81-11,90%, 1,62-9,52% et 1,29- 7,14% respectivement. Cette variation entre un palmier et un autre pour le même substrat est due à la fréquence de nettoyage des palmiers. Y'a des palmiers -dans la gamme qu'on a choisi- nettoyés annuellement d'autre non. Pour les pétioles et les fibres ils ne sont pas nettoyé chaque année et des fois on ne respecte pas la hauteur limite de leur nettoyage qui est de 45-50 cm.

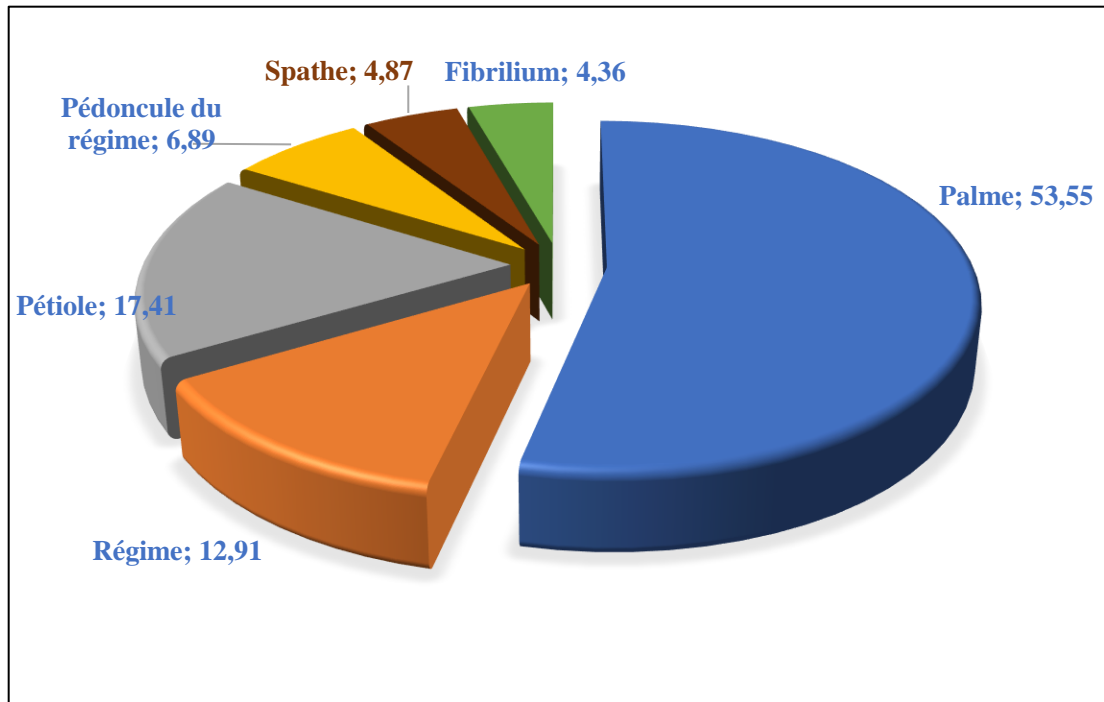


Figure 31 : Proportion moyenne des déchets de palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche*

Selon la figure 31, les proportions moyennes des déchets de palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche* traités montrent que les palmes sont les déchets les plus dominant du palmier dattier avec un taux moyen de 53,55% des déchets cumulés, suivit des pétioles qui présentent 17,41% des déchets cumulés et les régimes avec 12,91% des déchets cumulés. Ces proportions intéressantes de point de vue quantitatif classent les palmes comme une biomasse de choix pour une éventuelle valorisation énergétique, suivi des pétioles puis les régimes. Pour le pédoncule du régime elle représente presque la moitié de la proportion du régime à savoir 6,89%. Le fibrilium et la spathe sont classé au dernier rang avec 4,36% et 4,86% respectivement.

2.5. Evaluation du potentiel de biomasse lignocellulosique du palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche* dans la wilaya d'Adrar

Au cours de la prospection sur terrain, nous avons constaté que les palmiers ciblés par l'opération de nettoyage annuelle sont les palmiers productifs seulement.

En se basant sur les résultats obtenus au cours de la prospection sur terrain et les données obtenus auprès de la DSA d'Adrar (DSA, 2021), nous avons pu faire une évaluation approximative du potentiel de la biomasse lignocellulosique phoenicicole générée lors de l'opération de nettoyage annuel des palmiers dattiers (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche* pour la wilaya d'Adrar.

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

Tableau 12 : Evaluation du potentiel de biomasse lignocellulosique du palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche* dans la région Touat, Gourara et Tidikelt par rapport au nombre de palmier productif.

Commune	Takarbouche Nbre productif	Palmes (kg)	Régime (kg)	Pétiole (kg)	Pédoncule du régime (kg)	Spathe (kg)	Fibrilium (kg)	Total (kg)
ADRAR	7750	178676,25	43601,5	50258,75	21523,6875	15093,125	13091,6875	322245
TIMI	13390	308706,45	75332,14	86834,15	37187,3775	26077,025	22619,0575	556756,2
BOUDA	7840	180751,2	44107,84	50842,4	21773,64	15268,4	13243,72	325987,2
FENOUGHIL	2340	53948,7	13164,84	15174,9	6498,765	4557,15	3952,845	97297,2
TAMEST	5710	131644,05	32124,46	37029,35	15858,0975	11120,225	9645,6175	237421,8
TAMENTIT	3200	73776	18003,2	20752	8887,2	6232	5405,6	133056
Z. KOUNTA	3322	76588,71	18689,572	21543,17	9226,0245	6469,595	5611,6885	138128,76
INZEGMIR	0	0	0	0	0	0	0	0
REGGANE	6175	142364,625	34740,55	40044,875	17149,5188	12025,8125	10431,1188	256756,5
SALI	7828	180474,54	44040,328	50764,58	21740,313	15245,03	13223,449	325488,24
AOULEF	795	18328,725	4472,67	5155,575	2207,91375	1548,2625	1342,95375	33056,1
TIMOKTEN	1760	40576,8	9901,76	11413,6	4887,96	3427,6	2973,08	73180,8
TIT	0	0	0	0	0	0	0	0
AKABLI	180	4149,9	1012,68	1167,3	499,905	350,55	304,065	7484,4
TSABIT	1360	31354,8	7651,36	8819,6	3777,06	2648,6	2297,38	56548,8
SBAA	600	13833	3375,6	3891	1666,35	1168,5	1013,55	24948
TIMIMOUN	2003	46179,165	11268,878	12989,455	5562,83175	3900,8425	3383,56775	83284,74
OULED SAID	1760	40576,8	9901,76	11413,6	4887,96	3427,6	2973,08	73180,8
TINERKOUK	8780	202422,9	49396,28	56938,3	24384,255	17099,05	14831,615	365072,4
K. KADDOUR	1085	25014,675	6104,21	7036,225	3013,31625	2113,0375	1832,83625	45114,3
AOUGROUT	6780	156312,9	38144,28	43968,3	18829,755	13204,05	11453,115	281912,4
DELDOUL	5120	118041,6	28805,12	33203,2	14219,52	9971,2	8648,96	212889,6
METARFA	4080	94064,4	22954,08	26458,8	11331,18	7945,8	6892,14	169646,4
CHAROUINE	9650	222480,75	54290,9	62580,25	26800,4625	18793,375	16301,2625	401247
TALMINE	13658	314885,19	76839,908	88572,13	37931,6805	26598,955	23071,7765	567899,64
OULED AISSA	14230	328072,65	80057,98	92281,55	39520,2675	27712,925	24038,0275	591683,4
TOTAL	129396	2983224,78	727981,896	839133,06	359365,041	251998,71	218582,193	5380285,68

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

Tableau 13 : Evaluation du potentiel de biomasse lignocellulosique du palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche* dans la région Touat, Gourara et Tidikelt par rapport au nombre total de palmier

Commune	Takarbouche Nbre existant	Palmes (kg)	Régime (kg)	Pétiole (kg)	Pédoncule du régime (kg)	Spathe (kg)	Fibrilium (kg)	Total (kg)
ADRAR	9400	216717	52884,4	60959	26106,15	18306,5	15878,95	390852
TIMI	20297	467947,335	114190,922	131626,045	56369,8433	39528,4075	34286,7073	843949,26
BOUDA	9850	227091,75	55416,1	63877,25	27355,9125	19182,875	16639,1125	409563
FENOUGHIL	2970	68473,35	16709,22	19260,45	8248,4325	5784,075	5017,0725	123492,6
TAMEST	6840	157696,2	38481,84	44357,4	18996,39	13320,9	11554,47	284407,2
TAMENTIT	4290	98905,95	24135,54	27820,65	11914,4025	8354,775	7246,8825	178378,2
Z. KOUNTA	4750	109511,25	26723,5	30803,75	13191,9375	9250,625	8023,9375	197505
INZEGMIR	1200	27666	6751,2	7782	3332,7	2337	2027,1	49896
REGGANE	9240	213028,2	51984,24	59921,4	25661,79	17994,9	15608,67	384199,2
SALI	11020	254066,1	61998,52	71464,7	30605,295	21461,45	18615,535	458211,6
AOULEF	1920	44265,6	10801,92	12451,2	5332,32	3739,2	3243,36	79833,6
TIMOKTEN	3935	90721,425	22138,31	25518,475	10928,4788	7663,4125	6647,19875	163617,3
TIT	0	0	0	0	0	0	0	0
AKABLI	1250	28818,75	7032,5	8106,25	3471,5625	2434,375	2111,5625	51975
TSABIT	2135	49222,425	12011,51	13845,475	5929,42875	4157,9125	3606,54875	88773,3
SBAA	1120	25821,6	6301,12	7263,2	3110,52	2181,2	1891,96	46569,6
TIMIMOUN	7600	175218	42757,6	49286	21107,1	14801	12838,3	316008
OULED SAID	2440	56254,2	13727,44	15823,4	6776,49	4751,9	4121,77	101455,2
TINERKOUK	13350	307784,25	75107,1	86574,75	37076,2875	25999,125	22551,4875	555093
K. KADDOUR	1550	35735,25	8720,3	10051,75	4304,7375	3018,625	2618,3375	64449
AOUGROUT	10770	248302,35	60592,02	69843,45	29910,9825	20974,575	18193,2225	447816,6
DELDOUL	6360	146629,8	35781,36	41244,6	17663,31	12386,1	10743,63	264448,8
METARFA	6175	142364,625	34740,55	40044,875	17149,5188	12025,8125	10431,1188	256756,5
CHAROUINE	11950	275507,25	67230,7	77495,75	33188,1375	23272,625	20186,5375	496881
TALMINE	17970	414298,35	101099,22	116535,45	49907,1825	34996,575	30355,8225	747192,6
OULED AISSA	25940	598046,7	145938,44	168220,9	72041,865	50518,15	43819,145	1078585,2
TOTAL	194322	4480093,71	1093255,57	1260178,17	539680,775	378442,095	328258,439	8079908,76

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

Le tableau 12 donne une évaluation du potentiel de la biomasse lignocellulosique générée lors du nettoyage annuel des palmiers dattier productifs par commune et par déchet.

Le tableau 13 donne une évaluation du potentiel de la biomasse lignocellulosique qui peut être récupérée si l'opération du nettoyage touche tous les palmiers productifs et non productifs à la fois.

Le nettoyage des palmier dattiers (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche* productifs dans toutes les communes des régions Touat, Gourara et Tidikelt permettra de récupérer **5380285,68kg** de biomasse phoenicicole, en revanche cette quantité pourra augmenter d'environ **50,17%** si l'opération touche les palmiers non productifs à leurs tours. Comme le montre la figure 32, les palmiers dattiers (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche* peuvent générer jusqu'à **8079908,76kg** de biomasse lignocellulosique si le nettoyage s'étend aux palmiers non productifs et ne se limite pas seulement aux palmiers productifs.

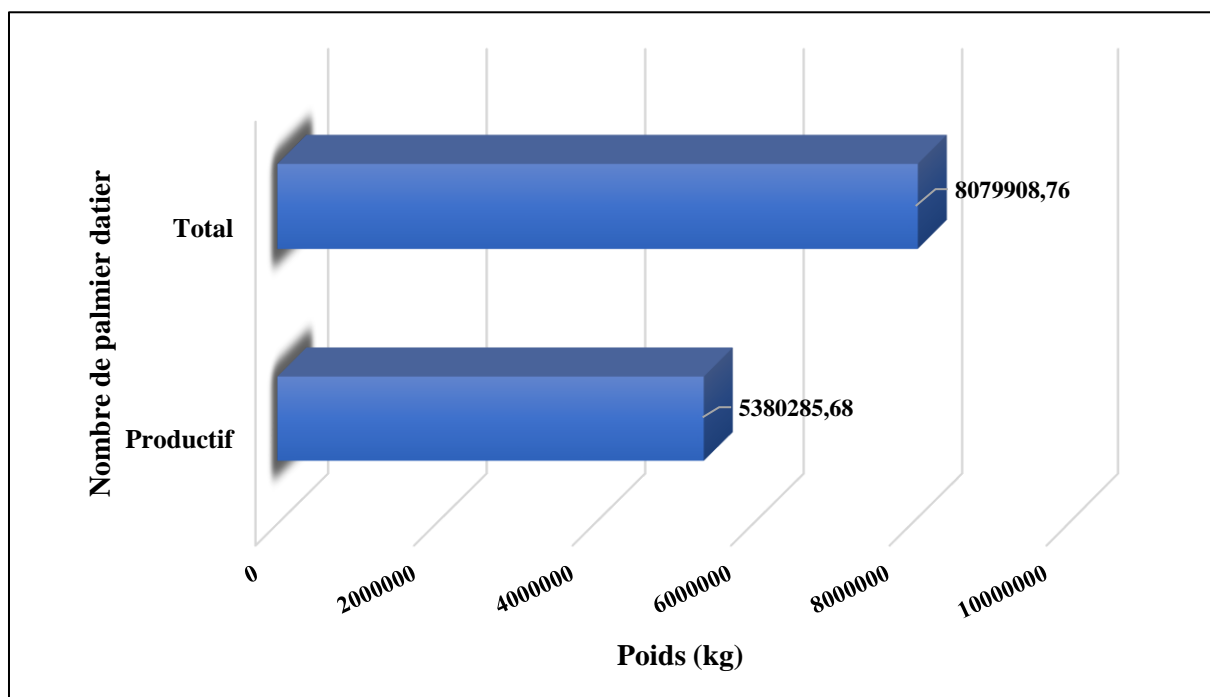


Figure 32 : Potentiel de déchet de palmier estimé au cours du nettoyage annuel pour les palmiers productifs et pour les palmiers totaux (productifs et non productifs) variété *Takarbouche*

3. Caractérisation physico-chimique :

3.1. Densité

Tableau 14 : valeurs de la densité ou masse volumique pour les substrats choisis pour les tests de gazéification

	Sciure de bois	Palme	Régime	Pédoncule du régime	Pétiole
Masse volumique (Kg/m³)	100.77 ± 0.76	271.57±1.45	102.81±0.866	111.417±0.77	124.48±0.556

Selon le tableau 14, les valeurs de la masse volumiques pour les différents substrats varient de 100.77kg/m³ pour la sciure de bois à 271.57 kg/m³ pour les palmes, pour le régime, le pédoncule du régime et la pétiole leur masse volumique est de 102.81 kg/m³, 111.417 kg/m³ et 124.48 kg/m³ respectivement.

Ces valeurs sont conformes à la bibliographie qui donne l'intervalle de la masse volumique apparente des combustibles biomasse entre 100 kg/m³ et 700 kg/m³ (ROGAUME, 2009). La masse volumique des combustibles biomasse est nettement inférieure à celle du charbon dont sa masse volumique moyenne varie entre 600 kg/m³ et 900 kg/m³ (Goudeau, 2001).

3.2. Analyse immédiate de la biomasse phoenicicole

Tableau 15 : Analyses immédiates des déchets de palmier dattier

Déchet	Analyses approximatives			
	H%	Cd%	MV%	CF%
Sciure de bois	5.87 ± 0.13%	0.47±0.12	88.52±0.401	11.009±0.875
Palme	3.32 ± 0.55%	11.70± 0.35 %	85.86±0.55	2.45±0.55
Régime	4.99± 0.10%	2.49± 0.40 %	94.05 ± 0.47	3.46 ± 0.47
Pédoncule du régime	5.61 ± 0.50%	2.76± 0.20 %	91.41±0.63	2.97±0.63
Spathe	5.67± 0.06%	1.99 ± 0.16 %	95.18 ± 1.01	4.13 ± 0.83
Pétiole	5.81± 0.07%	10.10± 0.23%	82.47 ±0.93	11.73 ± 0.93
Fibrilium	4.93± 0.04%	5.13± 0.25 %	89.65±1.33	5.23 ± 1.33
Moyenne	5.03± 0.89%	4.34± 3.56	91.64 ±3.25	3.34 ± 1.20
Mélange réel	5.44± 0.34%	9.08± 0.13 %	83.12±0.51	7.81 ± 0.52
Mélange équitable	5.67± 0.02%	5.59± 0.34 %	88.41±0.32	5.92± 0.32

*H% : taux d'humidité, Cd% : taux de cendre ; MV% : taux de matière volatile ; CF% : taux de carbone fixe.

a) Taux d'humidité (H%) :

Le taux d'humidité est un paramètre très important sur tout dans le cas de la conversion thermique de la biomasse. Selon les résultats présentés dans le tableau 15, le taux d'humidité des déchets lignocellulosiques de palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche*

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

montre une variation peu significative entre les six types de déchets lignocellulosiques collectés, avec une valeur minimale de **3,32%** enregistré pour les palmes sèches du fait que c'est le déchet le plus rapide à sécher, et un taux d'humidité maximal de **5,81%** enregistré pour les pétioles qui sont plus résistant vue leurs texture très épaisse avec une moyenne calculée pour les six types de déchets lignocellulosiques de **5,03%**. Cette même valeur est légèrement supérieure au taux d'humidité enregistré pour le mélange avec les proportions réelles dont la valeur est de **5,44%**. Cependant dans le cas d'un mélange avec des proportions équitables les valeurs sont légèrement supérieures avec une teneur de **5,67%**. Ces valeurs sont intéressantes et proches de la valeur moyenne données par (Bousdira, 2015) pour les déchets phoenicicoles qui est de **6%**.

En comparant ces valeurs avec celle calculée pour la sciure de bois on remarque que l'humidité de la sciure de bois **5,87%** est légèrement supérieure mais reste dans le même intervalle que la moyenne calculée et l'humidité des deux mélanges étudiés. Cette même valeur est proche comparée avec celle déterminée par (Elmay, et al., 2014) pour un échantillon de sciure de bois dont la valeur est de **6,4%**. Cette légère différence dépend de la nature du bois est du climat de la région d'étude aussi car un climat sec absorbe l'humidité de la biomasse contrairement au climat humide.

Les teneurs d'humidité obtenus sont faibles grâce au séchage à l'air libre des déchets lignocellulosiques du palmier dattier. Ces faibles teneurs favorisent la conversion thermique de la biomasse phoenicicole, ce qui permet de maintenir des hautes températures internes du gazéificateur pendant la phase d'évaporation et par la suite accomplir les réactions de réduction et obtenir des rendements thermiques élevés. (Speight, 2020)

b) Taux de cendre (Cd%) :

Les cendres sont les composés inorganiques de la biomasse, leur présence en quantité élevée peut causer de nombreux problèmes, comme la formation de scories qui peuvent causer une difficulté dans le fonctionnement du gazéificateur, et dans des cas graves, elles peuvent boucher les canalisations d'air et par la suite un risque d'explosion (Basu, 2010; Speight, 2020; Kumar, et al., 2014) Une teneur en cendres moindre est préférée dans les matières premières de biomasse, pour cela la détermination du taux de cendre pour un biocombustible est importante (Kumar, et al., 2014).

Le taux de cendre des déchets lignocellulosiques de palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche*, présenté dans le tableau 15, montre une variation très significative entre les six types de déchets collectés, avec une valeur minimale de **1,99%** enregistrée pour la spathe et une valeur maximale de **11,70%** enregistrée pour les palmes sèches qui est identique à celle

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

trouvée par (Sait & Salema, 2015) pour les palmes du palmier dattier saoudien (**11,7%**). Ces résultats sont semblables aux résultats obtenus par (Bousdira, 2015) pour le palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Ghars* ou le taux de cendre minimal est de **4,99%** et le maximale de **11,93%** pour la spathe et les palmes respectivement. La valeur moyenne calculé est **4,34%** cette valeur est nettement inférieure à la valeur déterminée pour le mélange avec les proportions réelles dont la valeur est de **9,08%**. La même observation est notée pour la valeur obtenue pour un mélange équitable de déchets qui est de **5,59%**.

Ces valeurs restent nettement supérieurs comparé à la sciure de bois qui est de **0,47%** dans notre étude et **1,0%** pour l'étude de (Elmay, et al., 2014), mais reste dans la norme comparé à d'autre biomasse comme les déchets de palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Deglet Nour* dont le taux de cendre varie entre **6,18%** pour les pétioles et **20,0%** pour les palmes avec une moyenne de **11,12%** (Bousdira, 2015), le fumier de bétail (**23,5-29,2%**) (Kumar, et al., 2014) et la litière de volaille (**21,63%**) (Jeswani, et al., 2019), ainsi que les algues (*Cladophora glomerata L.*) qui est de **6,54%** (Ebadi & Hisoriev, 2017).

c) Matière volatile (MV%) :

La matière volatile est essentiellement une mesure des gaz non aqueux formés à partir d'un combustible pendant le chauffage à 950°C (Ozbayoglu, 2018). Le taux de matière volatile influe sur les caractéristiques de combustion et favorise l'allumage. De façon générale, à fur et à mesure que le taux de matière volatile diminue et le taux de combustible (rapport combustible= CF/MV) augmente. Le substrat devient plus difficile à enflammer et brûle plus lentement (Miller, 2013).

Le tableau 15 montre que le taux de matière volatile obtenue varie dans un intervalle de **82,47%** enregistré pour les pétioles et **94,05%** pour le régime. La moyenne de matière volatile calculé est de **88,56%** cette valeur est très proche de la valeur obtenue pour la sciure de bois dans cette même étude et qui est de **88,52%**. Pour le mélange réel on a obtenu un taux de matière volatile de **83,12%** qui est inférieur à la moyenne calculée tandis que pour un mélange équitable la valeur est très proche de la sciure de bois avec une valeur de **88,41%**. Les valeurs de matière volatile obtenues lors de cette étude sont supérieures aux valeurs obtenues par (Bousdira, et al., 2014) pour les deux variétés étudiées de palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) *Ghars* et *Deglet Nour* ainsi que ceux calculés pour différentes parties de palmiers dattier (*Phoenix dactylifera L.*) déterminés par (Nasser, et al., 2016). Ces valeurs sont aussi supérieures comparés à d'autre substrat comme la biomasse algale (Ebadi & Hisoriev, 2017), les combustibles fossiles, les boues d'épuration, les bagasses de canne à sucre, les coquilles de noix (Vassilev, et al., 2010). Ce taux élevé de la matière volatile est favorable pour la conversion

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

thermique comme l'a mentionné (Kumar, et al., 2014) une faible teneur en matières volatiles implique une faible réactivité et donc pose des difficultés lors de la gazéification, ce qui entraîne une conversion inefficace et une production élevée de charbon.

d) Carbone fixe (CF%)

Le carbone fixe représente la portion de biocombustible qui doit être brûlée à l'état solide. (K.Sarkar, 2015)

Le taux de carbone fixe illustré dans le tableau 15, montre que les valeurs obtenues lors de cette étude varient dans un intervalle de **2,45%** pour les palmes jusqu'à **11,73%** pour les pétioles avec une moyenne calculé de **3,84%**, cette valeur est inférieure celle obtenue pour un mélange réel (**7,81%**) et pour un mélange équitable (**5,92%**). Ces valeurs sont généralement inférieures à la valeur obtenue pour la sciure de bois (**11,009%**) sauf pour les pétioles.

Pour cette variété de palmier dattier les résultats obtenues sont inférieurs à ceux données par (Bousdira, 2015) et (Nasser, et al., 2016) pour différentes parties de palmier dattier. Cependant ces résultats restent dans l'intervalle défini pour la biomasse qui s'étend de **1** à **38%** (Vassilev, et al., 2010)

3.3. Analyse approximative de la biomasse phoenicicole

Tableau 16 : Analyse approximative des déchets de palmier dattier

Déchet	Analyses ultimes			
	C%	O%	H%	PCS(MJ/kg).
Sciure de bois	46.91	45.59	6.48	18.12
Palmes	37.15	44.03	6.03	11.81
Régime	41.80	48.36	6.69	13.52
Pédoncule du régime	39.21	53.40	8.07	12.74
Spathe	43.40	46.05	6.07	14.42
Pétiole	46.34	32.78	3.62	17.81
Fibrilium	41.62	46.07	6.39	15.65
Moyenne	41.05	47.51	6.61	14.21
Mélange réel	41.30	42.69	5.97	17.04
Mélange équitable	41.73	45.63	6.37	16.12

*C% : taux de carbone ; O% : taux d'oxygène, H% : taux d'hydrogène, PCS : pouvoir calorifique supérieur (MJ/kg).

a) Composition élémentaire

Pour la biomasse lignocellulosique phoenicicole les principaux composant élémentaire sont le carbone l'oxygène et l'hydrogène.

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

Comme il est indiqué dans le tableau 16, la teneur en carbone varie dans un intervalle de **37,15%** pour les palmes à **46,34%** pour les pétioles, avec une moyenne calculée de **41,05%**. Le taux de carbone dans un mélange réel et celui dans un mélange équitable est proche de la moyenne calculée avec des valeurs de **41,30%** et **41,73%** successivement. Les valeurs obtenues se situent de près entre celle de l'écorce du gommier rose **37,33%** (Silva, et al., 2019) et celles du kénaf (*Hibiscus cannabinus L.*) **48,4%** (Vassilev, et al., 2010)

La biomasse est le plus riche combustible en oxygène, cependant ce dernier, n'apporte aucune contribution utile au pouvoir calorifique (Basu, 2013). Pour notre présente étude la teneur en oxygène varie dans un intervalle de **32,78%** pour les pétioles à **53,40%** pour les pédoncules du régime, avec une moyenne calculée de **47,51%**. Le taux d'oxygène dans un mélange réel et celui dans un mélange équitable est inférieurs à la moyenne calculée avec des valeurs de **42,69%** et **45,63%** successivement. Ces valeurs expérimentales se situent entre celles de l'écorce de mélèze (**32,0%**) (Vassilev, et al., 2010) et la base des palmes de palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) cultivar Sukkari (**53,62%**) (Nasser, et al., 2016)

Pour les six types de déchets lignocellulosiques analysés le taux de carbone est inférieur au taux d'oxygène à l'exception des pétioles où on a noté que le taux de carbone est nettement supérieur à celui de l'oxygène. Ces résultats sont compatibles avec ceux donnés par (Nasser, et al., 2016) pour la majorité des déchets lignocellulosiques des palmier dattier et (Makkawi, et al., 2019) pour les palmes et le régime. Cependant les résultats obtenus par (Bousdira, 2015), (Sait, et al., 2012) et (Mohammed, et al., 2011) montrent un aspect inverse où le taux de carbone est supérieur à celui de l'oxygène. Cette différence de composition est due à la différence de variété de palmier dattier étudié.

La teneur en hydrogène varie dans un intervalle de **3,63%** pour les pétioles à **8,073%** pour les pédoncules du régime, avec une moyenne calculée de **5,96%**. Le taux d'hydrogène dans un mélange réel est presque le même de la moyenne calculée avec une valeur de **5,97%**, tandis qu'il est proche du taux d'un mélange équitable **6,37%**. Les valeurs obtenues sont conformes à la bibliographie qui détermine l'intervalle de la teneur en hydrogène entre **3** et **11%** pour la biomasse (Vassilev, et al., 2010)

3.4 Rapport atomique :

Tableau 17 : Rapport atomique

Rapport atomique	Déchet									
	Sciure de bois	Palmes	Régime	Pédoncule du régime	Spathe	Pétiole	Fibrilium	Moyenne	Mélange réel	Mélange équitable
H/C	0.14	0.16	0.16	0.21	0.14	0.08	0.15	0.16	0.14	0.15
O/C	0.97	1.19	1.16	1.36	1.06	0.71	1.11	1.16	1.03	1.09

*H/C : rapport hydrogène/carbone ; O/C : rapport oxygène/ carbone

Les rapports atomiques d'un carburant diminuent avec l'augmentation de son âge géologique, et par conséquent, sa teneur en énergie augmente. (Basu, 2013)

Le tableau 17 présente des rapports H/C qui varient dans un intervalle entre **0,08** pour les pétioles et **0,21** pour les pédoncules du régime avec une moyenne calculé de **0,16**

Le mélange réel présente un rapport identique à celle de la sciure de bois (**0,14**) et légèrement inférieur à la valeur obtenue pour un mélange équitable (**0,15**)

Le rapport O/C montre des valeurs situées entre **0,71** pour les pétioles et **1,36** pour les pédoncules du régime avec une moyenne calculé de **1,16**

Le mélange réel inférieur à la moyenne (**1,03**) et à la valeur obtenue pour le mélange équitable (**1,09**). Le rapport atomique O/C de la sciure de bois (**0,97**) calculé au cours de cette étude et presque similaire à celui obtenu par r (Elmay, et al., 2014) (**0,99**). À l'exception des pétioles, les rapports atomiques O/C des déchets lignocellulosiques du palmier dattier restent supérieures à celle de la sciure de bois

En générale le rapport O/C présente des valeurs supérieures au rapport H/C pour les déchets de palmier dattier ainsi que pour la sciure de bois. Cet aspect est identique à celui défini dans la bibliographie pour différentes biomasses.

Des teneurs élevées en oxygène et en hydrogène de la biomasse indiquent des rendements volatils et liquides élevés. La teneur élevée en oxygène consomme une partie de l'hydrogène ce qui implique une formation de l'eau qui n'est pas bénéfique dans le cas des conversions thermochimiques, par conséquent la teneur élevée en H/C se traduit pas par un rendement en gaz moins élevé. (Basu, 2013)

e) Pouvoir calorifique supérieur (PCS)

Le pouvoir calorifique de la biomasse est une indication directe de la quantité d'énergie stockée par unité de masse de biomasse exprimé en mégajoule/kilogramme (MJ/kg) (Tumuluru, 2018).

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

Le pouvoir calorifique des déchets lignocellulosiques du palmier dattier varie de **11,81(MJ/kg)** pour les palmes à **17,81 (MJ/kg)** pour les pétioles avec une moyenne calculée de **14,21 (MJ/kg)**. Le mélange réel présent un pouvoir calorifique supérieur à la moyenne calculée avec une valeur de **17,04 (MJ/kg)** tandis que le mélange équitable donne une valeur de **16,12 (MJ/kg)**. Bien que ces valeurs soient supérieures à la moyenne calculée, elles restent inférieures celle obtenue pour la sciure de bois (**18,12 MJ/kg**). Cela signifie que le potentiel énergétique issu de sciure de bois est supérieur celui de la biomasse issue de palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche*.

Le tableau 18 montre une comparaison entre les valeurs du pouvoir calorifique obtenues lors de cette étude et celle d'études réalisées avec d'autres biomasses.

Tableau 18 : Comparaison des valeurs du pouvoir calorifique obtenues avec d'autres études

Substrat	Pouvoir calorifique (MJ/kg)	Référence
Déchets de palmier dattier (Takarbouche)	11,81 – 17.81	Notre étude
Bois	11,86	(Tumuluru, 2018)
Tige de Cotton	16,90	(Adhikari, et al., 2018)
Eau usée	19,9	(Basu, 2010)
Déchet de journaux	16	(Sarkar, et al., 2017)
Déchet de palmier dattier (Deglet Nour)	18,78±0,20	(Bousdira, 2015)
Déchet de palmier dattier (Ghars)	17.30±0,55	(Bousdira, 2015)

En comparant les valeurs du pouvoir calorifique obtenue avec celle de différentes biomasses utilisées comme biocombustible, on trouve que les valeurs obtenues varient dans un large intervalle qui touche plusieurs substrats cités dans la bibliographie

Cependant malgré cette différence, les valeurs obtenues indiquent que la biomasse phoenicicole possède un potentiel énergétique intéressant à exploiter

4. Tests de gazéification :

4.1. Évolution de la température en fonction du temps

a. Prototype préliminaire

Le fonctionnement du prototype préliminaire est testé en utilisant de la sciure de bois collectée auprès des menuisiers locaux comme combustible. La température est mesurée en deux points à l'aide d'un thermocouple sonde de type k haute température (1100°C) situé à **20cm** au-dessus du lit de substrat et un thermocouple en céramique de type k haute température (+1260°C) situé près de l'ouverture de sortie du gaz de synthèse avec un intervalle de temps de 5 sec (Salem & Kalloum, 2017).

La figure 33 illustre l'évolution des températures à l'intérieur du gazéificateur au niveau de la zone d'oxydation (T_1) et celle du gaz de synthèse produit (T_2) en fonction du temps pour deux essais de gazéification

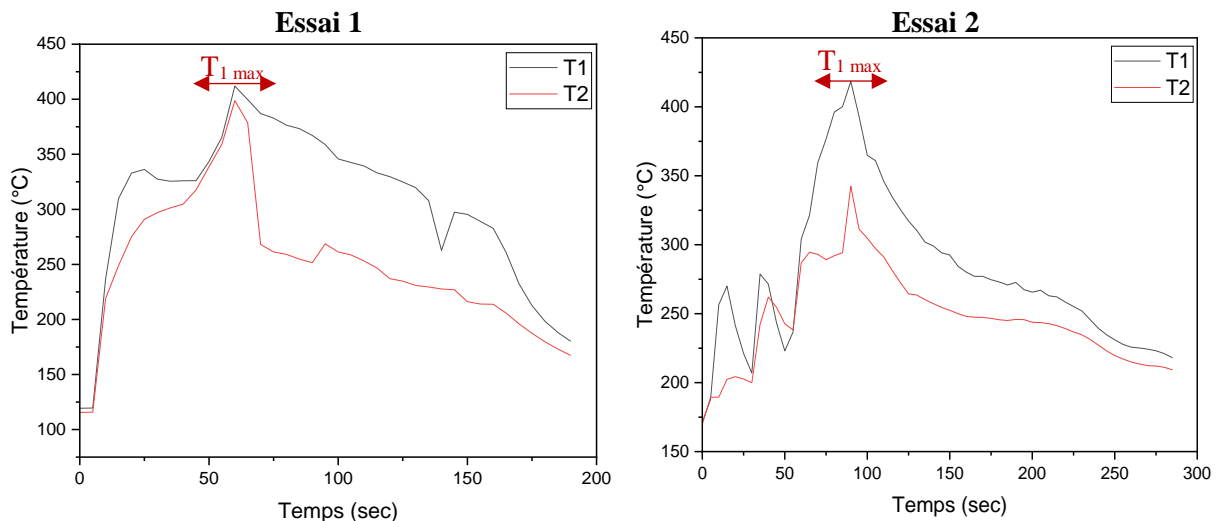


Figure 33 : Evolution de la température au cours de la gazéification

Pour les deux essais de gazéification. L'évolution de la température du solide est toujours supérieure à celle du gaz de synthèse produit. Le suivi des températures commence une fois la flamme maintenue à l'intérieur du gazéificateur. Pour les deux essais de gazéification une température d'environ 420°C est atteinte au niveau de la zone d'oxydation. Pour le gaz de synthèse produit la température varie entre 400° et 340°C ce qui est conforme à la littérature don l'intervalle est entre 200° et 400°C (Lin, et al., 2006)

b. Prototype amélioré

Le fonctionnement du prototype amélioré est testé en utilisant de la sciure de bois comme combustible en premier temps puis avec la biomasse lignocellulosique phoenicicole. Les tests de gazéification avec les déchets de palmiers dattier sont réalisés en utilisant quatre déchets des six identifiés lors du tris à savoir : les palmes sèches, pétioles régimes et pédoncules du régime. Ce choix est basé sur la quantité de déchets générée annuellement par palmier qui demeure nettement supérieur aux deux déchets écartés à savoir la spathe et le fibrilium. Ce dernier, dont la valorisation comme matériau isolant reste un choix plus favorable grâce à ses caractéristiques thermique. La température est mesurée au niveau de cinq points répartis tout au long du gazéificateur avec 10cm d'écart dont le premier point (T1) se situe à 10cm au-dessus du lit de substrat à l'aide de thermocouple sonde de type k haute température avec un intervalle de temps de 5 sec. Pour chaque substrat deux essais de gazéification sont réalisés.

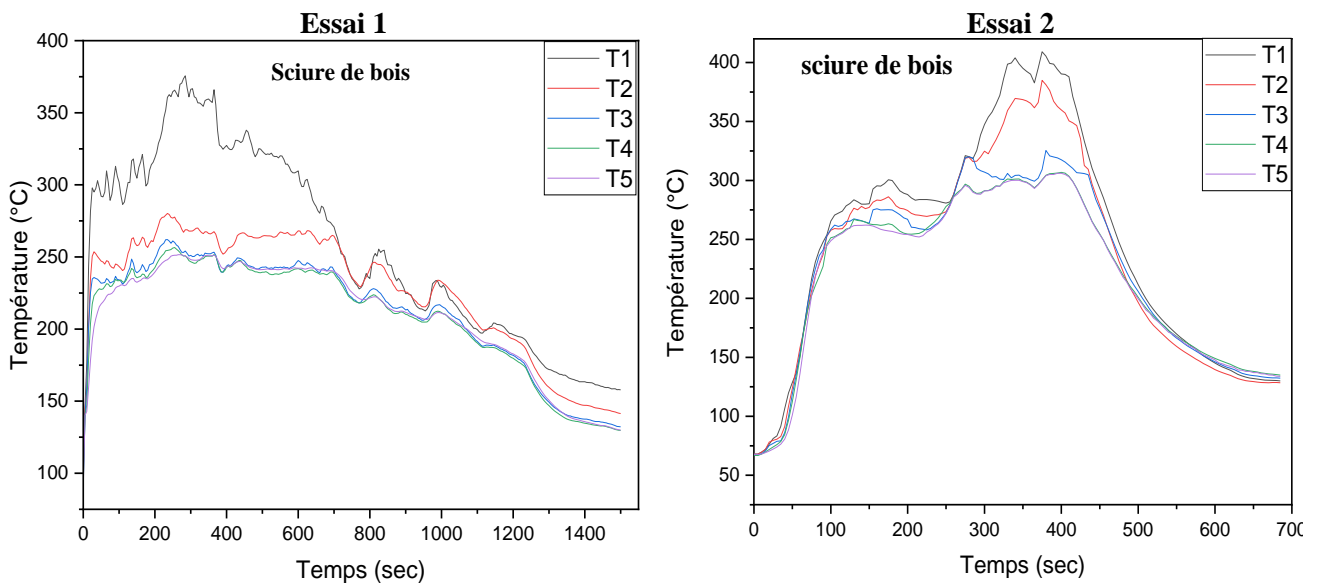


Figure 34 : Evolution de la température en fonction du temps pour la sciure de bois

La figure 34 illustre l'évolution de la température l'intérieur du gazéificateur en fonction du temps pour la sciure de bois. On peut facilement distinguer une évolution progressive de la température pour atteindre une valeur maximale de **375°C** pour le premier essai et **409°C** pour le deuxième essai. Pour les deux essais, la température maximale est enregistrée au niveau du point T1 qui se situe dans la zone d'oxydation. Cette valeur diminue avec le temps vu la consommation du substrat jusqu'à atteindre des valeurs très proche de T2. Pour le point de

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

mesure T2 qui se situe dans la zone de pyrolyse la température à atteint une valeur maximale de **275°C** pour le premier essai et **384°C** pour le deuxième essai. Puis on remarque une certaine stabilité jusqu'au point ou T2 est identique à T1 puis les deux températures diminuent progressivement en suivant la même allure avec des valeurs très proches.

Pour l'essai 2 on remarque que l'évolution de la température a légèrement régressée entre le point **130sec** et **270sec** cela est due à un problème technique au cours de l'expérience.

La température au point T5 correspond à la température se sortie du gaz de synthèse, sa valeur maximum varie entre **251°C** pour l'essai 1 et **306°C** pour l'essai. Pour les ponts de mesure T3 et T4 les températures maximales enregistré pour les essais 1 et 2 sont respectivement **261°C** et **319°C** pour T3, **256°C** et **306°C** pour T4.

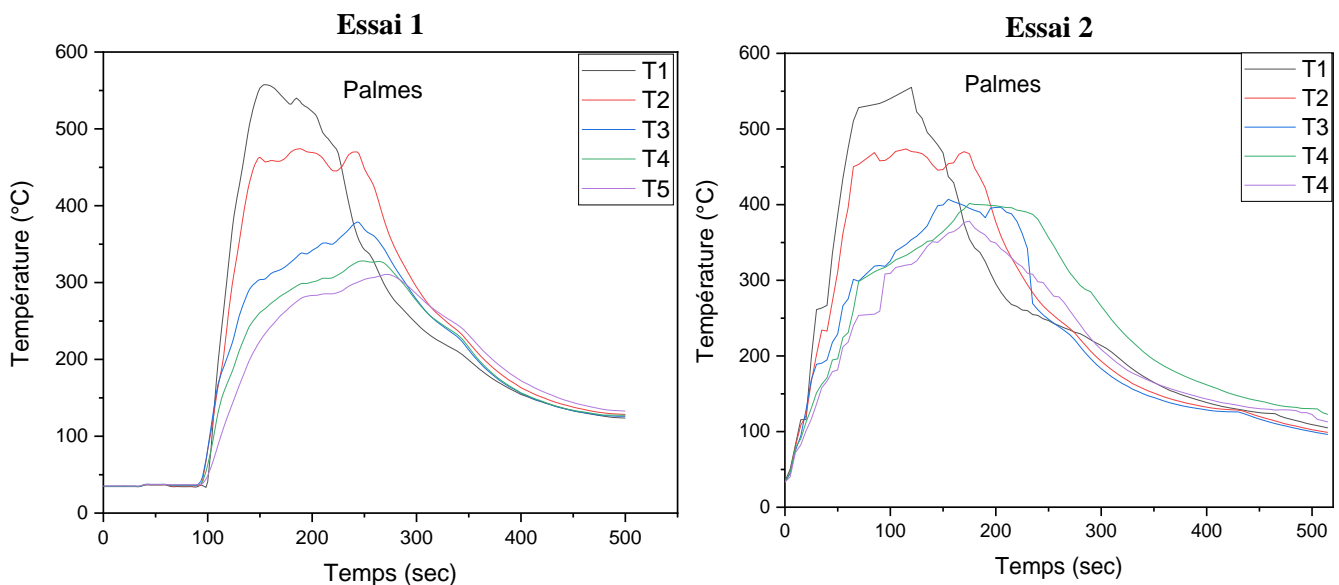


Figure 35 : Evolution de la température en fonction du temps pour les palmes

Selon la figure 35, la température des palmes sèches du palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche* évolue progressivement pour les cinq points de mesure pour atteindre une température max de **557°C** à 10cm du lit de séchage (zone d'oxydation) pour l'essai 1 et **554°C** pour le deuxième essai. Pour le point de mesure T2 la température maximum enregistré est de **473°C** pour le premier essai et **472°C** pour le deuxième essai. La température diminue par la suite pour atteindre une valeur de **378°C** pour le premier essai et **407°C** pour l'essai 2 au niveau du point T3.

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

Au niveau du point T4 la température maximum enregistrée est de **328°C** et **401°C** pour le premier et deuxième essai respectivement. Pour le gaz produit, la température maximale est de **310°C** pour le premier essai est **378°C** pour le deuxième essai.

La température d'oxydation des palmes de palmier dattier (*Phoenix dactylyfera* L.) variété *Takarbouche* est très semblable à la température mentionnée par (Bousdira, 2015) pour les palmes sèches des deux cultivars *Deglet Nour* et *Ghars*.

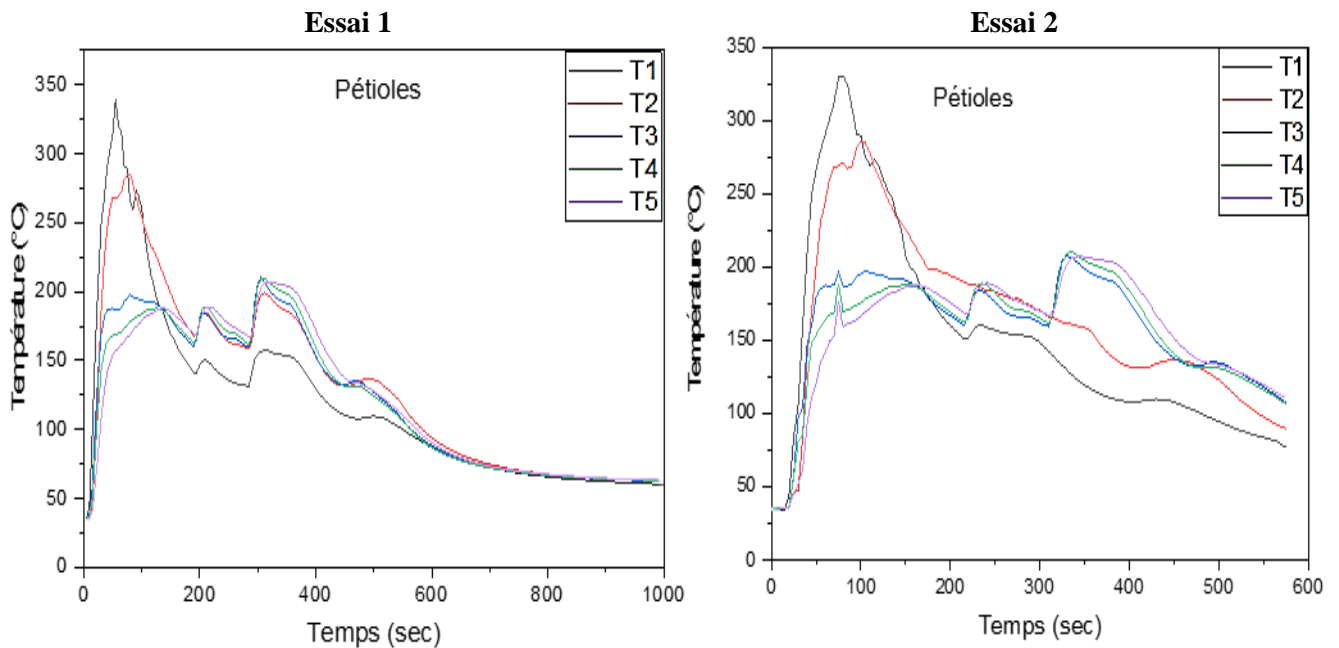


Figure 36 : Evolution de la température en fonction du temps pour les pétioles

La figure 36 illustre les résultats des tests de gazéification pour les pétioles. La température d'oxydation T1 maximale enregistré est de **339°C** pour le premier essai et **330°C** pour le deuxième essai. Pour le point de mesure T2 une température de **285°C** est enregistré pour les essais de gazéification. Une valeur maximale de **210°C** pour le premier essai et **207°C** pour le deuxième essai sont notés au point T3. Pour le point T4 la température maximale est **208°C** et **210°C** pour les essais 1 et 2 respectivement.

La température maximale du gaz produit mesurée au niveau du point T5 est identique pour les deux essais de gazéification avec une valeur de **207°C**.

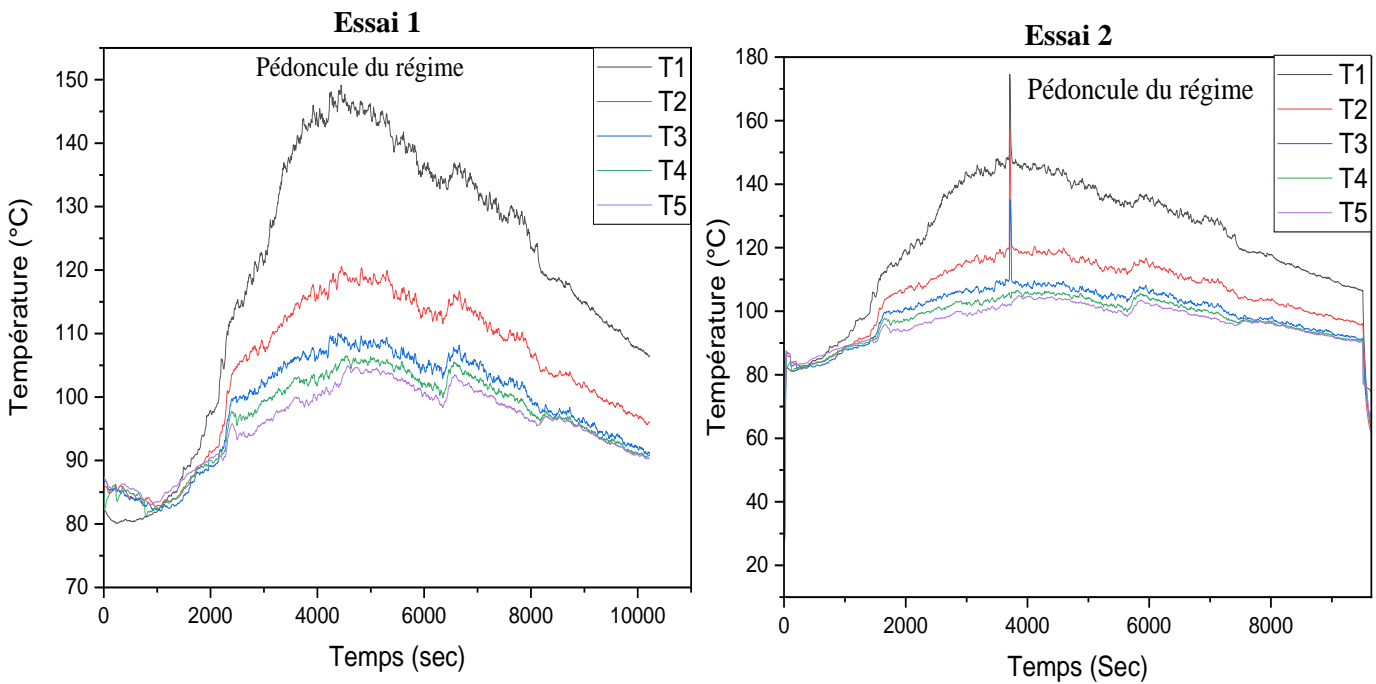


Figure 37 : Evolution de la température en fonction du temps pour les pédoncules du régime

Pour le test de gazéification des pédoncules du régime, les résultats des tests sont présentés dans la figure 37. On remarque que l'allure générale des graphes obtenue ne diffère pas des autres substrats cependant le temps de la réaction est quasiment plus long et les températures plus basses, ou on peut voir que la température maximale enregistrée dans la zone d'oxydation (T1) ne dépasse pas les **149°C** tandis que la température maximale du gaz produit n'a pas dépassée les **104°C**. pour les autres points de mesure T2, T3 et T4 on a enregistré une température maximale de **120°C**, **110°C** et **106°C** respectivement. Cette marge de température est largement inférieure comparée aux autres substrats testés précédemment. Pour le deuxième essai on remarque une brusque augmentation de la température pour atteindre **174°C**

La température d'inflammation des pédoncules du régime est faible comparée à celle enregistré pour les palmes et les pétioles, elle varie entre **149°C** et **174°C**. Selon (Bousdira, 2015) cette faible température peut être due à la prédominance de l'hémicellulose, qui est très instable thermiquement, dans ce substrat.

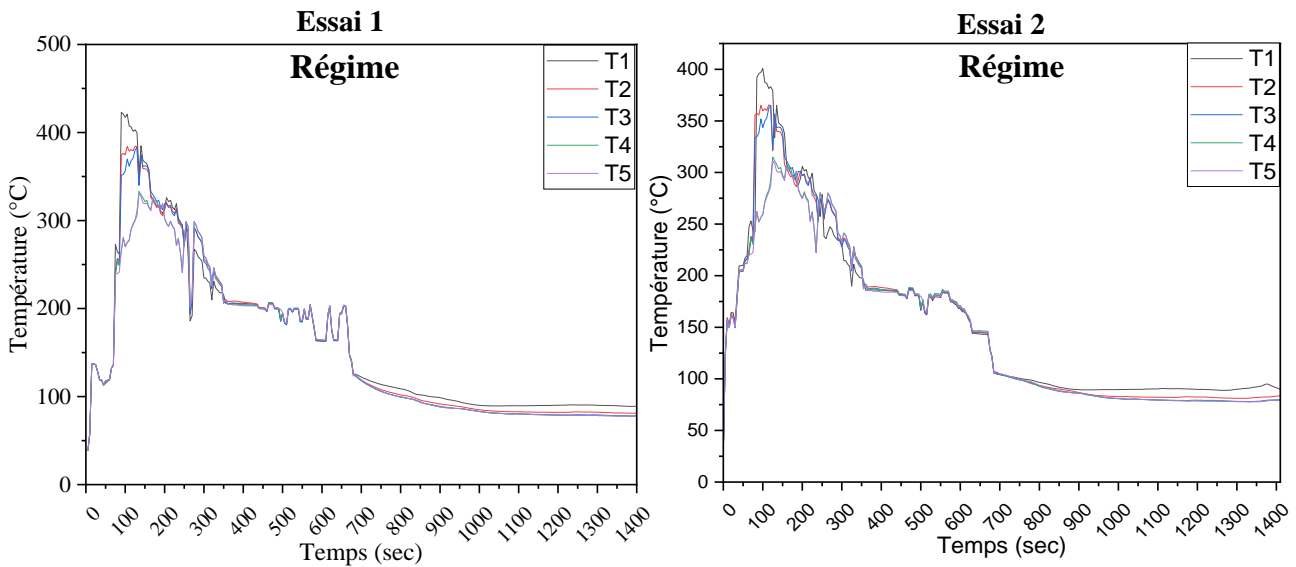


Figure 38 : Evolution de la température en fonction du temps pour le régime

La figure 38 illustre les tests de gazéification du régime. On remarque que l'allure générale des graphes obtenue ne diffère pas des autres substrats, les températures maximales enregistrées sont proches de celles des pétioles et inférieures aux températures des palmes. La température maximale enregistrée dans la zone d'oxydation (T1) est 423°C et 400°C pour les essais 1 et 2 respectivement. Tandis que la température maximale du gaz produit a atteint 327°C pour le premier essai est 311°C pour le deuxième essai. Pour les autres points de mesure T2, T3 et T4 on a enregistré une température maximale de 384-365°C, 380-364°C et 332-314°C respectivement pour les essais 1 et 2

Pour le premier essai il est à noter que l'expérience démarrée juste après un essai non réussit, donc on a utilisé l'air du compresseur pour diminuer la température qui était élevée et évacuer les gaz produits lors de l'expérience.

Le profile générale de température pour les essais de gazéification au cours de cette étude sont cohérents pour une gazéification l'air, et nous arrivons bien à distinguer les principales zones de réaction (séchage, pyrolyse, réduction et oxydation). Selon la littérature, le gazéificateur à lit fixe up draft a la température de sortie du gaz de synthèse la plus basse comparée aux autres modèles (Basu, 2013), pour les palmes, pétioles, régime ainsi que notre substrat de référence la sciure de bois la température de sortie du gaz produit se situe dans l'intervalle donné par la bibliographie entre 200 et 400°C. ce pendant les pédoncules du régime

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

présent un profil de température plus bas comparé aux autres substrat, cela est due la faible température de réaction enregistrée l'intérieur du gazéificateur pour ce type de substrat.

4.2. Évolution de la température en fonction de la hauteur

La figure 39 montre le profil axial de l'évolution de la température pour le substrat sciure de bois. La température atteint sa valeur maximal à 10cm au-dessus du lit qui présente la zone d'oxydation (point T1) puis déminue progressivement en s'éloignant de cette zone.

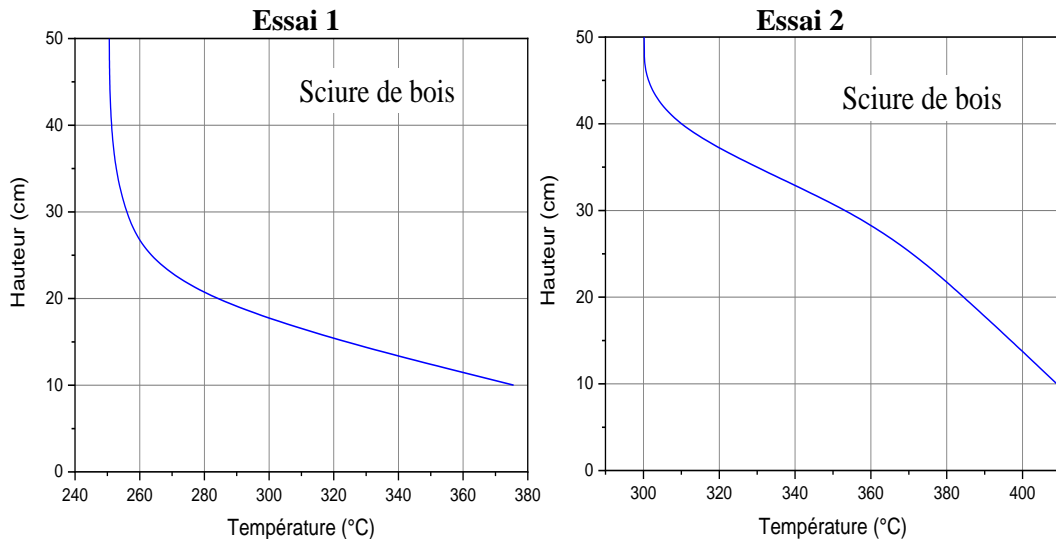


Figure 39 : Température en fonction de la hauteur pour le substrat sciure de bois

Une légère différence est notée entre les deux essais effectués, cette différence est due à un problème technique qui a surgie au cours du teste comme on l'a noté précédemment.

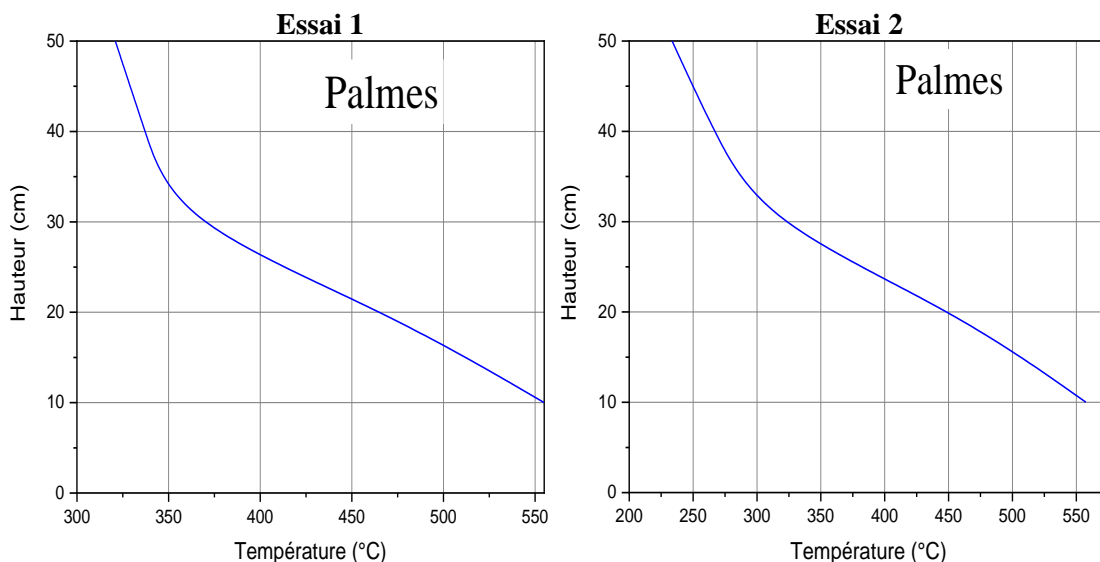


Figure 40 : Température en fonction de la hauteur pour le substrat palmes

La figure 40 montre l'évolution de la température en fonction de la hauteur pour les palmes sèches.

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

La température déminue progressivement en s'éloignant du point de mesure T1 (zone d'oxydation) jusqu'à atteindre sa valeur minimale au point T5 (sortie du gaz de synthèse), l'allure générale pour les deux essais est presque identique et les températures dans la zone d'oxydation pour les deux essais sont très proches est conformer à la littérature.

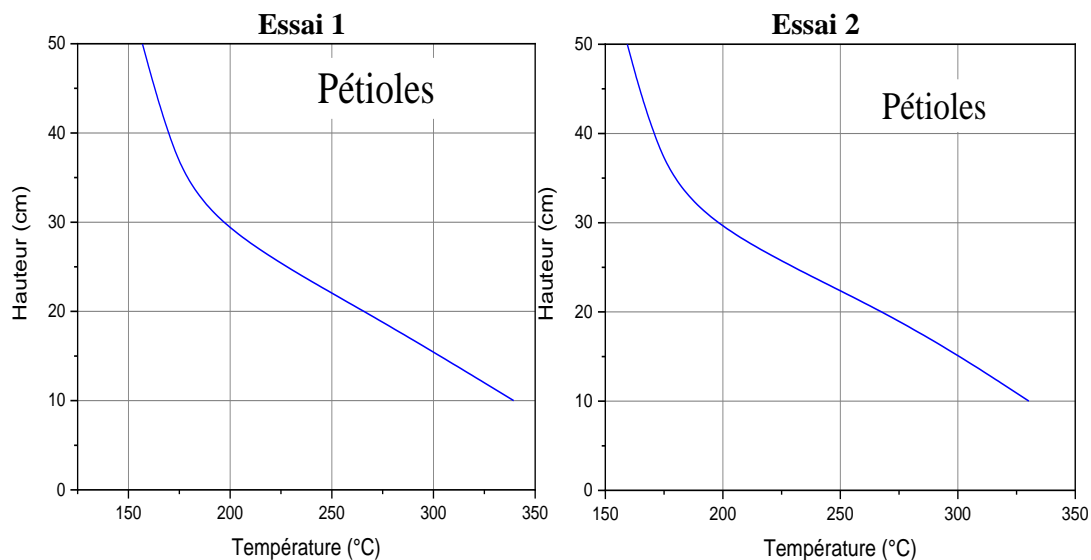


Figure 41 : Température en fonction de la hauteur pour le substrat pétioles

La figure 41 montre le profile axial de la température pour les pétioles. La température déminue progressivement en se dirigeant du point de mesure T1 (zone d'oxydation) vers le point T5 (sortie du gaz de synthèse). Les graphes des deux essais sont semblables et leur allure générale est la même que pour les autres substrats testés.

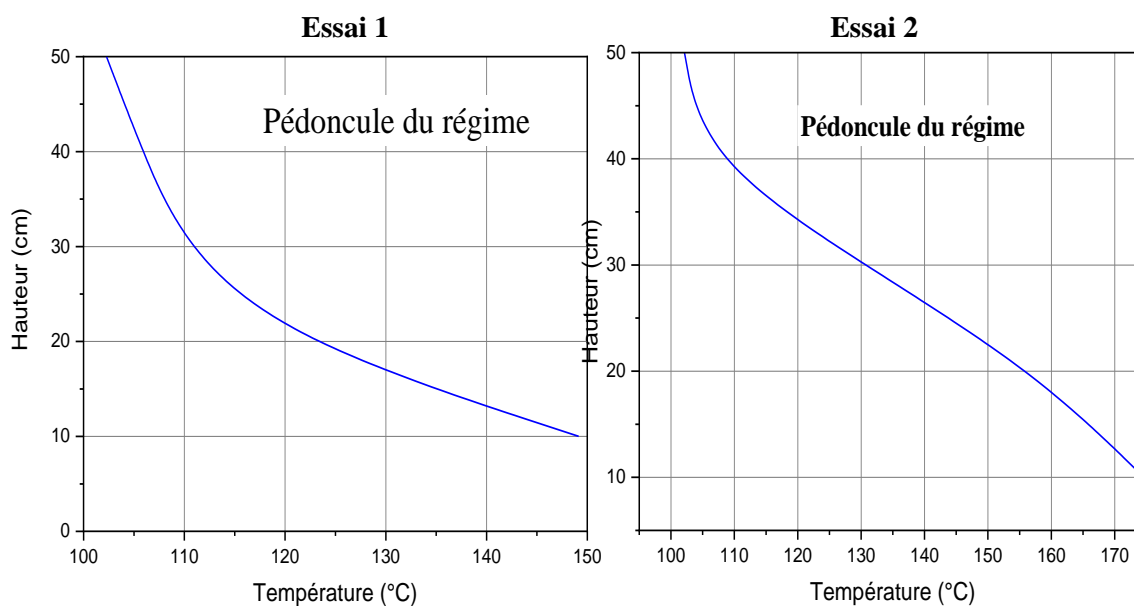


Figure 42 : Température en fonction de la hauteur pour le substrat pédoncule du régime

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

La figure 42 montre l'évolution de la température en fonction de la hauteur pour les pédoncules du régime. Le profile générale ne diffère pas de celui obtenu avec les autres substrats, la température maximale est enregistrée au niveau de la zone d'oxydation puis elle déminue progressivement en se dirigeant vers le point T5 (sortie du gaz de synthèse)

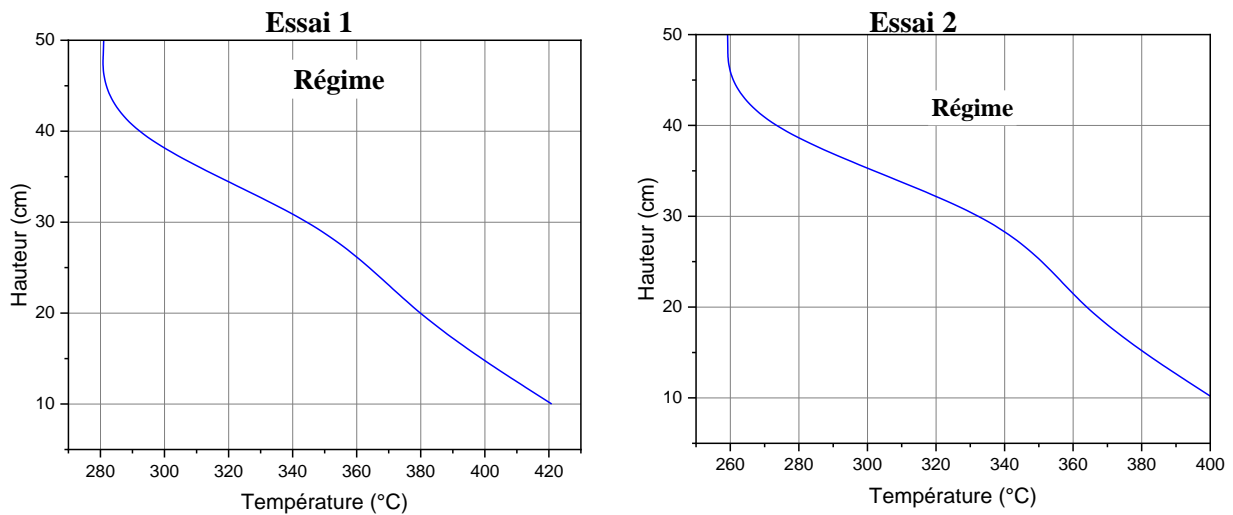


Figure 43 : Température en fonction de la hauteur pour le régime

La figure 43 montre l'évolution de la température en fonction de la hauteur pour le régime. Le profile générale ne diffère pas de celui obtenu avec les autres substrats, la température maximale est enregistrée au niveau de la zone d'oxydation puis elle déminue progressivement en se dirigeant vers le point T5 (sortie du gaz de synthèse)

L'allure générale de l'évolution de la température en fonction de la hauteur montre une grande semblance pour tous les substrats testés. Cette allure est compatible avec la bibliographie et les études déjà faites. La température maximale est enregistrée au points T1 à 10 cm du lit qui est la zone d'oxydation. La majorité des réactions endothermiques se déroulent de cette zone, la température diminue progressivement en s'éloignant de cette zone. La température à 50cm du lit (point T5) représente la température de gaz de synthèse produit, sa valeur est nettement inférieure à la température d'oxydation mais figure dans l'intervalle donné par la littérature pour la gazéification de la biomasse avec l'air comme agent de gazéification.

4.3. Système d'épuration



Photo 26 : Récupération du goudron éliminé par le système d'épuration cyclone

Lors de notre étude on a opté pour une méthode d'épuration physique simple en utilisant un cyclone. Le système cyclone a permis de récupérer une partie du goudron produits lors des essais de gazéification comme on peut le voir sur la photo 26, cependant cette récupération n'est pas totale car une partie du goudron sort avec le gaz de synthèse. D'un autre côté on a remarqué que la quantité produite par les palmes était supérieur à celle des pétioles, en revanche pour les essais avec le régime et les pédoncules du régime, la quantité du goudron était moins élevé et le système n'as pas pu le condensé. Cela est dû à la faible température enregistrée pour ces deux substrats comparés à celle noté pour les palmes et les pétioles. D'après l'étude de (Zhou, et al., 2018) sur la gazéification des branches de *Camellia sinensis* dans un gazéificateur à lit fixe, la concentration du goudron augmente avec la température. Cependant une température très élevée entraîne soit une réduction progressive, soit une élimination complète des goudrons contenant des composés ramifiés ou hétéroatomiques (Chan & Tanksale, 2014), l'expérience de (Feng, et al., 2017) a abouti à la même conclusion et a montré une réduction du goudron de 26,18 % à 500 °C jusqu'à 6,38 % à 900 °C.

4.4. Test de l'inflammabilité du gaz de synthèse

a. Prototype préliminaire

Comme on peut le voir dans la photo 27, le gaz de synthèse produit durant le teste du prototype préliminaire avec de la sciure de bois est un gaz inflammable chargé en particules et contient du goudron, deux composants indésirables qu'on doit envisager d'éliminer.

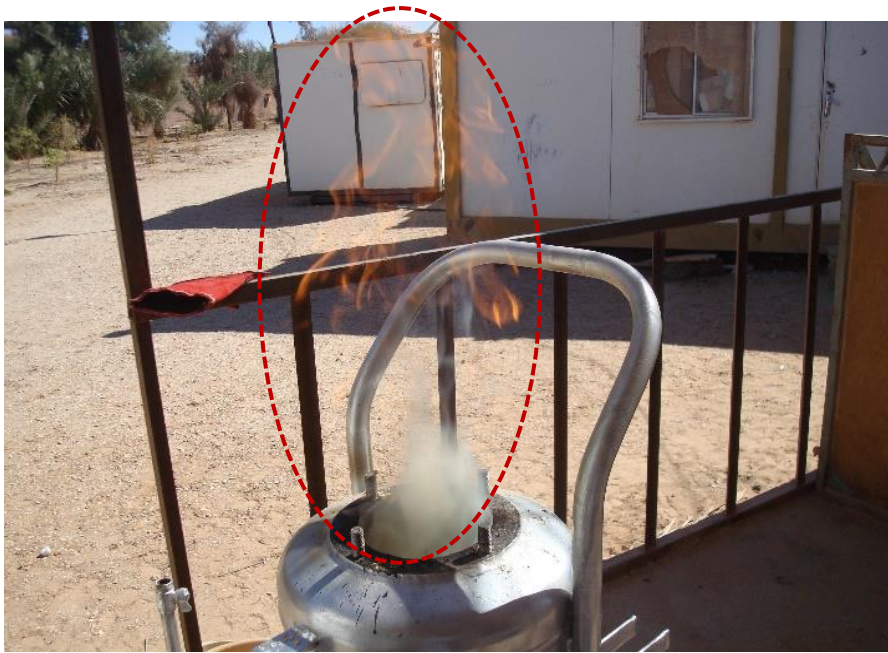


Photo 27 : Test d'inflammabilité pour la gazéification de la sciure de bois

b. Prototype amélioré

Pour le test avec la sciure de bois le test était identique à celui avec le prototype préliminaire, le gaz produit était très inflammable avec une flamme persistante de plus d'une minute.

Pour les tests avec les déchets de palmier dattier le gaz produit avait un degré d'inflammabilité qui varié d'un déchet l'autre. Pour les palmes le gaz produit était très inflammable avec une flamme nette et persistante, de même pour le gaz produit à partir du régime bien que la flamme fût légèrement moindre.

Le gaz produit suite à la gazéification des pétioles ainsi que celui produit des pédoncules du régime étaient inflammables, cependant ce dernier était peu inflammable comparé aux autres substrats. La photo 28 montre la différence entre les flammes du test d'inflammabilité pour les quatre substrats utilisés lors des tests de gazéification.

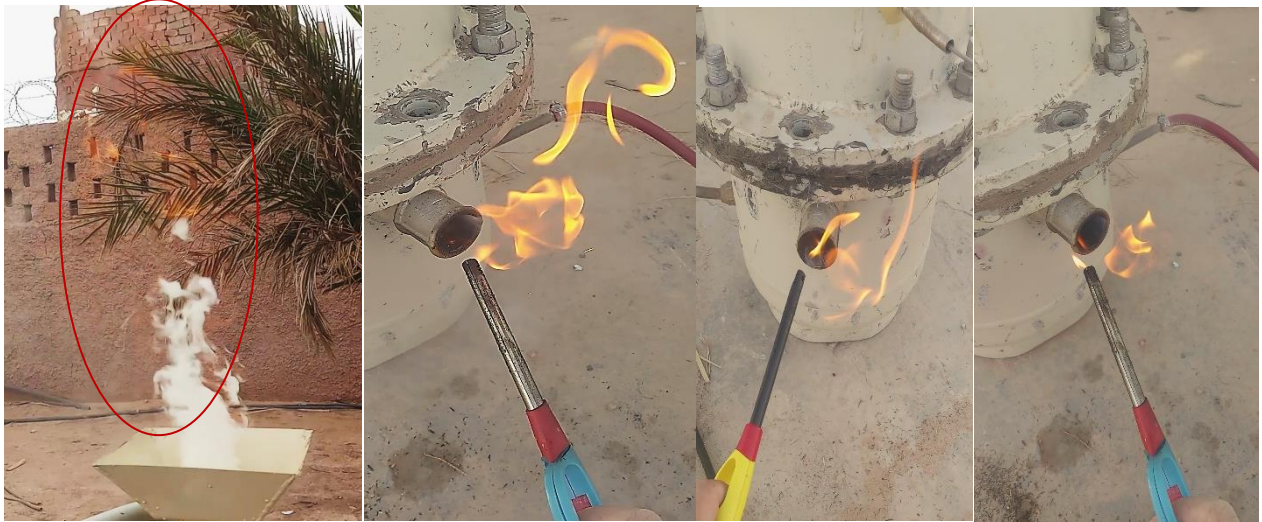


Photo 28 : Test d'inflammabilité, de gauche à droite, palmes, régime, pétiole, pédoncule du régime

Selon la littérature, une température de gazéification élevée implique une augmentation de la quantité du gaz produit, aussi elle influe sur sa composition car elle permet d'augmenter le taux de H_2 dans le gaz de synthèse et diminue le taux de CO et des hydrocarbures légers ; en revanche, selon les modèles thermodynamiques, des températures de réaction très élevées conduisent à une diminution régulière du rendement en H_2 (Bermudez & Fidalgo, 2016; Fuchs, et al., 2020). Les résultats de nos tests montrent clairement cette relation entre la composition et la température en termes d'inflammabilité du fait que les deux éléments inflammables dans le gaz de synthèse sont le méthane et l'hydrogène. On remarque que le gaz produit à partir du substrat dont la température de gazéification est la plus élevée est très inflammable avec une flamme persistante, et avec la diminution de la température de gazéification l'inflammabilité diminue.

4.5. Taux de conversion de la biomasse

Le temps de gazéification influe positivement sur la production du gaz de synthèse ; plus le temps de gazéification est long, plus la production de gaz est importante (Sulaiman, et al., 2019), cela signifie une augmentation du taux de conversion de la matière première, bien sûr en prenant en compte la masse de substrat utilisé.

a. Prototype préliminaire

Le test de gazéification avec le prototype préliminaire et la sciure de bois comme substrat a permis d'atteindre un taux de conversion de plus de **87%** du volume total de notre substrat

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

b. Prototype amélioré

Le test de gazéification avec le prototype amélioré et la sciure de bois comme substrat a permis d'atteindre un taux de réduction de plus de **89%** de volume total de notre substrat après 3h de réaction cette valeur est augmentée pour atteindre 91% après 5h pour une masse initiale de 1Kg.

Le tableau 17 montre l'évolution du taux de conversion en fonction du temps de séjours pour chaque les quatre déchets de palmier dattier utilisés lors des tests de gazéification.

Tableau 19 : Taux de conversion en fonction du temps de séjour :

N°	Substrat	Temps de séjour	Taux de conversion
1.	Palmes	3h	75%
		5h	94%
2.	Pétioles	4h	74.5%
		6h	95%
3.	Pédoncule du régime	4h	70%
		6h	89%
4.	Régime	4h	72%
		6h	90.5%

Pour les quatre déchets lignocellulosique phoenicicole, le taux de conversion est intéressant et varie de 70% à 75%. Le temps de séjour influe sur le taux de conversion des déchets de palmier dattier et permet d'augmenter considérablement ce taux. Pour les palmes, un taux de 75% est enregistré après 3h de réaction cette valeur augmente pour atteindre 94% après 5h de réaction. Pour les pétioles, les pédoncules de régime et le régime un taux de conversion de 74.5%, 70% et 72% respectivement est enregistré après 4h de gazéification, ces valeurs augmentent après 6h de réaction pour atteindre 95% ; 89% et 90.5% respectivement. Le tout pour une masse initial de substrat de 1kg.

La photo 29 montre l'aspect général final à la fin de la gazéification, ou on peut remarquer une conversion presque totale de notre substrat.



Photo 29: Aspect générale du substrat à la fin de la gazéification

5. Estimation de la composition du gaz de synthèse en utilisant un modèle thermodynamique :

5.1. Introduction

En 2011, les énergies fossiles couvraient environ 85 % de la demande énergétique par cependant vu leur caractère non renouvelable et leur contribution à l'augmentation du taux des émissions de gaz à effet de serre (GES), la conversion vers des carburants verts durables est devenue primordiale. La croissance significative de la demande d'énergie implique le développement de nouvelles sources d'énergie renouvelables et propres telles que le solaire, l'éolien et la biomasse (Sikarwar, et al., 2017)

La conversion de la biomasse figure parmi les diverses technologies qui existent actuellement pour la production d'énergie renouvelables. Notre étude actuelle se focalise sur la conversion thermochimique de la biomasse en particulier la gazéification.

La gazéification est un procédé qui permet de convertir les combustibles solides carbonés tel que la biomasse et le charbon sous l'effet de la température par une série de réaction et en présence d'un agent de gazéification, pour obtenir un combustible gazeux qui est le gaz de synthèse. (Pang, 2016)

La composition du gaz de synthèse varie selon plusieurs paramètres tel que la composition de la biomasse, l'humidité, la température, l'agent de gazéification...etc. (Ferreira, et al., 2019; Basu, 2010)

Bien qu'il existe des facteurs divers affectant la composition du gaz de synthèse à partir de la biomasse, cela dépend principalement du type de gazéificateur, de la charge d'alimentation et du prétraitement de la charge d'alimentation, du milieu de gazéification et des paramètres de fonctionnement tels que la température, la teneur en humidité et le rapport d'équivalence

La plupart du temps, la composition du gaz de synthèse est inconnue, et sa détermination nécessite de faire des travaux expérimentaux qui, à leurs tours, nécessitent beaucoup de ressources (temps et argent). Pour cette raison, l'utilisation d'un modèle mathématique qui permet de prédire la composition du gaz de synthèse (concentration de H₂, CO, CH₄ et CO₂) en se basant sur les données de base disponible est très utile. (Baruah & Baruah, 2014)

5.2. Les modèles mathématiques

Plusieurs modèles mathématiques existent principalement : les modèles cinétiques, dynamique des fluides numérique (CFD), réseau de neurones artificiels (ANN), et le modèle d'équilibre thermodynamique. (Boumeddane, 2015; Basu, 2010; Sikarwar, et al., 2016).

Le modèle cinétique prend en considération la cinétique de réaction et l'hydrodynamique du gazéificateur, il a été développé pour étudier l'impact des différentes variables de processus sur la composition de gaz et le rendement. (Sikarwar, et al., 2016)

L'utilisation d'un modèle cinétique global par (Morin, et al., 2018) pour simuler la gazéification du charbon dans un réacteur à lit fluidisé à la pression atmosphérique et avec la vapeur d'eau comme agent de gazéification a montré que les résultats obtenus étaient en accord avec les données expérimentaux.

Le modèle cinétique développé par (Smith, et al., 2019) permet de simuler la composition de gaz de synthèse avec plus de précision, tout en étudiant les effets du rapport d'équivalence (ER), de la température de gazéification, de la teneur en humidité de la biomasse et de la composition de la biomasse sur la production de gaz de synthèse et du goudron.

Le modèle dynamique des fluides numérique (CFD) sont basés sur un ensemble d'équations simultanées pour la conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie et des espèces sur une région discrète du gazéificateur, ce modèle permet de simuler les effets des différents paramètres opérationnels tels que la pression, la température, le rapport d'équivalence (ER), la composition et dimension de la biomasse sur la composition du gaz de synthèse et son pouvoir calorifique inférieur (PCI). Si l'hydrodynamique du réacteur est bien connu, le modèle CFD peut prédire la température et le rendement gazeux avec une très grande précision. (Timsina, et al., 2021; Baruah & Baruah, 2014)

Plusieurs travaux ont été réalisés en utilisant le modèle dynamique des fluides numérique (CFD). Un modèle numérique a été développé par (Kumar & Paul, 2019) pour simuler le processus de gazéification du bois d'hévéa dans un gazéificateur à courant descendant à l'aide du modèle de dynamique des fluides computationnelle (CFD) d'Euler-Lagrange. Ce modèle a été utilisé pour étudier l'effet du rapport d'équivalence sur la composition du gaz de sortie et la température du gazéificateur. Le travail de (Siripaiboon, et al., 2020) se concentre sur une simulation CFD bidimensionnelle d'un gazéificateur co-courant avec une validation expérimentale à l'échelle pilote avec des granulés de bois comme combustible. Le modèle

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

développé permet d'étudier les effets des rapports d'aspect sur la température et la composition du gaz de synthèse.

Le modèle développé par (Pandey, et al., 2021) a été validé avec des données expérimentales d'un gazéificateur à co-courant, les résultats ont montré que le modèle permet de prédire le CO, l'hydrogène et le CO₂ avec une très grande précision.

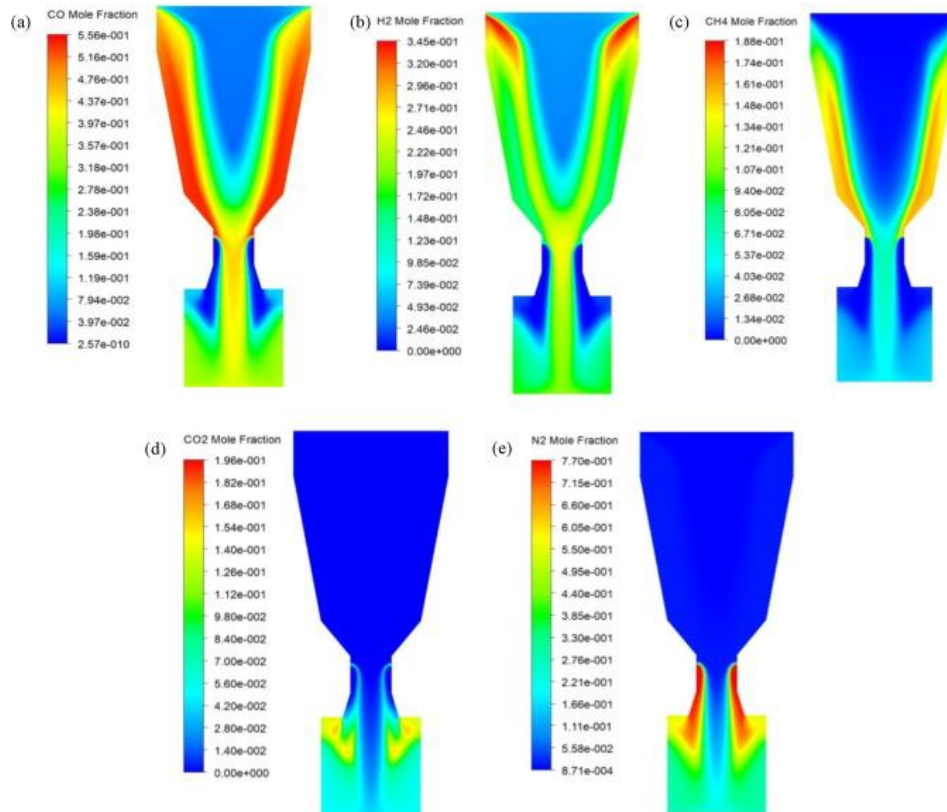


Figure 44 : Fraction molaire des gaz à l'intérieur du gazéificateur par modèle CFD. (a) monoxyde de carbone ; (b) hydrogène (c) méthane (d) dioxyde de carbone (e) azote (Pandey, et al., 2021)

L'analyse du réseau neuronal (ANN) est l'approche la plus récente pour la simulation d'un gazéificateur. Cette méthode cette technique a été utilisée avec un succès raisonnable pour prédire le rendement et la composition du gaz à partir des procédés de gazéification, en imitant le fonctionnement du cerveau humain et fournissant certaines caractéristiques humaines pour résoudre les modèles (Baruah & Baruah, 2014)

Deux modèles d'analyse du réseau neuronal (ANN) ont été développés par (Puig-Arnavat, et al., 2013) et utilisés pour déterminer la composition du gaz producteur et le rendement en gaz, le premier pour les gazéificateurs à lit fluidisé circulant (CFB) et le deuxième pour les gazéificateurs à lit fluidisé bouillonnant (BFB). Ces mêmes modèles ont permis

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

d'étudier l'effet de la teneur en cendres, humidité, carbone, oxygène et hydrogène de la biomasse sèche, le rapport d'équivalence et la température de gazéification.

L'étude de (Mikulandrić, et al., 2014) a confirmé que les modèles de réseaux neuronaux ont montré une bonne capacité à prédire les paramètres du processus de gazéification de la biomasse avec une précision et une vitesse raisonnable.

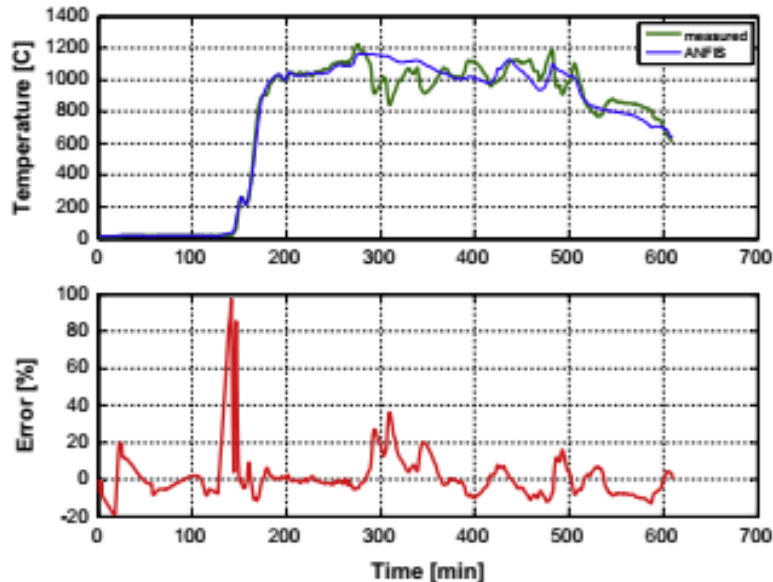


Figure 45 : Résultats du modèle de réseau neuronal pour la prédiction de la température du gaz de synthèse (Mikulandrić, et al., 2014)

Un modèle d'analyse du réseau neuronal (ANN) a été réalisé par (Arumugasamy, et al., 2020) avec 11 algorithmes d'entraînement pour étudier le comportement de gazéification du biochar à fibres de palmier. En comparant les résultats expérimentaux avec ceux obtenu par le modèle établi, il a été possible d'optimiser l'algorithme d'entraînement le plus approprié.

Le modèle d'équilibre thermodynamique reste le modèle le plus simple qui permet une description pratique du processus de gazéification. Ce modèle à l'avantage de pouvoir de gérer une large gamme de sources de biomasse avec différentes conditions de fonctionnement. Les calculs thermodynamiques sont indépendants de la dimension du gazéificateur ; ce qui le rend avantageux d'analyser les paramètres de processus les plus importants il permet de prédire les paramètres de performance de gazéification (composition du gaz de synthèse et pouvoir calorifique) avec une précision satisfaisante. (Ayub, et al., 2020; Michela, et al., 2021; Nugroho & Torii, 2021)

Selon (Basu, 2010) et (Ferreira, et al., 2019), les modèles d'équilibre thermodynamiques peuvent être classé en deux catégories :

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

Le modèle stœchiométrique : qui est simple et basé sur les constantes d'équilibres, ce modèle prend en compte les réactions chimiques importantes seulement pour estimer la composition finale du gaz produit ce qui engendre quelques erreurs dans la prédiction.

Le modèle non stœchiométrique : qui est plus complexe et basé sur la minimisation de l'énergie libre totale de Gibbs, la seule donnée nécessaire est la composition élémentaire du substrat. Ce modèle est adapté spécialement aux combustibles comme la biomasse.

La plupart des travaux de modélisation thermodynamique de la gazéification pour un gazéificateur à contre-courant se basent sur le processus de décomposition du combustible seulement. Le modèle thermodynamique utilisé par (Vidian, et al., 2016) pour un gazéificateur à contre-courant avec recirculation externe du gaz de pyrolyses, se base sur deux processus de décomposition (décomposition du carburant et du charbon) afin d'étudier l'influence de la quantité de gaz de pyrolyse de recirculé vers la zone de combustion sur le gaz combustible et le goudron.

Le modèle d'équilibre thermodynamique pour la gazéification de la biomasse développé par (Shirke, et al., 2018) , permet de prédire la composition du gaz et la valeur calorifique en fonction de la composition de la biomasse et des conditions d'admission.

Le modèle d'équilibre thermodynamique à zéro dimension établie par (Nugroho & Torii, 2021) a prouvé sa fiabilité avec les données expérimentales de la gazéification des régimes vide de palmier.

Pour notre étude en cours on a choisi d'utiliser le modèle thermodynamique vu sa simplicité et les avantages qu'il offre et aussi son indépendance vis-à-vis la conception du prototype de gazéification.

5.3. Processus et réactions dans le gazéificateur à contre-courant

Au cours du déplacement du combustible dans le gazéificateur, il traverse différentes zones de réaction, qu'on peut diviser en quatre zones de réaction stratifiées le long de la hauteur du réacteur.

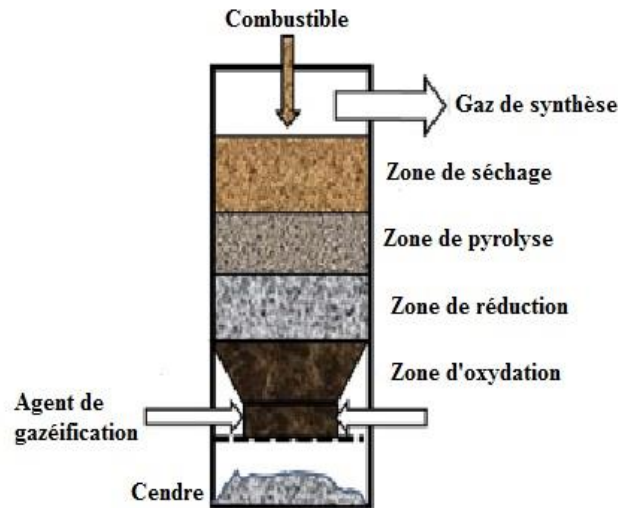


Figure 46 : Schéma de principe des réactions exothermiques et endothermiques dans un gazéifie à contre- courant (Pang, 2016)

La figure 46 montre les différentes zones de réaction dans un gazéificateur adiabatique à contre-courant. Lorsqu'une biomasse est chauffée, elle perd d'abord de l'humidité et devient sèche. Ce processus est appelé séchage. Le processus de pyrolyse sépare la vapeur d'eau, les liquides organiques et les gaz incondensables du charbon ou du carbone solide de la biomasse.

Le processus de combustion oxyde les constituants du carburant dans une réaction exothermique, tandis que le processus de gazéification les réduit en gaz combustibles dans une réaction endothermique. (Basu, 2010; Sikarwar, et al., 2017)

Plusieurs réactions se produisent à l'intérieur du réacteur, cependant la réaction eau-gaz, la réaction de Boudouard, la conversion par décalage et la méthanation, sont les réactions les plus importantes qui pourraient produire le gaz de synthèse. (Ravi & Kohli, 2018; Ahmed, et al., 2014)

Zone de séchage :

Dans cette zone, un combustible solide est chauffé, perd de l'humidité et devient sec



Zone de pyrolyse

La pyrolyse est l'une des nombreuses étapes ou zones de réaction observées dans un gazéificateur. Dans cette zone, la vapeur d'eau, les liquides organiques et les gaz incondensables sont séparés du charbon ou du carbone solide du carburant.



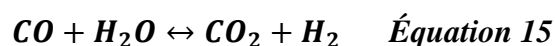
Zone d'oxydation :

La zone d'oxydation est formée dans la section où l'air est fourni. Ces réactions de combustion sont fortement exothermiques et provoquent une augmentation rapide de la température. Les réactions dans cette zone sont les suivantes Source spécifiée non valide.



Zone de réduction

C'est la zone principale du gazéificateur où l'on obtient un mélange de gaz appelé gaz producteur ou gaz de synthèse dans une réaction endothermique. Les réactions dans cette zone sont Source spécifiée non valide.



5.4. Analyse thermodynamique

Durant cette étude, les principales caractéristiques et hypothèses du modèle thermodynamique peuvent être résumées comme suit :

- Le processus de gazéification est considéré comme adiabatique (pas de transfert de chaleur depuis et vers l'extérieur) et stationnaire ($t = \text{constante}$).
- L'azote présent dans le carburant ou dans l'air est inerte.
- Les cendres dans la matière première sont supposées inertes pour toutes les réactions de gazéification
- Les gaz issus de la gazéification sont considérés comme des gaz parfaits.
- Toutes les réactions sont considérées en équilibre thermodynamique.
- Il n'y a pas de goudron dans la zone de gazéification

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

- Toute la teneur en carbone de la biomasse est convertie en CO et CO₂ sous forme gazeuse
- Les principaux composés gazeux formés au cours du processus de gazéification et pris en considération sont le CO, le CO₂, le H₂, le CH₄, le N₂ et l'eau. Les hydrocarbures autres que CH₄ sont supposés négligeables dans le gaz de synthèse (Nugroho & Torii, 2021; M. R. Ravi, 2018)
- Les entrées requises pour le modèle sont les suivantes :
 - Composition de la biomasse (analyse ultime, humidité et pouvoir calorifique)
 - Température initiale de la biomasse et de l'air (Température Ambiante)
 - plage de température de réaction d'équilibre (600-1000 °C)
 - Constantes d'équilibre des corrélations pour la réaction de déplacement du gaz de l'eau et la réaction de formation de méthane (Basu, 2013; Melgar, et al., 2007)
 - Données thermodynamiques pour les espèces chimiques, enthalpie de formation (\bar{h}_f^0), et coefficients pour la chaleur spécifique (Cp) (Basu, 2013)
- La sortie du modèle est des compositions de gaz de synthèse. Cette dernière reflète l'équilibre thermodynamique.

La structure générale du modèle d'équilibre thermodynamique est schématisée dans la figure 47.

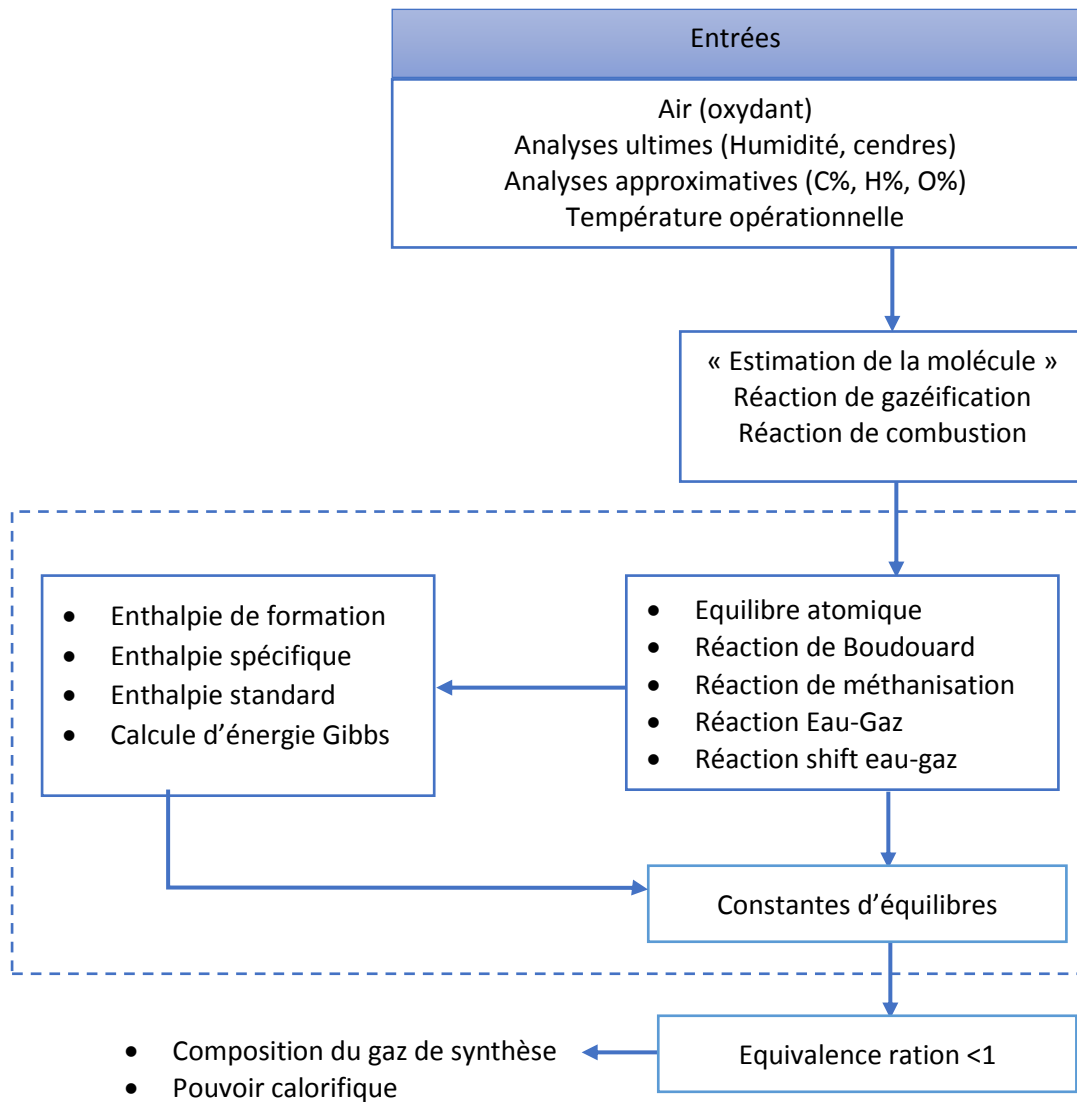
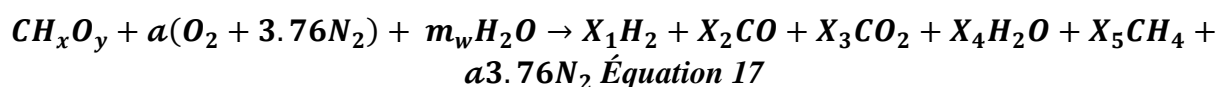
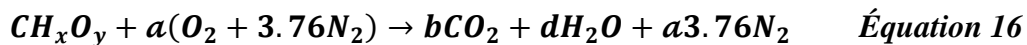


Figure 47 : Structure du modèle d'équilibre thermodynamique

La composition chimique de la biomasse dans cette étude est considérée comme étant sous la forme CH_xO_y . L'algorithme qui estime la composition du gaz de synthèse est basé sur l'équilibre chimique entre les différentes espèces, en tenant compte de celui des gazéificateurs à contre-courant. La réaction globale dans le gazéificateur contre-courant peut alors s'écrire :



x, y sont le nombre d'atomes d'hydrogène, et d'oxygène, respectivement, déterminées en utilisant la composition élémentaire comme ci-dessous (Gan Gek, et al., 2016) :

$$x = \frac{\text{fraction massique (H)} \times \text{poids moléculaire (C)}}{\text{fraction massique (C)} \times \text{poids moléculaire (H)}} \quad \text{Équation 18}$$

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

$$y = \frac{\text{fraction massique (O)} \times \text{poids moléculaire (C)}}{\text{fraction massique (C)} \times \text{poids moléculaire (O)}} \quad \text{Équation 19}$$

a est le rapport carburant/air réel, m_w est la quantité d'eau par k mol de biomasse eqn. (12) et X_1 à X_5 sont les moles respectives de l'espèce respective.

La valeur de m_w dans l'éqn. (10) peut être calculé en utilisant les relations suivantes de la teneur en humidité de la matière première :

$$\% \text{ eau} = \frac{m_w * M_{H_2O}}{m_{\text{biomasse}} + M_{H_2O}} \quad \text{Équation 20}$$

A partir de cette équation, la quantité d'eau par kmol de biomasse peut être dérivée comme suit : Source spécifiée non valide.

$$m_w = \frac{(M_{\text{bio}} * \% \text{ eau})}{M_{H_2O}(1 - \% \text{ eau})} \quad \text{Équation 21}$$

Le bilan massique ou le bilan matière est indispensable pour valider les résultats expérimentaux d'un gazéificateur. Pour cela, les matériaux d'entrée et de sortie doivent être déterminés.

La masse entrant dans le gazéificateur contient de la biomasse et de l'air. Les produits de la gazéification sont les produits gazeux, les cendres et le goudron et le charbon.

En appliquant la loi de conservation de la masse aux rendements du procédé de gazéification on obtient Source spécifiée non valide.

$$\sum M_{\text{input}} = \sum M_{\text{output}} \quad \text{Équation 22}$$

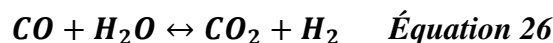
En prenant des bilans atomiques sur le carbone, l'hydrogène et l'oxygène, on obtient

$$\text{Equilibre C : } 1 = X_2 + X_3 + X_5 \quad \text{Équation 23}$$

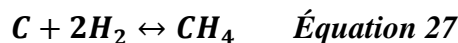
$$\text{Equilibre H : } x + 2m_w = 2X_1 + 2X_4 + 4X_5 \quad \text{Équation 24}$$

$$\text{Equilibre O : } y + 2a + m_w = X_2 + 2X_3 + X_4 \quad \text{Équation 25}$$

Nous avons 6 inconnues de X_1 à X_5 mais nous n'avons que 4 équations. Donc, nous avons besoin de deux autres équations et nous les obtenons à partir de réactions d'équilibre. La première réaction est la réaction de conversion eau-gaz :



La deuxième réaction est celle de la formation de méthane :



Chapitre 4 : Résultats et Discussion

Ces deux réactions sont les principales réactions qui se produisent pendant le processus de gazéification. (Melgar, et al., 2007)

Les valeurs des constantes d'équilibre K_1 et K_2 pour les équations (19) et (20) sont calculées à partir de l'énergie libre de Gibbs Source spécifiée non valide.:

$$k = \exp\left(\frac{-\Delta G^0_T}{RT}\right) \quad \text{Équation 28}$$

Où : ΔG^0_T est la différence de l'énergie libre de Gibbs entre les produits et les réactifs, elle est calculée d'après l'équation 22 :

$$\Delta G^0_T = \sum_i X_i \Delta \bar{g}^0_{f,T,i} \quad \text{Équation 29}$$

R est la constante des gaz parfait, 8,314 kJ/(kmol.K), T est la température, $\Delta \bar{g}^0_{f,T,i}$ est la fonction de Gibbs standard de la formation d'espèces gazeuses (i) à une température donnée T.

On obtient par la suite les formules de k_1 et k_2 suivantes :

$$k_1 = \exp\left[\frac{-(2\bar{g}^0_{H_2} + 2\bar{g}^0_{CH_4})}{RT}\right] = \frac{X_5}{X_1^2} \quad \text{Équation 30}$$

$$k_2 = \exp\left[\frac{-(\bar{g}^0_{CO} - \bar{g}^0_{H_2O} + \bar{g}^0_{CO_2} + \bar{g}^0_{H_2})}{RT}\right] = \frac{X_3 * X_1}{X_2 * X_4} \quad \text{Équation 31}$$

La fonction de Gibbs standard de la formation d'espèces gazeuses $\Delta \bar{g}^0_{f,T,i}$ peut être calculée par l'équation empirique ci-dessous Source spécifiée non valide.:

:

$$\Delta \bar{g}^0_{f,T,i} = \bar{h}^0_{298} - a'T \ln(T) - b'T^2 - \left(\frac{c'}{2}\right) T^3 - \left(\frac{d'}{3}\right) T^4 + \left(\frac{e'}{2T}\right) + f' + g'T \quad \text{Équation 32}$$

Les valeurs des coefficients a' - g' et l'enthalpie de formation des gaz à l'état de référence standard de 298 K et 1 atm de pression sont présentées dans le tableau 18.

Tableau 20 : La valeur de \bar{h}^0_f (kJ/mol) et les coefficients constants de l'équation empirique pour $\Delta \bar{g}^0_{f,T,i}$ (kJ/mol) (Basu, 2013)

Composant	\bar{h}^0_{298}	a'	b'	c'	d'	e'	f'	g'
CO	-110,5	$5,6*10^{-3}$	$-1,2*10^{-5}$	$6,4*10^{-9}$	$-1,8*10^{-12}$	$-4,89*10^2$	0,868	-0,0613
CO ₂	-393,5	$-2*10^{-2}$	$3,2*10^{-5}$	$2,5*10^{-8}$	$7*10^{-12}$	$-4,89*10^2$	5,27	-0,121
H ₂ O	-241,8	$-8,9*10^{-3}$	$-3,7*10^{-6}$	$5,21*10^{-9}$	$-1,5*10^{-12}$	0	2,87	-0,0172
CH ₄	-74,8	$-4,6*10^{-12}$	$1,3*10^{-5}$	$1,3*10^{-8}$	$-6,6*10^{-12}$	$-4,89*10^2$	14,1	-0,223

Le bilan énergétique à l'état stationnaire pour notre système réactionnel est basé sur la première loi de la thermodynamique. La figure 48 montre un diagramme général de l'équilibre énergétique de ce système.

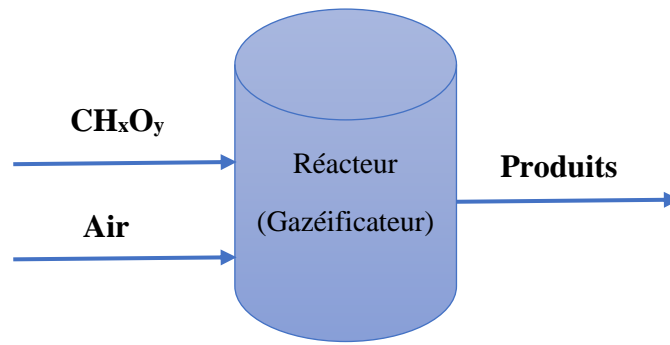


Figure 48 : diagramme général de l'équilibre énergétique du système d'étude

Le bilan énergétique à l'état stationnaire est donné par la relation :

$$\sum_{\text{Réactifs}} n_R (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h}_T)_R = \sum_{\text{Produits}} n_P (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h}_T)_P \quad \text{Équation 33}$$

Où n_R et n_P représentent le nombre de mole des réactifs et des produits respectivement, \bar{h}_f^0 est l'enthalpie de formation en kJ/kmol, et $\Delta \bar{h}_T$ est la différence d'enthalpie entre un état donné et l'état de référence, elle est calculée d'après l'équation 27.

La température d'équilibre atteinte dans le réacteur adiabatique est déterminée à partir de l'équation de conservation de l'énergie.

$$\Delta \bar{h}_T = \int_{T_0}^T C_p dT \quad \text{Équation 34}$$

Où C_p est la capacité thermique spécifique à pression constante en kJ/kmol K elle peut être déterminée avec la relation empirique Source spécifiée non valide.

$$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad \text{Équation 35}$$

Les coefficients a– d de la capacité thermique spécifique à pression constante de certains gaz sont donnés dans le tableau 19.

Tableau 21 : Les coefficients a–d de la capacité thermique massique à pression constante de certains gaz (Jarunthammachote & Dutta, 2007)

Corposant	$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3$ (kJ/kmol K)				Interval de temperature (K)
	a	$10^2 \times b$	$10^5 \times c$	$10^9 \times d$	
H ₂	29,11	-0,1916	0,4003	-0,8704	273-1800
CO	28,16	0,1675	-0,5375	-2,222	273-1800
CO ₂	22,26	5,981	-3,501	7,469	273-1800
H ₂ O (g)	32,24	0,1923	1,055	-3,595	273-1800
CH ₄	19,89	5,204	1,269	-11,01	273-1500
N ₂	28,90	-0,1571	0,8081	2,873	273-1800
O ₂	25,48	1,520	-0,715	1,312	273-1800

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

En appliquant la relation du bilan énergétique à notre réaction on obtient :

$$\overline{h_{fCH_xO_y}^0} + a(\overline{h_{fO_2}^0} + 3,76 \overline{h_{fN_2}^0}) + w(\overline{h_{fH_2O(l)}^0} + H_{vap}) = x_1(\overline{h_{fH_2}^0} + \Delta\overline{h}_{H_2}) + x_2(\overline{h_{fCO}^0} + \Delta\overline{h}_{CO}) + x_3(\overline{h_{fCO_2}^0} + \Delta\overline{h}_{CO_2}) + x_4(\overline{h_{fH_2O(g)}^0} + \Delta\overline{h}_{H_2O(g)}) + x_5(\overline{h_{fCH_4}^0} + \Delta\overline{h}_{CH_4}) + 3,76a(\overline{h_{fN_2}^0} + \Delta\overline{h}_{N_2}) \quad \text{Équation 36}$$

L'enthalpie de formation $\overline{h_f^0}$ est déjà donnée dans le tableau 17, pour les éléments H₂, N₂ et O₂ la valeur de $\overline{h_f^0} = 0$

$\overline{h_{fCH_xO_y}^0}$ correspond à l'enthalpie de formation des produits lors d'une combustion complète comme il figure dans l'équation (16) ; cette valeur est calculée à partir du pouvoir calorifique inférieur selon la relation donnée par (Souza-Santos, 2010) :

$$\overline{h_{f\text{combustible}}^0} = \overline{PCI} + \sum_P n_P (\overline{h_f^0})_P \quad \text{Équation 37}$$

La composition chimique des combustibles est déterminée d'après les données du tableau 14 et les équations (18), (19) puis, en équilibrant l'équation 16 on obtient les valeurs de a, b, et d.

Pour la valeur de PCI, elle est obtenue à partir de la corrélation donnée par (Souza-Santos, 2010) pour le bois et la biomasse :

$$PCS = 4,184 * 10^5 (81,848w_C + 263,38w_H - 28,645(w_O + w_N) - 3,658w_{cd} + 0,16371) \quad \text{Équation 38}$$

Où $w_C, w_H, w_O, w_N, w_{cd}$ sont les fractions pondérales du carbone, hydrogène, oxygène, azote et cendre respectivement dans l'analyse finale

On obtient :

$$\overline{h_{fCH_xO_y}^0} + w(\overline{h_{fH_2O(l)}^0} + \overline{h_{vap}}) = x_1 \left(\int_{298}^{T_g} C_{pH_2} dT \right) + x_2 \left(\overline{h_{fCO}^0} + \int_{298}^{T_g} C_{pCO} dT \right) + x_3 \left(\overline{h_{fCO_2}^0} + \int_{298}^{T_g} C_{pCO_2} dT \right) + x_4 \left(\overline{h_{fH_2O(g)}^0} + \int_{298}^{T_g} C_{pH_2O} dT \right) + x_5 \left(\overline{h_{fCH_4}^0} + \int_{298}^{T_g} C_{pCH_4} dT \right) + 3,76a \left(\int_{298}^{T_g} C_{pN_2} dT \right) \quad \text{Équation 39}$$

La composition du gaz de synthèse produit est déterminé par la résolution des équations (23) à (25), (30), (31) et (39) en utilisant MATLAB.

Le pouvoir calorifique supérieur du gaz produit peut être déterminé à partir de l'équation donnée par (Kabli, et al., 2022)

$$PCS = 12,63X_{CO} + 12,74X_{H_2} + 39,52X_{CH_4} \text{ (MJ/Nm}^3\text{)} \quad \text{Équation 40}$$

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

Tableau 22 : Composition estimée du gaz de synthèse produit lors des essais de gazéification pour chaque substrat

Substrat	T _{opérateur}	H%	K ₁	K ₂	H ₂ (%)	CO (%)	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	N ₂ (%)	PCS (MJ/Nm ³)
Sciure de bois	409	5,87	12,5044	11,2809	11,93	12,50	23,79	17,47	34,3	10,00
	375	5,87	27,2225	16,0435	9,00	11,06	26,409	21,74	31,8	11,14
Palmes	557	3,32	0,8459	3,5052	17,40	9,86	18,64	2,34	51,71	4,42
	554	3,32	0,8854	3,5729	17,38	9,779	18,77	2,46	51,61	4,42
Régime	423	4,99	9,2641	9,8648	13,539	5,95	27,50	15,959	37,01	8,78
	400	4,99	15,2558	12,3366	11,50	4,47	29,62	19,00	35,38	9,54
Pédoncule du régime	149	5,61	8,3055e+04	813,3527	0,24	0,00	39,75	43,83	16,15	17,35
	104	5,61	1,1604e+06	3,2319e+03	0,0007	0,00	40,35	45,20	14,36	17,86
Pétiole	339	5,81	67,6331	24,4048	3,82	14,40	19,85	9,84	52,05	6,19
	330	5,81	86,2447	27,3341	3,45	14,40	20,00	10,21	51,96	6,29

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

Le tableau 22 illustre la composition du gaz de synthèse lors de chaque essai de gazéification pour les différents substrats ainsi que son pouvoir calorifique supérieur.

Les résultats obtenus suite à l'étude thermodynamique sont en accord avec les données expérimentaux.

Pour la sciure de bois, la température de gazéification maximal du 1^{er} essai était 409°C la composition du gaz produit était de 37,3% N₂, 23,79 % CO₂, 17,47% CH₄, 12,5%, et 11,93% pour le H₂ respectivement. Pour le deuxième essai la température a atteint 375°C seulement, pour la gaz produit, sa composition était de 31,8%, 26,409%, 21,74%, 11,06%, et 9% pour le N₂, CO₂, CH₄, CO, et H₂ respectivement.

Pour les palmes sèches la température de gazéification a dépassé les 500°C pour les deux essais effectués, avec une concentration en hydrogène qui dépasse les 17%. La température opératoire du premier essai était de 557°C et la composition du gaz produit était de 51,71%, 18,64%, 17,40%, 9,86% et 2,34% pour le N₂, CO₂, H₂, CO et CH₄ respectivement. Le deuxième essai de gazéification des palmes à atteint une température opératoire de 554°C avec une production d'un gaz de synthèse composé de 51,61% d'Azote, 18,77% de Dioxyde de Carbone 17,38% d'Hydrogène, 9,779% d'Oxyde de Carbone et 2,48% de Méthane.

Durant le premier essai de gazéification avec le régime comme substrat on a enregistré une température opératoire de 423°C avec une composition de gaz de synthèse de 37,01%, 27,50%, 15,959%, 13,539% et 5,95%, pour le N₂, CO₂, CH₄, H₂ et CO respectivement. Pour le deuxième, une température opératoire de 400°C a été enregistré avec une composition de gaz de synthèse comme suit 35,38%, 29,62%, 19,00% 11,50%, et 4,47% pour le N₂, CO₂, CH₄, H₂ et CO respectivement.

Pour les essais avec les pédoncules du régime comme substrat, le premier test a atteint une température de 149°C avec une composition de gaz de synthèse 0,24%, 0,00%, 39,75%, 43,83% et 16,15% pour le H₂, CO, CO₂, CH₄, et N₂ respectivement. Durant le deuxième essai on a noté une température de 104°C et un gaz de synthèse composé de 45,20%, 40,35%, 14,36% 7.10⁻³%, et 0,00% de CH₄, CO₂, N₂, H₂, et CO respectivement.

Pour les pétioles, on a noté une température opératoire de 339°C durant le premier essai de gazéification avec un gaz de synthèse composé de 52,05% d'Azote, 19,85% de Dioxyde de Carbone, 14,40% d'Oxyde de Carbone, 9,84% de Méthane et 3,82% d'Hydrogène. Pour le deuxième essai une température de 330°C est enregistré et le gaz produit montre une

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

composition de 51,56%, 20,00%, 14,40%, 10,21% et 3,45%, d' N_2 , CO_2 , CO , CH_4 , et H_2 respectivement.

La température est un important paramètre qui influe sur les réactions d'équilibres durant le processus de gazéification, son augmentation permet d'augmenter la concentration de l'hydrogène en revanche elle diminue celle du méthane et l'inverse. Cela est due à l'activation de la réaction endothermique et celle du reformage du méthane lorsque la température est très élevée.

Le pouvoir calorifique du gaz de synthèse produit varie selon la composition du gaz produit, sa valeur augmente avec l'augmentation de la concentration en méthane et l'inverse.

La plus faible valeur de pouvoir calorifique est **4,42MJ/Nm³**, enregistré pour les palmes dont la composition du gaz produit comprend le plus faible taux de CH_4 (**2,34-2,46%**), cette valeur est très proche de celle obtenue lors de la gazéification des palmes du palmier à huile dont la valeur est **4,88 MJ/Nm³** (Guangul & S.A. sulaiman, 2013). La valeur du pouvoir calorifique maximale est notée pour les pédoncules du régime avec une valeur qui varie entre **17,35 – 17,86 MJ/Nm³** pour les deux essais ainsi que le taux le plus élevé de CH_4 (**43,83-45,20%**).

Pour les pétioles la valeur du pouvoir calorifique varie dans l'intervalle **6,19 -6,29 MJ/Nm³**, une valeur similaire à celle obtenue par (Cerone, et al., 2020) qui est de **6,20MJ/Nm³**, lors de la gazéification des coques d'amande dans un gazéificateur du même type que celui utilisé dans la présente étude et avec l'air comme agent de gazéification.

Le pouvoir calorifique pour le régime varie entre **8,78 MJ/Nm³** et **9,54 MJ/Nm³**, tandis que la valeur du pouvoir calorifique de la sciure de bois varie entre **10 MJ/Nm³** et **11,14MJ/Nm³**. Ces valeurs sont compatibles avec l'intervalle déterminé par (Gil, et al., 2019) lors de la gazéification de la biomasse qui varie de **8,72 MJ/Nm³** à **11,72MJ/Nm³**

Conclusion générale

Conclusion générale

La technologie de bioconversion est l'une des solutions prometteuses qui peut contribuer en partie à la nouvelle politique énergétique de l'Algérie et cela non seulement par l'exploitation des énergies renouvelable mais aussi par la préservation de l'environnement contre la pollution et la participation au développement durable. Cette technologie de bioconversion est basée essentiellement sur la conversion de la biomasse en bioénergie.

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) est la biomasse la plus dominante dans les régions oasiennes. Avec plus de 18 millions palmier, il représente une énorme source de biomasse lignocellulosique non exploitée. Cependant, le manque de statistique réel sur le taux de la biomasse lignocellulosique phoenicicole, rend l'évaluation de ce potentiel nécessaire. La connaissance des différents déchets lignocellulosiques du palmier dattier, ainsi que leurs proportions par palmier et par cultivar, nous permet d'évaluer leur potentiel, et d'envisager leur valorisation énergétique la plus rentable.

La prospection sur terrain faite au cours de cette thèse nous a permis d'identifier les principaux déchets du palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche*, les résultats obtenus montre que ces déchets lignocellulosiques sont composés de 6 principaux déchets avec les proportions massique suivantes : **53,55%**, **17,41%**, **12,91%**, **6,89%**, **4,87%** et **4,36%** pour les palmes sèches, pétioles, régime, pédoncule du régime, spathe et fibrilium respectivement.

Les données de prospection sur terrain ont permis d'estimer le potentiel annuel détaillé des déchets lignocellulosique phoenicicole pour les palmiers productifs qui sont régulièrement nettoyés et qui est d'environ **5380285,68kg**, un chiffre énorme qui peut être augmenté de la moitié si nous arrivons à étendre les opérations de nettoyage pour toucher à la fois les palmiers productifs et non productifs.

Les analyses approximatives des déchets du palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) variété *Takarbouche* montrent des teneurs d'humidité faibles de **3,32%**, **4,99%**, **5,61%**, **5,67%**, **5,81%** et **4,93%** pour les palmes sèches, régime, pédoncules du régime, spathe, pétiole et fibrilium respectivement. Cette faible humidité, due au séchage à l'air libre des déchets lignocellulosiques du palmiers dattier, favorise la conversion thermique de la biomasse phoenicicole.

Les cendres à leur tour montrent des teneurs faibles de l'ordre de **11,70%**, **10,10%**, **5,13%**, **2,76%**, **2,49%** et **1,99%** pour les palmes sèches, pétiole, fibrilium, pédoncules du

Conclusion générale

régime, régime, et spathe respectivement. Ces valeurs sont nettement inférieures comparés à d'autre biocombustible ce qui est favorable pour la conversion thermique.

Les taux de matière volatile pour les déchets de palmiers dattier est de l'ordre de **85,86%, 94,05%, 91,41%, 95,18%, 82,47%** et **89,65 %** pour les palmes sèches, régime, pédoncules du régime, spathe, pétiole et fibrilium respectivement. Ces valeurs sont supérieures comparés à d'autre substrats, ce qui est très favorable car une faible teneur en matières volatiles pose des difficultés lors de la gazéification, entraîne une conversion inefficace et une production élevée de charbon.

Les taux de carbone fixe obtenues montrent des valeurs de **2,45%, 3,46%, 2,97%, 4,13%, 11,73%** et **5,23%** pour les palmes sèches, régime, pédoncules du régime, spathe, pétiole et fibrilium respectivement. Ces valeurs se situent dans l'intervalle défini pour la biomasse qui s'étend de **1 à 38%**.

Les analyses ultimes montre une composition élémentaire avec un taux d'oxygène élevé qui varie de **32,78%** à **53,40%**, un résultat logique du fait que la biomasse est le combustible le plus riche en oxygène bien que ce dernier n'apporte aucune contribution utile au pouvoir calorifique et rend difficile la transformation de la biomasse en combustibles liquides. Pour le carbone, sa teneur varie dans un intervalle de **37,15%** à **46,34%** ses valeur se situe dans l'intervalle définie pour une large gamme de biomasses étudiés.

Le taux de l'hydrogène calculé dans les déchets varie de **3,62%** à **8,07%**, ce qui est conformes à la bibliographie qui détermine l'intervalle de la teneur en hydrogène entre **3** et **11%** pour la biomasse et cela pour tous les déchets analysés.

Pour les rapports atomiques, le rapport O/C présente des valeurs supérieures au rapport H/C pour tous les sous-produits de palmier dattier ainsi que pour la sciure de bois. La teneur élevée en oxygène et en hydrogène de la biomasse implique des rendements volatils et liquides élevés du fait que l'oxygène consomme une partie de l'hydrogène de la biomasse, produisant de l'eau moins bénéfique pour les réactions thermiques.

La biomasse phoenicicole possède un potentiel énergétique intéressant qui varie entre **11,81(MJ/kg)** pour les palmes à **17,81 (MJ/kg)** pour les pétioles.

Le profile générale de température pour les essais de gazéification au cours de cette étude sont cohérents pour une gazéification l'air, et on arrive bien distinguer les principales zones de réaction (séchage, pyrolyse, réduction et oxydation). Selon la littérature, le gazéificateur à lit fixe up draft a la température de sortie du gaz de synthèse la plus basse comparée aux autres modèles (Basu, 2013) , pour les palmes, pétioles, régime ainsi que notre substrat de référence

Conclusion générale

la sciure de bois la température de sortie du gaz produit se situe dans l'intervalle donné par la bibliographie entre **200** et **400°C**. ce pendant les pédoncules du régime présent un profile de température plus bas comparé aux autres substrats, cela est due la faible température de réaction enregistrée l'intérieur du gazéificateur pour ce type de substrat

L'allure générale de l'évolution de la température en fonction de la hauteur montre une grande semblance pour tous les substrats testés. Cette allure est compatible avec la bibliographie et les études déjà faites. La température maximale est enregistrée au points T1 à 10 cm du lit qui est la zone d'oxydation. La majorité des réactions endothermiques se déroulent de cette zone, la température diminue progressivement en s'éloignant de cette zone. La température à 50cm du lit (point T5) représente la température de gaz de synthèse produit, sa valeur est nettement inférieure à la température d'oxydation mais figure dans l'intervalle donné par la littérature pour la gazéification de la biomasse avec l'air comme agent de gazéification

Lors des tests de gazéification, une méthode d'épuration physique simple est adoptée, en utilisant un cyclone. Le système cyclone a permis de récupérer une partie du goudron produits lors des essais de gazéification, cependant cette récupération n'est pas totale car une partie du goudron sort avec le gaz de synthèse. Pour cela, une amélioration du système d'épuration est nécessaire pour assurer une élimination totale du goudron.

Le gaz de synthèse produits pour les quatre déchets de palmier dattier est inflammable avec un degré d'inflammabilité qui varie d'un déchet l'autre. Cette différence est due à la différence de la composition du gaz et la température de réaction. Le gaz produit à partir du substrat dont la température de gazéification est la plus élevée est très inflammable avec une flamme persistante, car cette température élevée permet d'augmenter le taux de H_2 dans le gaz de synthèse et diminue le taux de CO, cependant avec la diminution de la température de gazéification l'inflammabilité diminue les deux éléments inflammables dans le gaz de synthèse sont le méthane et l'hydrogène.

Le temps de séjour influe positivement sur le taux de conversion des déchets de palmier dattier et permet d'augmenter considérablement ce taux pour atteindre des valeurs de l'ordre de 95%.

La composition du gaz de synthèse et son pouvoir calorifique sont déterminés numériquement en se basant sur l'étude thermodynamique dont la résolution des équations peut se faire en utilisant un programme Matlab.

Conclusion générale

Les résultats obtenus montrent une variation dans la composition du gaz produit en fonction de la température opérationnelle qui influe sur les réactions d'équilibres durant le processus de gazéification. L'augmentation de la température opérationnelle permet d'augmenter la concentration de l'hydrogène en revanche elle diminue celle du méthane et l'inverse. Cela est due à l'activation de la réaction endothermique et celle du reformage du méthane lorsque la température est très élevée.

Le pouvoir calorifique du gaz de synthèse produit varie entre **4,42MJ/Nm³** pour les palmes et **17,86MJ/Nm³** pour les pédoncules du régime. Cette variation est due à la variation de la composition du gaz produit. La valeur du pouvoir calorifique augmente avec l'augmentation de la concentration en méthane et l'inverse.

A la fin de ce travail, on peut dire que les résultats expérimentaux sont très satisfaisants et encourage l'orientation vers une valorisation énergétique par processus de gazéification des déchets lignocellulosique de palmier dattier. Cependant les résultats de notre travail restent insuffisant pour une estimation précise du potentiel énergétique annuel généré par les palmiers dattier de la wilaya d'Adrar, la prospection et caractérisation des déchets lignocellulosique du palmier dattier doit être étendue pour toucher d'autres communes de la wilaya et d'autres variétés de palmier dattier et pourquoi pas étendre l'étude à d'autres wilaya pour estimer le pouvoir énergétique réel de palmier dattier Algérien (*Phoenix dactylifera* L.). D'un autre côté, une caractérisation plus approfondie des substrats est souhaitable pour déterminer le taux de lignine, cellulose et hémicellulose et voir leur influence sur le processus de gazéification.

L'amélioration du système d'allumage permettra d'assurer une incinération uniforme du substrat et donc un taux de conversion plus élevé en un moindre de temps. Aussi, l'amélioration du système d'épuration est préférable pour éliminer tout le goudron produit, soit en associant une autre technique d'épuration telle que le lavage au cyclone, ce qui permettra d'éliminer goudron et poussière d'un côté, et de refroidir le gaz de synthèse d'un autre côté, le refroidissement du gaz produit facilite sa collecte pour être analysé dans un CPG.

Il est intéressant aussi de tester un mélange de déchet pour obtenir une conversion et une production maximum, soit en utilisant un mélange de déchets de palmier dattier soit en combinant sciure de bois et déchet de palmier dattier.

Références bibliographiques

Références

- Abahmane, L., 2013. Multiplication from inflorescence tissues: a powerful process for micropropagation of selected date palm (*Phoenix dactylifera* L.) genotypes. *Acta Horticulturae* 994, Volume 994, pp. 287-294.
- Abid, W. et al., 2020. Physico-chemical and spectroscopic quality assessment of compost from date palm (*Phoenix dactylifera* L.) waste valorization. *Journal of Environmental Management*, Volume 264, p. 110492.
- Adekiigbe, A., 2012. Determination of Heating Value of Five Economic Trees Residue as a Fuel for Biomass Heating System. *Nature and Science*, 10(10), pp. 26-29.
- Adhikari, S., Nam, H. & Kulkarni, A., 2018. Biomass Gasification and Effect of Physical Properties on Products. Dans: J. S. Tumuluru, éd. *Biomass Preprocessing and Pretreatments for Production of Biofuels Mechanical, Chemical and Thermal Methods*. Boca Raton: CRC Press, pp. 101- 125.
- Agoudjil, B. et al., 2011. Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood. *Energy and Buildings*, Volume 43, p. 491–497.
- Ahmed, R., Sinnathambi, c., Eldmerdash, U. & Subbarao, D., 2014. Thermodynamique analysis of refinery sludge gasification in adiabatic upraft gasifier. *The Scientific World Journal*, Volume 2014, p. 8p.
- Ali, A. M. et al., 2022. Process optimization and economic evaluation of air gasification of Saudi Arabian date palm fronds for H₂-rich syngas using response surface methodology. *Fuel*, Volume 316, p. 123359.
- Alrumman, S. A., 2016. Enzymatic saccharification and fermentation of cellulosic date palm wastes to glucose and lactic acid. *brazilian journal of microbiology*, Volume 47, p. 110–119.
- Alsenani, G., 2014. Removal of congo red dye from aqueous solution by date palm leaf base. *American Journal of Applied Sciences*, 11(9), pp. 1553-1557.
- Alshabanat, M., Al-Mufarij, R. S. & Al-Senani, G. M., 2016. Study on Adsorption of Malachite Green by Date Palm Fiber. *Oriental Journal Of Chemistry*, 32(6), pp. 3139-3144.
- Alshabanat, M., Alsenani, G. & Almufarij, R., 2013. Removal of Crystal Violet Dye from Aqueous Solutions onto Date Palm Fiber by Adsorption Technique. *Journal of Chemistry*, 2013(4), pp. 1-6.
- Al-Wabel, M. I. et al., 2019. Pyrolytic and hydrothermal carbonization of date palm leaflets: Characteristics and ecotoxicological effects on seed germination of lettuce. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(4), pp. 665-672.
- Arumugasamy, S. K., Selvarajoo, A. & Tariq, M. A., 2020. Artificial neural networks modelling: Gasification behaviour of palm fibre biochar. *Materials Science for Energy Technologies*, Volume 3, p. 868–878.
- Asim, M. et al., 2020. Effects of Date Palm fibres loading on mechanical, and thermal properties of Date Palm reinforced phenolic composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), pp. 3614-3621.
- Ayub, H. M. U., Park, S. J. & Binns, M., 2020. Biomass to Syngas: Modified Stoichiometric Thermodynamic Models for Downdraft Biomass Gasification. *Energies*, Volume 13, p. 5383.

Références bibliographiques

- Azam, M. T. & Asif, A., 2019. Date Palm Waste: An Efficient Source for Production of Glucose and Lactic Acid. Dans: M. Naushad & E. Lichtfouse, éd. *Sustainable Agriculture Reviews 34 Date Palm for Food, Medicine and the Environment*. Switzerland: Springer Nature , pp. 155-178.
- Babahani, S. & Senoussi, A., 2011. *Utilisations des produits du dattier en medecine traditionnelle*. Ouargla, s.n.
- Bain, R. L. & Broer, K., 2011. Gasification. Dans: R. C. Brown, éd. *Thermochemical Processing of Biomass: Conversion into Fuels, Chemicals and Power*. UK: John Wiley & Sons, pp. 47-77.
- Bakhtawar, J. et al., 2021. Advancements in Biofuel Production . Dans: M. Srivastava, N. Srivastava & R. Singh, éd. *Bioenergy Research: Biomass Waste to Energy*. Singapore: Springer Nature, pp. 1-26.
- Baruah, D. & Baruah, D., 2014. Modeling of biomass gasification: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 39, p. 806–815.
- Basu, P., 2010. *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. Burlington:: Academic Press.
- Basu, P., 2013. *Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction: Practical Design and Theory*. 2e éd. UK: Elsevier Inc.
- Battesti, V., 2005. *Jardins au désert : Évolution des pratiques et savoirs oasiens*, Marseille: IRD Éditions.
- Bellabidi, M., 2019. *cours phoeniculture*, el oued: université echahid Hamma Lakhdar.
- Bellahreche, 2020. *nstitut National de la Recherche Agronomique d'Algérie (INRAA)*. [En ligne] Available at: <https://inraa.dz/station-de-recherche-de-sidi-aissa/>[Accès le juin 2021].
- Bellouard, Q., 2017. *Valorisation de biomasse en vecteur énergétique par voie thermochimique solaire*, Perpignan: Université VIA DOMITIA.
- Benedetti, V., Patuzzi, F. & Baratieri, M., 2018. Characterization of char from biomass gasification and its similarities with activated carbon in adsorption applications. *Applied Energy*, Volume 227, pp. 92-99.
- Benfoughal, T., 2007. Production et commercialisation des vanneries dans les oasis du Sahara. *Journal des africanistes*, 77(1), pp. 112-140.
- Benfoughal, T., 2009. Qu'est ce qu'une « belle » vannerie au sahara ?. *Techniques & Culture*, Volume 51, pp. 216-245.
- Benmansour, N. et al., 2014. Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building. *Energy and Buildings*, Volume 81, p. 98–104.
- Bensalah, M., 2014. *Le recyclage des sous-produits des oasis : acquis et perspectives*, Maroc: Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS).
- Bensidhom, G., Trabelsi, A. B. H., mahmood, M. A. & Ceylan, S., 2021. Insights into pyrolytic feedstock potential of date palm industry wastes: Kinetic study and product characterization. *Fuel*, Volume 285, p. 119096.
- Bermudez, J. & Fidalgo, B., 2016. Production of bio-syngas and bio-hydrogen via gasification. Dans: R. Luque, C. S. K. Lin, K. Wilson & J. Clark, éd. *Handbook of Biofuels Production*. UK: Elsevier Ltd, pp. 431-494.

Références bibliographiques

- Bhaskar, T. et al., 2011. Thermochemical Conversion of Biomass to Biofuels. Dans: A. Pandey, et al. éd. *Biofuels, Alternative Feedstocks and Conversion Processes*. UK: Elsevier Inc., pp. 51-77.
- Bhui, B. & Vairakannu, P., 2018. Chemical Looping and Plasma Technologies for Gasification of Coal and Biomass. Dans: S. De, A. K. Agarwal, V. S. Moholkar & B. Thallada, éd. *Coal and Biomass Gasification: Recent Advances and Future Challenges*. Singapore: Springer, pp. 499-520.
- Boudaoud, A. et al., 2017. Removal of Nickel (II) and Cadmium (II) Ions from wastewater by palm fibers. *Scientific Study & Research*, 18(4), p. 391 – 406.
- Boulal, A., Khelafi, M. & Kaidi, K., 2018. *Procèdes expérimentales sur la production de bioéthanol de deuxième génération à partir des sous-produits des palmiers dattiers*. Ghardaïa, Le 5ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables (SIENR).
- Boumeddane, B., 2015. *Production du Syngas par Gazéification de la Biomasse*. Lyon, 22ème Congrès Français de Mécanique.
- Bousdira, K., 2007. *Contribution à la connaissance de la biodiversité du palmier dattier pour une meilleure gestion et une valorisation de la biomasse : caractérisation morphologique et biochimique des dattes des cultivars les plus connus de la région de Mزاب*, Boumerdes : Université M'hamed Bouguera.
- Bousdira, K., 2015. *valorisation énergétique de la biomasse dans l'écosystème oasien - Impact environnemental et socio-économique*, Boumerdes: Université M'Hamed Bougara.
- Bousdira, K. et al., 2017. Combustion Study of Phoenicicole Biomass in Algerian Oasis Using Thermogravimetric Analysis: Deglet Nour Cultivar Case. *Arabian Journal for Science and Engineering*.
- Bousdira, K. et al., 2014. An overview of the chemical composition of phoenicicole biomass fuel in Guerrara oasis. *Revue des Energies Renouvelables SIENR'14 Ghardaïa*, pp. 99-108.
- Broer, K. M. & Peterson, C., 2019. Gasification. Dans: R. C. Brown, éd. *Thermochemical Processing of Biomass: Conversion into Fuels, Chemicals and Power*. USA: John Wiley & Sons Ltd, pp. 85-123.
- Burger, P. & Cheneval, J.-B., 2011. *Les Oasis. Un modèle de développement durable pour les zones arides*. Corée, 10ème Conférence des Parties (COP10 UNCCD).
- Cerone, N. et al., 2020. Experimental investigation of syngas composition variation along updraft fixed bed gasifier. *Energy Conversion and Management*, Volume 221, p. 113116.
- Chaibi, N., Abdallah, A. B., Harzallah, H. & Lepoivre, P., 2002. Potentialités androgénétiques du palmier dattier Phoenix dactylifera L. et culture in vitro d'anthères. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 6(4), pp. 201-207.
- Chandrasekhar, K. et al., 2020. Evaluation of the biochemical methane potential of different sorts of Algerian date biomass. *Environmental Technology & Innovation*, Volume 20, p. 101180.
- Chan, F. L. & Tanksale, A., 2014. Review of recent developments in Ni-based catalysts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 38, pp. 428-438.
- Chehema, A. & Longo, H., 2001. Valorisation des Sous-Produits du Palmier Dattier en Vue de leur Utilisation en Alimentation du Bétail. *Revue des Energies Renouvelables : Production et Valorisation Biomasse*, pp. 59-64.
- Chehema, A., Longo, H. F., Bada, A. & Mosbah, M., 2002. Valeur alimentaire des sous-produits du palmier dattier, de la paille d'orge et du drinn chez le dromadaire. *Journal Algérien des Régions Arides*, 1(1), pp. 33-43.

Références bibliographiques

- Chopra, S. & Jain, A. K., 2007. A Review of Fixed Bed Gasification Systems for Biomass. *Agricultural Engineering International : The CIGR e-journal*, 5(IX), pp. 1-23.
- Christodoulou, M., 2013. *Pyrolyse de bois dans les conditions d'un lit fluidisé : Étude expérimentale et modélisation*, s.l.: Université de Lorraine.
- Ciuta, S., Tsiamis, D. & Castaldi, M. J., 2018. *Gasification of Waste Materials, Technologies for Generating Energy, Gas, and Chemicals from Municipal Solid Waste, Biomass, Nonrecycled Plastics, Sludges, and Wet Solid Wastes*. UK: Elsevier Inc.
- Deparis, H. et al., 2010. *Étude de l'utilisation et de la mise en œuvre d'un gazogène*, Rouen: INSA.
- Deydier, A., 2012. *Modélisation d'un réacteur de gazéification à lit fixe*, Pau, France: Université de PAU et des Pays de l'Adour.
- Djaafri, M. et al., 2020. Enhanced Methane Production from Dry Leaflets of Algerian Date Palm (Phoenix dactylifera L.) Hmira Cultivar, by Alkaline Pretreatment. *Waste and Biomass Valorization*, Volume 11, p. 2661–2671.
- Djaafri, M., Kalloum, S., Soulimani, A. E. & Khelafi, M., 2019. Bioconversion of Dried Leaves from Algerian Date Palm (Phoenix dactylifera L.) to Biogas by Anaerobic Digestion. *International Journal of Engineering Research in Africa*, Volume 41, pp. 131-144.
- DSA, 2021. Adrar, Algeria: Direction des Services Agricoles (DSA), service des statistique.
- Dufour, A., 2007. *Optimisation de la production d'hydrogène par conversion du méthane dans les procédés de pyrolyse/gazéification de la biomasse*, France: université Nancy.
- Dupraz, P.-A., Mooser, M. & Pflug, D., 2009. *Dimensionnement des structures en bois: aide au calcul basé sur la SIA 265 "Construciton en bois"*. Lausanne: PPUR presses polytechniques.
- Ebadi, A. G. & Hisoriev, H., 2017. Gasification of algal biomass (Cladophora glomerata L.) with CO₂/H₂O/O₂ in a circulating fluidized bed. *Environmental Technology*, 40(6), pp. 1-21.
- Echegaray, N. et al., 2020. Phoenix dactylifera products in human health – A review. *Trends in Food Science & Technology*, Volume 105, p. 238–250.
- eia, 2021. *Biomass explained*. [En ligne] Available at: <https://www.eia.gov>[Accès le 2021].
- Eko Sb Setyawan, 2020. *Charcoal Briquette Production in the Middle East: Perspectives*. [En ligne] Available at: <https://www.bioenergyconsult.com/tag/date-palm-biomass/>[Accès le 2020 aout 2020].
- Elmay, Y. et al., 2014. Evaluation of date palm residues combustion in fixed bed laboratory reactor: A comparison with sawdust behaviour. *Renewable Energy*, Volume 62, pp. 209-215.
- El-Mously, H. & Darwish, E. A., 2020. Date Palm Byproducts: History of Utilization and Technical Heritage. Dans: M. Midani, N. Saba & O. Y. Alothman, édés. *Date Palm Fiber Composites, Composites Science and Technology*. Singapore: Springer Nature, pp. 3-71.
- El-Mously, H. & Darwish, E. A., 2020. Date Palm Byproducts: History of Utilization and Technical Heritage. Dans: M. Midani, N. Saba & O. Y. Alothman, édés. *Date Palm Fiber Composites, Processing, Properties and Applications*. Singapore: Springer Nature, pp. 3-71.
- Erakhrumen, A. A., 2012. Biomass Gasification: Documented Information for Adoption/Adaptation and Further Improvements toward Sustainable Utilisation of Renewable Natural Resources. *International Scholarly Research Notices*, Volume 2012, p. 8 pages.

Références bibliographiques

- Fang, C. et al., 2015. Seawater as Alternative to Freshwater in Pretreatment of Date Palm Residues for Bioethanol Production in Coastal and/or Arid Areas. *ChemSusChem*, Volume 8, p. 3823 – 3831.
- Farzad, S., Mandegari, M. A. & Görgens, J. F., 2016. A critical review on biomass gasification, co-gasification, and their environmental assessments. *Biofuel Research Journal*, Volume 12, pp. 483-495.
- Feng, D., Zhao, Y., Zhang, Y. & Sun, S., 2017. Effects of H₂O and CO₂ on the homogeneous conversion and heterogeneous reforming of biomass tar over biochar. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(18), pp. 13070-13084.
- Ferreira, S., Monteiro, E., Brito, P. & Vilarinho, C., 2019. A Holistic Review on Biomass Gasification Modified Equilibrium Models. *energies*, Volume 12, p. 160.
- Ferreira, S., Monteiro, E., Brito, P. & Vilarinho, C., 2019. A Holistic Review on Biomass Gasification Modified Equilibrium Models. *Energies*, 12(1), p. 160.
- Fuchs, J. et al., 2020. The impact of gasification temperature on the process characteristics of sorption enhanced reforming of biomass. *Biomass Conversion and Biorefinery*, Volume 10, p. 925–936.
- Gan Gek, H., Suriyati, S. & Noor Asma, F. A. S., 2016. A generic thermodynamique equilibrium model-based framework for biomass gasification processes. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(4), pp. 2222-2229.
- Gautam, G., 2010. *Parametric Study of a Commercial-Scale Biomass Downdraft Gasifier: Experiments and Equilibrium Modeling*, Alabama: Faculty of Auburn University.
- Ghosh, S., 2018. Gas Cleaning and Tar Conversion in Biomass Gasification. Dans: S. De, A. K. Agarwal, V. S. Moholkar & B. Thallada, éd. *Coal and Biomass Gasification. Recent Advances and Future Challenges*. Singapore: Springer Nature, pp. 151-172.
- Gil, M. et al., 2019. Assessing the influence of biomass properties on the gasification process using multivariate data analysis. *Energy Conversion and Management*, Volume 184, pp. 649-660.
- Gouamid, M., Ouahrani, M. R. & Bensaci, M. B., 2013. Adsorption Equilibrium, Kinetics and Thermodynamics of Methylene Blue from Aqueous Solutions using Date Palm Leaves. *Energy Procedia*, Volume 36, pp. 898-907.
- Goudeau, J.-C., 2001. *Combustion de melanges, combustibles classiques/biomasse: etude des modifications induites au niveau de la composition des fumees et des cendres*, France: RECORD.
- Gräbner, M., 2015. *Industrial Coal Gasification Technologies Covering Baseline and High-Ash Coal*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Gräbner, M., 2015. *Industrial Coal Gasification Technologies Covering Baseline and High-Ash Coal*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH.
- Gros-Balthazard, M., 2012. *Sur les origines, L'histoire évolutive et biogéographique du Palmier Dattier (Phoenix dactylifera.L): L'apport de la génétique et de la morphométrie*, Montpellier: Université Montpellier II.
- Gros-Balthazard, M. et al., 2013. Origines et domestication du palmier dattier (Phoenix dactylifera L.). État de l'art et perspectives d'étude. *Revue d'ethnoécologie*, 31 Décembre, Volume 4, pp. 1-15.
- Guangul, F. & S.A. sulaiman, A. R., 2013. Temperature profile and producer gas composition oh high température air gasification of oil palm fronds. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, Volume 16, p. 012067.

Références bibliographiques

- HABCHI, A., KALLOUM, S. & BRADAI, L., 2020. Follow the degradation of organic matter during composting of date palm (phoenix dactylifera L) waste by physicochemical properties, UV-visible and FT-IR analysis. *International Journal Of Environmental Analytical Chemistry*.
- Haghbin, M. R. & Shahrak, M. N., 2021. Process conditions optimization for the fabrication of highly porous activated carbon from date palm bark wastes for removing pollutants from water. *Powder Technology*, Volume 377, p. 890–899.
- Haleem, A. M. & Abdulgafoor, E. A., 2010. The Biosorption of Cr (VI) From Aqueous Solution Using Date Palm Fibers (Leef). *Al-Khwarizmi Engineering Journal* , 6(4), pp. 31 - 36.
- Heidenreich, S., Müller, M. & Foscolo, P. U., 2016. *Advanced Biomass Gasification, New Concepts for Efficiency Increase and Product Flexibility*. UK: Elsevier Inc. .
- Higman, C. & Burgt, M. v. d., 2008. *Gasification*. 2e éd. USA: Elsevier Inc.
- Hikmat, N. A., Qassim, B. B. & Khethi, M. T., 2014. Thermodynamic and Kinetic Studies of Lead Adsorption from Aqueous Solution onto Petiole and Fiber of Palm Tree. *American Journal of Chemistry*, 4(4), pp. 116-124.
- Hilgeman, R., 1972. History of date culture and research in Arizona. *FAO*, Volume 49, pp. 11-14.
- Indarto, A. & Palguandi, J., 2013. *Syngas : production, applications, and environmental impact*. New York: Nova Science Publishers.
- Jain, M., Mital, M. & Gupta, P., 2021. Bioenergy: Sustainable Renewable Energy. Dans: M. Srivastava, N. Srivastava & R. Singh, éd. *Bioenergy Research: Biomass Waste to Energy*. Singapore: Springer Nature, pp. 27-53.
- Jameel, H. & Keshwani, D. R., 2018. Thermochemical Conversion of Biomass to Power and Fuels. Dans: J. J. Cheng, éd. *Biomass to Renewable Energy Processes*. Boca Raton: aylor & Francis, pp. 375- 421.
- Jarungthammachote, S. & Dutta, A., 2007. Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier. *Energy*, 32(9), pp. 1660-1669.
- Jeswani, H. K., Whiting, A., Martin, A. & Azapagic, A., 2019. Environmental impacts of poultry litter gasification for power generation. *Energy Procedia*, Volume 161, pp. 32-37.
- K.Sarkar, D., 2015. *Fuels and Combustion*. Netherlands: Elsevier.
- Kabli, M. R. et al., 2022. H₂-rich syngas production from air gasification of date palm waste: an experimental and modeling investigation. *Biomass Conversion and Biorefinery*, Volume 12.
- Kamali, M. et al., 2022. Biochar for soil applications-sustainability aspects, challenges and future prospects. *Chemical Engineering Journal*, Volume 428, p. 131189.
- Khadhri, N., Saad, M. E. K., Mosbah, M. b. & Moussaoui, Y., 2019. Batch and continuous column adsorption of indigo carmine onto activated carbon derived from date palm petiole. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(1), p. 102775.
- Knapp, B. A. & Insam, H., 2011. Recycling of Biomass Ashes: Current Technologies and Future Research Needs. Dans: H. Insam & B. A. Knapp, éd. *Recycling of Biomass Ashes*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 1-16.
- Kple, M., 2015. *Etude des voies de valorisation des déchets menagers au Benin, Cas de la ville d'Abomey-Calavi*, Epinal: Universite d'ABOMEY-CALAVI & Universite de LORRAINE.

Références bibliographiques

- Kumar, A. & Ashokkumar Sharma, a. P. B., 2014. Biomass Gasification and Syngas Utilization. Dans: L. Wang, éd. *Sustainable Bioenergy Production*. Boca Raton: CRC Press, pp. 341-360.
- Kumar, A., Jones, D. D. & Hanna, M. A., 2009. Thermochemical Biomass Gasification: A Review of the Current Status of the Technology. *Energies*, Volume 2, pp. 556-581.
- Kumar, A., Sharma, A. & Bhandari, P., 2014. Biomass Gasification and Syngas Utilization. Dans: L. Wang, éd. *Sustainable Bioenergy Production*. Boca Raton: CRC Press, pp. 341-360.
- Kumar, A., Sharma, A. & Bhandari, P., 2014. Biomass Gasification and Syngas Utilization. Dans: L. Wang, éd. *Sustainable Bioenergy Production*. Boca Raton: CRC Press, pp. 341-360.
- Kumar, R. N. & Aarthi, V., 2020. From biomass to syngas, fuels and chemicals – A review. *AIP Conference Proceedings*, 2225(1), p. 070007.
- Kumar, U. & Paul, M. C., 2019. CFD modelling of biomass gasification with a volatile break-up approach. *Chemical Engineering Science*, Volume 195, pp. 413-422.
- Kwaasi, A. A. A., 2003. Date palm and sandstorm-borne allergens. *Clinical & Experimental Allergy*, 33(4), pp. 419-426.
- Lakhdari, F., 2014. *L'oasis en tant que référentiel d'adaptation aux conditions extremes chaudes*, Biskra, Algérie: Centre de recherche scientifique et technique sur les régions arides (CRSTRA).
- Lin, J.-C. M., Chen, H.-C. & Huang, J.-Y., 2006. Development of a Modified Biomass Updraft Fixed Bed Gasifier with an Embedded Combustor. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 29(3), pp. 557-562.
- M. R. Ravi, S. K., 2018. Thermodynamics and Kinetics of Gasification. Dans: S. De, A. K. Agarwal, V. S. Moholkar & B. Thallada, édés. *Coal and Biomass Gasification ,Recent Advances and Future Challenges*. Singapore: Springer nature, pp. 37-62.
- Makkawi, Y. et al., 2019. Fast pyrolysis of date palm (*Phoenix dactylifera*) waste in a bubbling fluidized bed reactor. *Renewable Energy*, Volume 143, pp. 719-730.
- Mauerhofer, A. et al., 2019. Dual fluidized bed steam gasification: Change of product gas quality along the reactor height. *Energy*, Volume 173, p. 1256e1272.
- Melgar, A., Pérez, J. F., Laget, H. & Horillo, A., 2007. Thermochemical equilibrium modelling of a gasifying process. *Energy Conversion and Management*, 48(1), pp. 59-67.
- Meradi, S., Dakhia, N. & Aouachria, M., 2016. Déchets de palmeraie: alternative alimentaire du cheptel prometteuse en régions arides Algérie. *Livestock Research for Rural Development*, 28(9).
- Meraneh, A. D., 2010. *Détermination du sexe chez le palmier dattier : Approches histo-cytologiques et moléculaires*, Montpellier: Université Montpellier II.
- Michela, C., Villetta, M. L., Piazzullo, D. & Cirillo, D., 2021. A Phenomenological Model of a Downdraft Biomass Gasifier Flexible to the Feedstock Composition and the Reactor Design. *energies*, 14(14), p. 4226.
- Michel-Dansac, F. & Caubet, A. F., 2013. L'iconographie et le symbolisme du palmier dattier dans l'Antiquité (Proche-Orient, Égypte, Méditerranée orientale). *Revue D'ethnoécologie*, 4(4), pp. 1-16.
- Mikulandrić, R. et al., 2014. Artificial neural network modelling approach for a biomass gasification process in fixed bed gasifiers. *Energy Conversion and Management*, Volume 87, pp. 1210-1223.

Références bibliographiques

Miller, K., 2013. Coal analysis. Dans: D. Osborne, éd. *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production*. UK: Woodhead Publishing , pp. 151-189.

Ministère de l'Agriculture et de Développement Rural, 2019. *Agriculture Saharienne*, Algérie: s.n.

Ministère de l'énergie , 2019. *Energies Nouvelles, Renouvelables et Maitrise de l'Energie*. [En ligne]Available at: <https://www.energy.gov.dz>[Accès le 2021].

Mohammed, M. et al., 2011. Air gasification of empty fruit bunch for hydrogen-rich gas production in a fluidized-bed reactor. *Energy Conversion and Management*, Volume 52, p. 1555–1561.

Molino, A., Larocca, V., Chianese, S. & Musmarra, D., 2018. Biofuels Production by Biomass Gasification: A Review. *Energies*, 11(4), p. 811.

Morin, M. P., 2017. *Gazéification de la biomasse en double lit fluidisé circulant: étude des réactions élémentaires de gazéification et de combustion du char et de reformage des goudrons*, Toulouse: Institut National Polytechnique.

Morin, M., Pécate, S. & Hemati, M., 2018. Experimental study and modelling of the kinetic of biomass char gasification in a fluidized bed reactor. *Chemical Engineering Research and Design*, Volume 131, pp. 488-505.

Moulai, A. & Yahaya, A., 2019. *Note d'actualité sur les Oasis d'Algérie*, Algérie: Réseau Associatif de Développement Durable des Oasis.

Moulay hassan, S., 2003. *Le Palmier Dattier base de la mise en valeur des oasis au Maroc: Techniques phoenicoles et Création d'oasis*. Rabat, Maroc: INRA.

Munier, P., 1973. *Le palmier dattier*. Paris: Maison neuve et Larousse.

Nadir, N., Bouguettaia, H., Boughali, S. & Bechki, D., 2019. Use of a new agricultural product as thermal insulation for solar collector. *Renewable Energy*, Volume 134, pp. 569-578.

Nasser, R. A. et al., 2016. Chemical Analysis of Different Parts of Date Palm (*Phoenix dactylifera* L.) Using Ultimate, Proximate and Thermo-Gravimetric Techniques for Energy Production. *energies*, 9(5), p. 374.

Nhuchhen, D. R., 2016. Prediction of carbon, hydrogen, and oxygen compositions of raw and torrefied biomass using proximate analysis. *Fuel*, Volume 180, p. 348–356.

Nhuchhen, D. R. & Salam, P. A., 2012. Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: A new approach. *Fuel*, Volume 99, p. 55–63.

Nouh, A. H., 2016. *Simulation of biomass gasification*, Bragança: Escola Superior de Tecnologia e Gestão.

Nugroho, P. N. A. & Torii, S., 2021. Simplified gasification simulation using zerodimensional model of empty palm fruit bunch. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 1010(1), p. 012005.

Nugroho, P. & Torii, S., 2021. Simplified gasification simulation using zero-dimensional model of empty palm fruit bunch. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1010(012005), pp. 1-6.

Nujic, M., Velic, N. & Habuda-Stanić, M., 2019. Application of Date-Palm Fibres for the Wastewater Treatment. Dans: M. Naushad & E. Lichtfouse, édés. *Sustainable Agriculture Reviews 34 : Date Palm for Food, Medicine and the Environment*. Switzerland: Springer Nature, pp. 179-192.

Références bibliographiques

- Ojolo, S., Abolarin, S. & Adegbenro, O., 2012. *Design and Development of Updraft Gasifier*. Lagos, Nigeria: LAP LAMBERT Academic Publishing.
- Olwa, J., 2011. *Investigation of Thermal Biomass Gasification for Sustainable Small Scale Rural Electricity Generation in Uganda*, STOCKHOLM, SWEDEN: KTH School of Industrial Engineering and Management.
- Ou-Zine, M. et al., 2020. Evaluation of compost quality and bioprotection potential against Fusarium wilt of date palm. *Waste Management*, Volume 113, p. 12–19.
- Ozbayoglu, G., 2018. Energy Production From Coal. Dans: I. Dincer, éd. *Comprehensive Energy Systems*. Netherlands: Elsevier, pp. 788-821.
- Pandey, B., Prajapati, Y. K. & Sheth, P. N., 2021. CFD analysis of biomass gasification using downdraft gasifier. *Materials today: Proceedings*, 44(6), pp. 4107-4111.
- Pang, S., 2016. Fuel flexible gas production: biomass, coal and bio-solid wastes. Dans: J. Oakey, éd. *Fuel Flexible Energy Generation, Solid, Liquid and Gaseous Fuels*. UK: Elsevier, pp. 241-269.
- Panwar, N. & Richa Kothari, V. T., 2012. Thermo chemical conversion of biomass – Eco friendly energy routes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 16, p. 1801–1816.
- Pecha, M. B. & Garcia-Perez, M., 2020. Pyrolysis of lignocellulosic biomass: oil, char, and gas. Dans: A. Dahiya, éd. *Bioenergy*. UK: Academic Press, pp. 581-619.
- Peyron, G., 2000. *Cultivé le palmier dattier*. Djibouti: CIRAD.
- Pinkard, B. R. et al., 2019. Supercritical water gasification: practical design strategies and operational challenges for lab-scale, continuous flow reactors. *Heliyon*, 5(2), p. e01269.
- Pommeret, A. et al., 2017. Techno-Economic Study and Environmental Assessment of Food Waste Based Biorefinery. Dans: P. Morone, F. Papendiek & V. E. Tartiu, édés. *Food Waste Reduction and Valorisation, Sustainability Assessment and Policy Analysis*. Switzerland: Springer International Publishing, pp. 121-146.
- Puig-Arnavat, M., Hernández, J. A., Bruno, J. C. & Coronas, A., 2013. Artificial neural network models for biomass gasification in fluidized bed gasifiers. *Biomass and Bioenergy*, Volume 49, pp. 279-289.
- Rambabu, K., Bharath, G., Banat, F. & P. L. S., 2020. Biosorption performance of date palm empty fruit bunch wastes for toxic hexavalent chromium removal. *Environmental Research*, Volume 189, p. 109694.
- Rambush, N. E., 1923. *Modern Gas Producers*. London : Benn Brothers.
- Rauch, R., Hrbek, J. & Hofbauer, H., 2014. Biomass gasification for synthesis gas production and applications of the syngas. *WIREs Energy and Environment*, 3(4), pp. 343-362.
- Ravi, M. & Kohli, S., 2018. Thermodynamics and kinetics of gasification. Dans: S. De, A. K. Agarwal, V. Moholkar & B. Thallada, édés. *Coal and biomass gasification, recent advances and Future challenges*. Singapore: Springer Nature, pp. 37-62.
- RECORD, 2009. *Techniques de production d'électricité à partir de biogaz et de gaz de synthèse*, s.l.: s.n.
- Rehmet, C., 2013. *Étude théorique et expérimentale d'une torche plasma triphasée associée à un procédé de gazéification de matière organique*, Paris: École nationale supérieure des mines.

Références bibliographiques

- Rezaiyan, J. & Cheremisinoff, N. P., 2005. *Gasification Technologies. A Primer for Engineers and Scientists*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Rezma, S., Birot, M., Hafiane, A. & Deleuze, H., 2017. Physically activated microporous carbon from a new biomass source: Date palm petioles. *Comptes Rendus Chimie*, 20(9-10), pp. 881-887.
- Riahi, K., Mammou, A. B. & Thayer, B. B., 2009. Date-palm fibers media filters as a potential technology for tertiary domestic wastewater treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 161(2-3), pp. 608-613.
- Riahi, K. et al., 2009. Biosorption characteristics of phosphates from aqueous solution onto Phoenix dactylifera L. date palm fibers. *Journal of Hazardous Materials*, Volume 170, p. 511–519.
- Richardson, Y. et al., 2015. Biomass Gasification to Produce Syngas. Dans: A. Pandey, T. Bhaskar, M. Stöcker & R. K. Sukumaran, éd. *Recent Advances in Thermo-Chemical Conversion of Biomass*. Netherlands: Elsevier, pp. 213-250.
- Rogaume, Y., 2009. La combustion du bois et de la biomasse. *Pollution atmosphérique*, Issue Numéro spécial, pp. 65-81.
- Rubiera, F., Pis, J. J. & Pevida, C., 2011. Raw Materials, Selection, Preparation and Characterization. Dans: L. Puigjaner, éd. *Syngas from Waste. Emerging Technologies*. London: Springer-Verlag , pp. 11-22.
- Saidur, R. et al., 2011. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 15, pp. 2262-2289.
- Sait, H. H., Hussain, A., Salema, A. A. & Ani, F. N., 2012. Pyrolysis and combustion kinetics of date palm biomass using thermogravimetric analysis. *Bioresource Technology*, Volume 118, pp. 382-389.
- Sait, H. H. & Salema, A. A., 2015. Microwave dielectric characterization of Saudi Arabian date palm biomass during pyrolysis and at industrial frequencies. *Fuel*, Volume 161, p. 239–247.
- Salem Fethya & Kalloum Slimane, 2017. Realization and Testing of an Updraft Gasifier Preliminary Study *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, Vol. 6(2), pp. 114-117, DOI: 10.18178/ijmerr.6.2.114-117.
- Sallon, S. et al., 2008. Germination, Genetics, and Growth of an Ancient Date Seed. *Science*, 320(5882), p. 1464.
- Salomón-Torres, R. et al., 2021. Date Palm Pollen: Features, Production, Extraction and Pollination Methods. *Agronomy*, 11(3), p. 504.
- Sarkar, A., Sarkar, S. D., Lankanki, M. & Chowdbury, R., 2017. Studies on Pyrolysis Kinetic of Newspaper Wastes in a Packed Bed Reactor: Experiments, Modeling, and Product Characterization. Dans: E. C. Rada, éd. *Thermochemical waste treatment : Combustion, Gasification, and Other Methodologies*. Canada: Apple Academic Press, pp. 197-220.
- Selmani, C., 2018. *Contribution à la préservation du palmier dattier : étude de l'androgenèse et de l'organogenèse de quelques cultivares d'intérêt*, Bab ezzouar. Alger: Université des sciences et de la technologies Houari Boumediene.
- Senoussi, A., Babahani, S. & Sebihi, A., 2017. le palmier et la datte : un arbre et un fruit a haute valeur ajoutée. cas de la région de Ouargla. *African Review of Science, Technology and Development*, 2(1), pp. 1-12.

Références bibliographiques

- Shirke, V., Ranade, S. & Bansal, R., 2018. Equilibrium Model for Biomass Gasification: Study of effect of Biomass properties and Operating parameters. *Materials Today: Proceedings*, Volume 5, p. 22983–22992.
- Sikarwar, V. S. et al., 2016. An overview of advances in biomass gasification. *Energy and Environmental Science*, 9(10), pp. 2939–2977 |.
- Sikarwar, V. S. et al., 2017. Progress in biofuel production from gasification. *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 61, pp. 189-248.
- Silva, D. A. d., Eloy, E., Caron, B. O. & Trugilho, P. F., 2019. Elemental Chemical Composition of Forest Biomass at Different Ages for Energy Purposes. *Floresta e Ambiente*, 26(4), p. e20160201.
- Siripaiboon, C., Sarabhorn, P. & Areeprasert, C., 2020. Two-dimensional CFD simulation and pilot-scale experimental verification of a downdraft gasifier: effect of reactor aspect ratios on temperature and syngas composition during gasification. *International Journal of Coal Science & Technology* volume, Volume 7, p. pages536–550.
- Situmorang, Y. A. et al., 2020. Small-scale biomass gasification systems for power generation (<200 kW class): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 117, p. 109486.
- Smith, J. D. et al., 2019. Validation and Application of a Kinetic Model for Downdraft Biomass Gasification Simulation. *chimical engineering & technology*, 42(12), p. 2505–2519.
- Souza-Santos, M. L. d., 2010. *Solid fuels combustion and gasification : modeling, simulation, and equipment operations*. 2e éd. Boca Raton: Taylor and Francis Group.
- Speight, j. G., 2015. Types of gasifier for synthetic liquid fuel production: design and technology. Dans: R. Luque & J. G. Speight, éd. *Gasification for Synthetic Fuel Production, Fundamentals, Processes, and Applications*. UK: Elsevier Ltd., pp. 29- 55.
- Speight, J. G., 2020. *Handbook of Gasification Technology, Science, Processes, and Applications*. USA: Wiley-Scrivener Publishing.
- Stirling, E., 1950. The History of the Gas Light and Coke Company 1812-1949. *The Economic Journal*, 60(238), pp. 393-395.
- Sulaiman, F., Suhendi, E., Prastuti, N. & Choir, O. A., 2019. The Effect of Temperature and Time of Gasification Process and The Addition of Catalyst to The Composition of The Combustible Gas from The Wastes of Tobacco Leaves With Gasifier Updraft. *Flywheel: Jurnal Teknik Mesin Untirta*, V(1), pp. 01 - 08.
- Taghizadeh-Alisaraei, A., Motevali, A. & Ghobadian, B., 2019. Ethanol production from date wastes: Adapted technologies, challenges, and global potential. *Renewable Energy*, Volume 143, pp. 1094-1110.
- Tagutchou, J. P., 2008. *GAZEIFICATION DU CHARBON DE PLAQUETTES FORESTIERES : PARTICULE ISOLEE ET LIT FIXE CONTINU*, PERPIGNAN: UNIVERSITE VIA DOMITIA.
- Tahri, K., 2018. *etude de l'architecture et de la biomasse du systeme racinaire de palmier dattier (Phoenix dactylifera L.) ADULTE*, Biskra: Université MOHAMED KHIDER.
- Tang, L., Huang, H., Hao, H. & Zhao, K., 2013. Development of plasma pyrolysis/gasification systems for energy efficient and environmentally sound waste disposal. *Journal of Electrostatics*, Volume 7, pp. 839-847.

Références bibliographiques

- Teixeira, G., 2012. *Gazeification de charbon de granules de bois :comportement thermochimique et mecanique d'un lit fixe continu*, Toulouse: Institut National Polytechnique.
- Thanh Phong, M. & Nguyen, D. Q., 2020. Gasification of Biomass. Dans: T. P. Basso, T. O. Basso & L. C. Basso, éd. *Biotechnological Applications of Biomass*. UK: IntechOpen.
- Timsina, R., Thapa, R. K., Moldestad, B. M. E. & Eikeland, M. S., 2021. Computational particle fluid dynamics simulation of biomass gasification in an entrained flow gasifier. *Chemical Engineering Science: X*, Volume 12, p. 100112.
- Toutaine, G., 1967. Le palmier dattier culture et production. *Al awamia*, Volume 25, pp. 83-151.
- Tumuluru, J. S., 2018. Thermal Pretreatment of Biomass to make it Suitable for Biopower Application. Dans: J. S. Tumuluru, éd. *Biomass Preprocessing and Pretreatments for Production of Biofuels Mechanical, Chemical and Thermal Methods*. Boca Raton: CRC Press, pp. 255-291.
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K. & Vassileva, C. G., 2010. An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, Volume 89, p. 913–933.
- Vidian, F., Surjosatyo, A. & Nugroho, Y. S., 2016. Thermodynamic Model for Updraft Gasifier with External Recirculation of Pyrolysis Gas. *Journal of Combustion*, 2016(15), pp. 1-6.
- Wakil, W. et al., 2015. Date Palm Production and Pest Management Challenges. Dans: W. Wakil, J. R. Faleiro & T. A. Miller, éd. *Sustainable Pest Management in Date Palm: Current Status and Emerging Challenges*. Switzerland: Springer International Publishing, pp. 1-11.
- Yang, Y. et al., 2021. Gasification of refuse-derived fuel from municipal solid waste for energy production: a review. *Environmental Chemistry Letters*.
- Yosim, S. J., 1981. The Molten Salt Coal Gasification Process. *Proceedings of The Electrochemical Society*, Volume 1981-9 , pp. 439-451.
- Zafar, S., 2020. *Date Palm as Biomass Resource*. [En ligne]Available at: <https://www.bioenergyconsult.com/tag/date-palm-biomass/>[Accès le 21 aout 2020].
- Zhang, S. et al., 2021. Effect of auto thermal biomass gasification on the sintering of simulated ashes. *Applications in Energy and Combustion Science*, p. 100054.
- Zhou, B. et al., 2018. Tar formation and evolution during biomass gasification: An experimental and theoretical study. *Fuel*, Volume 234, pp. 944-953.

Publications
et
Communications

Publication et communication

Publication internationale :

- “*Realization and Testing of an Updraft Gasifier Preliminary Study,*”

Salem Fethya, Kalloum Slimane. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, Vol. 6, No. 2, pp. 114-117, March 2017. DOI: 10.18178/ijmerr.6.2.114-117

- “*Enhanced Methane Production from Dry Leaflets of Algerian Date Palm (Phoenix dactylifera L.) Hmira Cultivar, by Alkaline Pretreatment*”

Mohammed Djaafri, Slimane Kalloum, Kamel Kaidi, **Fethya Salem**, Soumia Balla, Djelloul Meslem, Abdelkader Iddou. Waste and Biomass Valorization, Vol 11, pp2661-2671(2020). <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00574-w>

Communication internationale

- “*Enhanced methane production from dried leaves of algerian date palm (phoenix dactylifera l.) by alkaline pretreatment*” Mohammed Djaafri, Slimane Kalloum, Kamel kaidi, soumia bella, **Fethya salem**, Ahmed Tahri and Abdelkader Iddou. The 2nd International Conference on Alternative Fuels and Energy: Future and Challenges – ICAFE 2017, 23-25 October 2017, Daegu, South Korea

- “*Thermodynamic equilibrium model of an updraft gasifier*”

Salem Fethya, Saadi Zine, Kalloum Slimane. Conférence Internationale sur les Matériaux, le Patrimoine et l’Environnement en Zones Arides, Université Ahmed DRAIA, Adrar 17 & 18 février 2019 <http://univ-adrar.dz/icmapeaz2019/>

- “*Bioenergy production from wastes of algerian date palm (phoenix dactylifera L.): review*” Mohammed Djaafri, Ikram Mehrez, **Fethya Salem**, Slimane Kalloum, Gopalakrishnan Kumar. 4th International Conference on Alternative Fuels, Energy and Environment (ICAFEE): Future and Challenges; Date: 18 – 21, October 2019. Feng Chia University, Taichung, Taiwan.

Communication nationale

- “*Etude prospective du potentiel de la biomasse lignocellulosique phoenicicole pour une*

Publication et communication

éventuelle valorisation énergétique”

Salem Fethya, Kalloum Slimane. Journée d'étude sur les Énergies renouvelables, Matériaux et Environnement (jeem'18) 19 avril 2018, université d'Adrar.

- *Conception et expérimentation d'un gazéificateur pour le traitement thermique des déchets organiques*

Salem Fethya, Kalloum Slimane, (JPORS-2017) 18-23 mai 2017, <https://www.univ-adrar.edu.dz/>

Brevet :

Brevet **9964** : *gazéificateur de biomasse à lit fixe contrecourant up draft*. N° de dépôt : **170377**