



*Université de Ghardaïa*

N° d'ordre :  
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies  
Département des Sciences et Technologie

**Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de**

**MASTER**

**Domaine : *Sciences et Technologies***

**Filière : *Génie des procédés***

**Spécialité : *contrôle de qualité***

**Par : Ben khelifa Amel et Nouacer Asma**

**Thème**

***Evaluation de la qualité énergétique d'un biocombustible solide. Cas de la biomasse phoenicicole***

**Soutenu publiquement le : 20/04/2017**

**Devant le jury :**

<b>AGGOUN Med Salah</b>	<b>Maître assistant classe A</b>	<b>Univ. Ghardaïa</b>	<b>Président du jury</b>
<b>BOUKHELIF Dina</b>	<b>Maître assistante classe A</b>	<b>Univ. Ghardaïa</b>	<b>Examinatrice</b>
<b>REZZAG Moussa</b>	<b>Directeur CACQE</b>	<b>Univ. Ghardaïa</b>	<b>Examineur</b>
<b>BOUSDIRA Khalida</b>	<b>Maître de Recherche classe B</b>	<b>URAER Ghardaïa</b>	<b>Encadreur</b>
<b>YAHIAOUI Fatma Zohra</b>	<b>Attachée de Recherche</b>	<b>URAER Ghardaïa</b>	<b>Co- Encadreur</b>

**Année universitaire 2016/2017**

# *Dédicaces*

*Ce travail modeste est dédié :*

*À ma chère mère.*

*À mon cher père.*

*À mon cher mari.*

*À ma très belle fille Rana Djinane,*

*À tous mes proches de la famille Benkhelifa , et plus  
particulièrement, mes sœurs et mes frères tout à son nom , et  
sans oublier les familles Laouar et Hamitouche.*

*Et à tous ce qui ont enseigné moi au long de ma vie scolaire .*

*Amel*

## Remerciements

Nous remercions tout d'abord Allah qui nous a donné le courage et la patience pour accomplir ce travail.

Nous saisissons cette occasion pour exprimer nos vifs remerciements à toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, particulièrement :

- L'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER/Ghardaïa).
- Le Centre Algérien de Contrôle de Qualité et d'Emballage (CACQE/Ghardaïa).
- L'Université de Ghardaïa.

Nous remercions sincèrement notre promotrice Dr Khalida BOUSDIRA, Maître de recherche B à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER/Ghardaïa) pour avoir accepté de diriger ce travail, de nous avoir permis de bénéficier de son expérience, et de sa patience. Elle s'est toujours montrée à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'elle a bien voulu nous consacrer.

Nos vifs remerciements s'adressent également à notre co-encadreur Mme Fatma Zohra YAHIAOUI, attachée de recherche à l'URAER/Ghardaïa pour ses orientations et les conseils prodigués pour la réalisation de ce mémoire.

L'expression de notre haute reconnaissance va vers M. Moussa REZZAG, Directeur du Centre Algérien de Contrôle de Qualité et d'Emballage (CACQE/Ghardaïa), qui n'a épargné aucun effort pour nous aider à la réalisation de la partie expérimentale.

Nous exprimons également notre gratitude aux membres du jury, qui nous ont honorés en acceptant d'examiner ce modeste travail.

Nous remercions tous les enseignants du département de Sciences et de Technologies de l'Université de Ghardaïa.

## Index des tableaux

### Partie Bibliographique

Tableau 1.1: Systeme de classification de la biomasse .....	6
Tableau 2.1: Comparaison de la composition des différents types de biomasse .....	17
Tableau 2.2: Composition chimique des principales catégories de la biomasse .....	21
Tableau 2.3: Composition minérale des principales catégories de la biomasse .....	22
Tableau 3.1: Classification botanique du palmier dattier .....	30

### Partie Expérimentale

Tableau 1 : Cultivars étudiés .....	34
Tableau 2 : Désignation des principaux sous-produits étudiés du palmier dattier .....	34
Tableau 3 : Protocoles et méthodes analytiques utilisées pour la caractérisation chimique des principaux sous-produits du palmier dattier .....	35
Tableau 4 : Calcul des erreurs absolues et relatives pour CHO et FC .....	36
Tableau 5 : Analyse de la variance ANOVA de la composition immédiate, élémentaire et du pouvoir calorifique de la biomasse phoenicicole .....	44
Tableau 6 : Corrélation entre les paramètres de composition immédiate et le pouvoir calorifique .....	45
Tableau 7 : Valeurs propres .....	45
Tableau 8 : Coordonnées factorielles des variables .....	46
Tableau 9 : Coordonnées factorielles des sous produits phoenicicoles .....	48
Tableau 10 : Classification de la biomasse phoenicicole .....	51

## Index des figures

### Partie Bibliographique

Figure 1.1: Filières de valorisation de la biomasse .....	7
Figure 1.2: Schéma représentatif de la gazéification .....	9
Figure 1.3 : Combustion .....	9
Figure 1.4: Processus thermique de la pyrolyse .....	10
Figure 2.1 : Les Trois constituants de la biomasse .....	14
Figure 2.2 : La Structure de la cellulose.....	15
Figure 2.3: La Structure de la hémicellulose .....	16
Figure 2.4 :La Structure de la lignine.....	16
Figure 3.1: Les palmiers dattier .....	26
Figure 3. 2: Le palmier dattier .....	31

### Partie Expérimentale

Figure 1: Teneurs en humidité de la biomasse phoenicicole .....	37
Figure 2: Composition immédiate de la biomasse phoenicicole.....	38
Figure 3 : Composition élémentaire de la biomasse phoenicicole .....	41
Figure 4 : Pouvoir calorifique HHV (MJ /Kg) de la biomasse phoenicicole.....	43
Figure 5 : Projection des variables sur les plans (1 x 2) (a) et (1 x 3) (b) .....	47
Figure 6 : Projection des cas sur les plans (1 x 2) (a) et (1 x 3) (b) avec LIF_AZ.....	49
Figure 7 : Projection des cas sur les plans (1 x 2) (a) et (1 x 3) (b) sans LIF_AZ .....	50
Figure 8 : Composition immédiate de 1 <sup>er</sup> groupe.....	52
Figure 9 : Composition immédiate de 2 <sup>e</sup> groupe.....	53
Figure 10 : Composition immédiate de 3 <sup>e</sup> groupe.....	54



**Abréviations :**

<b>%</b>	: Pourcent
<b>°C</b>	: Degré Celsius
<b>A</b>	: Teneur en Cendres (%)
<b>AB</b>	: Biomasse Animale
<b>AD</b>	: Addaf
<b>ADL</b>	: Addala
<b>AEBIOM</b>	: Association Européenne de Biomasse
<b>ARJ</b>	: Arjoun
<b>AZ</b>	: Azerza
<b>BQ</b>	: Bent Qbala
<b>CB</b>	: La biomasse Contaminée
<b>Cel</b>	: Cellulose
<b>DB</b>	: Degla Beyda
<b>DJ</b>	: Djerid
<b>DP</b>	: Degré de Polymérisation
<b>DSA</b>	: Direction des Services Agricole
<b>FAO</b>	: Food and Agriculture Organization
<b>FC</b>	: Carbone Fixe par rapport à la matière sèche (%)
<b>GGH</b>	: Ghars
<b>HAB</b>	: La Biomasse Herbacée et Agricole
<b>HAG</b>	: Graminées
<b>HAR</b>	: Autres résidus
<b>HAS</b>	: Pailles
<b>Hem</b>	: Hemicellulose
<b>HHV</b>	: Pouvoir calorifique supérieur (MJ/Kg)
<b>KER</b>	: Kernaf
<b>KH</b>	: Khallab
<b>KSB</b>	: Ksebba
<b>LHV</b>	: Pouvoir calorifique inférieur (MJ/Kg)
<b>LIF</b>	: Lif ou fibrilium
<b>Lig</b>	: Lignine
<b>M</b>	: Teneur en humidité (%)
<b>Max</b>	: Maximum

---

<b>Min</b>	: Minimum
<b>MJ/Kg</b>	: Méga Joule par kilogramme
<b>Moy</b>	: Moyenne
<b>OPEP</b>	: Organisation des pays exportateurs de pétrole
<b>PB</b>	: Biomasse Phoenicicole
<b>SAQ</b>	: Saqqas
<b>TAF</b>	: Tafazouine
<b>TAN</b>	: Tanaslit
<b>TIM</b>	: Timjauhert
<b>URAER</b>	: Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelable Ghardaïa
<b>VM</b>	: Volatiles Matières par rapport à la matière sèche (%)
<b>WWB</b>	: Bois et biomasse ligneuse
<b>X<sub>c</sub></b>	: Fraction massique en carbone %
<b>X<sub>H</sub></b>	: Fraction massique en hydrogène %
<b>X<sub>o</sub></b>	: Fraction massique en oxygène %



## Sommaire

<b>Dédicace</b>	<b>i</b>
<b>Remerciements</b>	<b>ii</b>
<b>Index des tableaux</b>	<b>iii</b>
<b>Index des figures</b>	<b>iv</b>
<b>Abréviations</b>	<b>v</b>
<b>Sommaire</b>	<b>vi</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1. Introduction Générale</b>	<b>1</b>
<b>2. Présentatton du projet</b>	<b>2</b>
<b>3. Références</b>	<b>3</b>
<b>Partie bibliographique</b>	<b>4</b>
<b>Chapitre 1 : Considérations générales sur la biomasse</b>	<b>4</b>
<b>1. Introduction</b>	<b>4</b>
<b>2. Présentation de la biomasse</b>	<b>5</b>
<b>3. Classification de la biomasse</b>	<b>6</b>
<b>4. Énergie de biomasse</b>	<b>6</b>
<b>5. Débouchés économiques actuels de la biomasse</b>	<b>7</b>
<b>6. Transformations de la biomasse</b>	<b>7</b>
<b>6.1. Méthodes Biologiques</b>	<b>8</b>
<b>6.2. Méthodes Thermochimiques</b>	<b>8</b>
<b>6.2.1. Gazéification</b>	<b>8</b>
<b>6.2.2. Combustion</b>	<b>9</b>
<b>6.2.3. Pyrolyse</b>	<b>10</b>
<b>7. Valorisation énergétique de la biomasse</b>	<b>11</b>
<b>8. Références</b>	<b>12</b>
<b>Chapitre 2 : Composition de la biomasse</b>	<b>13</b>
<b>1. Introduction</b>	<b>13</b>
<b>2. Composition structurale</b>	<b>13</b>

---

2.1. Cellulose	14
2.2. Hémicellulose	15
2.3. Lignine	16
3. Composition élémentaire	17
3.1. Carbone, hydrogène et oxygène	17
3.2. Azote	18
3.3. Soufre	18
3.4. Chlore	18
3.5. Cendres élémentaires	18
4. Composition immédiat	18
4.1. Humidité (M)	19
4.2. Matières volatiles (VM)	19
4.3. Carbone fixe ou non combiné (FC)	19
4.4. Cendres (A)	20
5. Pouvoir calorifique	23
5.1. Pouvoir calorifique inférieur (HHV)	23
5.2. Pouvoir calorifique supérieur (LHV)	23
6. Références	24
Chapitre 3 : La Biomasse Phoenicicole	25
1. Introduction générale	25
2. Palmier dattier ( <i>Phoenix dactylifera</i> L.)	25
2.1. Particularités	26
2.2. Description	26
2.3. Culture	27
2.4. Variétés	27
2.5. Inventaire des cultivars	28
3. Utilisations	28
4. Biomasse phoenicicole dans l'écosystème oasien	29
5. Types de la biomasse phoenicicole	30
5.1 Biomasse saccharifère	30

---

<b>5.2. Biomasse lignocellulosiques (palmes, pédicelle, lif, kornaf, spathe)</b>	<b>30</b>
5.2.1. Stipe	30
5.2.2. Enveloppe de la spathe	31
5.2.3. Palme	31
<b>6. Palmier Dattier en Algérie</b>	<b>32</b>
6.1. Origine	32
6.2. Superficie et nombre	32
<b>7. Références</b>	<b>33</b>
<b>Partie Expérimentale</b>	<b>34</b>
<b>1. Matériels et Méthodes d'analyses</b>	<b>34</b>
1.1. Présentation de la région d'étude et des échantillons	34
1.2. Méthodes d'analyses	34
1.3. Appareillage utilisé	35
<b>2. Calcul d'erreurs</b>	<b>35</b>
2.1. Paramètres expérimentaux	35
2.2. Paramètres calculés	36
2.3. Traitement statistique de résultats	36
<b>3. Interprétation et résultats</b>	<b>37</b>
3.1. Composition immédiate	37
3.2. Composition élémentaire	41
3.3. Pouvoir calorifique	43
3.4. Classification de la biomasse phoenicicole	45
<b>4. Références</b>	<b>55</b>
<b>Conclusion Générale</b>	<b>56</b>

## 1. Introduction générale

Le développement de la biomasse-énergie connaît aujourd'hui un engouement planétaire en vue d'une substitution partielle ou totale des combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz..). Dans le contexte oasien, le palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) apparaît comme une biomasse prometteuse pour une telle valorisation. Ainsi, l'évaluation de sa qualité énergétique constitue une démarche nécessaire pour l'optimisation du choix des thermoconversions potentielles [1-5].

Le choix de cette biomasse se justifie par son importance écologique dans l'écosystème local (oasis) et par conséquent son abondance et sa disponibilité : en effet, une estimation récente de cette ressource a montré que l'Algérie dispose d'un parc phoenicicole de 17 955 366 de palmiers [6]. Ceci génère une quantité de déchets lignocellulosiques de 807 992 tonnes. A l'échelle locale, cette même étude a révélé des quantités appréciables de cette biomasse [3, 7].

Par ailleurs, l'analyse de la qualité énergétique et chimique des deux principaux cultivars du palmier dattier (Deglet Nour et Ghars) a montré leur compatibilité avec les biocombustibles solides conventionnels. En effet, la composition immédiate a montré une faible teneur en humidité (~5%), une teneur élevée en matière volatile et un taux variable en cendres. Sur le plan calorimétrique, le pouvoir calorifique de cette biomasse est estimé en moyenne à 18 MJ/kg. Enfin une composition élémentaire avantageuse a également été révélée pour la biomasse phoenicicole étudiée [3-5].

En considérant l'aspect phytogénétique du palmier dattier, l'Algérie dispose d'une biodiversité importante, qui se traduit par la présence de près d'un millier de cultivars [8]. Ceci nous conduit à nous intéresser à ces différentes variétés et à étudier leurs aptitudes et leurs limites énergétiques.

Ainsi, cette étude, proposée par l'équipe de recherche « gisement des énergies renouvelables » de l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelable URAER/Ghardaïa, rentre dans le cadre du projet de recherche « évaluation et prédiction des gisements énergétiques renouvelables ». Elle vise la caractérisation énergétique des principaux sous-produits du palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) des huit cultivars les plus dominants de l'oasis de Guerrara (Timjahart, Tafiziouine, Azarza, Ksebba, Degla Beïda, Bent Qbala, Tanaslit et Addala), et se base sur la réalisation des analyses immédiates (humidité, cendre, matière volatile et carbone fixe), la mesure du pouvoir calorifique ainsi que la détermination de la

composition élémentaire. Cette composition est calculée à partir d'un modèle empirique établie sur la base de la teneur en matière volatile et en cendre.

Ce travail a donc pour but de répondre aux interrogations suivantes :

- Quelle est la composition immédiates (humidité, cendres, carbone fixe matière volatiles) et élémentaire des principaux sous-produits des cultivars étudiés ?
- Quelle est la qualité énergétique des principaux sous-produits des cultivars étudiés ?
- Quels sont les sous-produits phoenicicoles et les plus intéressants énergétiquement ?
- Quels sont les principales catégories phoenicicoles identifiées en se basant sur les paramètres chimiques et calorifiques
- Quelles sont les corrélations existantes entre les différents paramètres physico-chimiques et calorimétriques ?

## **2. Présentation de projet**

Cette étude intitulée « Évaluation de la qualité énergétique d'un biocombustible cas d'un biomasse phoenicicole » sera structurée autour de deux grandes parties :

Première partie : Étude bibliographique

Elle comporte les concepts généraux de la biomasse en général et la biomasse phoenicicole en particulier, la composition structurale et élémentaire de la biomasse. Cette partie comprend trois chapitres :

Chapitre 1 : Considérations générales sur la biomasse.

Ce chapitre comprend des définitions, la classification, les principales transformations et applications de la biomasse.

Chapitre 2 : Composition chimique de la biomasse.

Ce chapitre comprend une présentation de la composition structurale et élémentaire de la biomasse.

Chapitre 3 : Biomasse phoenicicole dans l'écosystème oasien.

Ce chapitre comprend une présentation du palmier dattier avec ses différents constituants, leur composition, les principaux sous produits et leurs différents usages.

Deuxième partie : Partie expérimentale

Cette partie traitera les points suivants :

- Matériels et méthodes d'analyses. Cette partie comprend la présentation de la méthodologie utilisée pour la préparation des échantillons et les analyses effectuées : analyses immédiates (humidité, cendres, carbone fixe, matière volatiles), pouvoir calorifique supérieur et les analyses élémentaires (calculées).
- Calcul d'erreurs et incertitudes
- Résultats et interprétation. Cette partie est réservée à la présentation et à l'interprétation des résultats.
- Conclusion générale qui résumera les différents résultats obtenus ainsi que leurs interprétations.

### 3. Références

1. Bousdira, K., *Environmental approach of the Algerian oasis biomass energy conversion. Mzab area case*, in *18th European Biomass. Conference & Exhibition. From Research to Industry and Markets2010*: Lyon France.
2. Bousdira, K., *Eléments sur la valorisation énergétique de la biomasse oasienne algérienne*, in *INWOP102010*: El Oued Algérie.
3. Bousdira, K., L.h. Nouri, and J. Legrand, *Chemical Characterization of Phoenicicole Biomass Fuel in Algerian Oasis: Deglet Nour and Ghars Cultivars Case*. *Energy & Fuels*, 2014. 28(12): p. 7483-7493.
4. Bousdira, K., *Valorisation énergétique de la biomasse dans l'écosystème oasien - impact environnemental et socio-économique*, in *Laboratoire de Recherche en Technologies Alimentaires LRTA2015*, Université M'Hamed Bouguerra Boumerdès - Algérie.: Université M'Hamed Bouguerra Boumerdès - Algérie. p. 160.
5. Bousdira, K., et al., *Kinetic pyrolysis study and classification of date palm biomass*. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2017. 9(1): p. 013102.
6. MDR, *Statistiques agricoles nationale du Ministère de Développement Rural (MDR)*, 2014, MDR: Algerie.
7. Bousdira, K., et al., *Evaluation of the potential phoenicicole biomass sub-product in the Guerrara oasis* *Revue des Energies Renouvelables* 2012. SIENR'12: p. 75 – 82.
8. Hannachi, S., et al., *Inventaire variétal de la palmeraie algérienne*1998: C.DA.R.S et U.R.Z.A.

**Liste des figures :**

<i>Figure 1.1: Filières de valorisation de la biomasse [6]</i> .....	7
<i>Figure 1.2: Schéma représentatif de la gazéification[7]</i> .....	9
<i>Figure 1.3 : Combustion [9]</i> .....	9
<i>Figure 1.4: Processus thermique de la pyrolyse [10]</i> .....	10

**Liste des tableaux :**

<i>Tableau 1.1: Systeme de classification de la biomasse [5]</i> .....	6
--	---

<b>Chapitre 1 : Considérations générales sur la biomasse</b>	<b>4</b>
<b>1. Introduction</b>	<b>4</b>
<b>2. Présentation de la biomasse</b>	<b>5</b>
<b>3. Classification de la biomasse</b>	<b>6</b>
<b>4. Énergie de biomasse :</b>	<b>6</b>
<b>5. Débouchés économiques actuels de la biomasse :</b>	<b>7</b>
<b>6. Transformations de la biomasse :</b>	<b>7</b>
<b>6.1. Méthodes Biologiques</b>	<b>8</b>
<b>6.2. Méthodes Thermochimiques</b>	<b>8</b>
6.2.1. Gazéification	8
6.2.2. Combustion	9
6.2.3. Pyrolyse	10
<b>7. Valorisation énergétique de la biomasse</b>	<b>11</b>
<b>8. Références</b>	<b>12</b>



## Chapitre 1 : Considérations générales sur la biomasse

### 1. Introduction

La biomasse est par tradition une source d'énergie fondamentale, qui n'a perdu de son importance que récemment avec le développement au XIX siècle de l'utilisation massive du charbon, puis surtout au XX e siècle, celle des hydrocarbures. Elle garde la première place encore aujourd'hui en tant que source d'énergie dans les pays en développement et elle pourrait être une solution (en tout cas partielle) aux problèmes du changement climatique et de la production d'énergie car c'est une énergie renouvelable et qui théoriquement possède un bilan carbone nul puisque le carbone émis n'est autre que le carbone absorbé par la plante durant sa croissance[1, 2].

L'énergie de biomasse (ou bioénergie) est un sujet vaste et complexe, en tenant en compte les caractéristiques des plus importantes. Le potentiel de l'énergie de biomasse est très important si des politiques appropriées sont mis en place. C'est particulièrement le cas des résidus agro forestiers, actuellement sous-exploités. À plus long terme, les forêts et les cultures consacrées à l'énergie auront un rôle beaucoup plus important.

Actuellement, l'énergie de la biomasse continue d'être la principale source d'énergie dans de nombreux pays sous ses formes traditionnelles. La production de bioénergie à partir du bois est l'une des formes les plus anciennes d'énergie et elle a longtemps été considérée comme une source primitive d'énergie dans de nombreux pays industrialisés. Cependant, il connaît actuellement une augmentation dans le monde entier[3].

La biomasse, abréviation de masse biologique, est un terme générique qui fait référence à la quantité de matière vivante produite par les plantes, les animaux, les champignons ou les bactéries pour une zone donnée. On l'utilise régulièrement pour faire référence au combustible énergétique qui s'obtient directement ou indirectement de par ces ressources biologiques[4]. Une définition juridique française plus restrictive est : « fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales issues de la terre et de la mer, de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers ».

Il existe une caractéristique qui différencie la biomasse des autres recours énergétiques, des ressources potentiellement renouvelables. Le charbon, le gaz, le pétrole ainsi que d'autres

combustibles fossiles ne sont pas considérés comme appartenant à la biomasse, bien qu'ils proviennent de matière vivante. Le temps nécessaire pour la formation de ces combustibles (en millions d'années) ne leur permet pas d'être considéré comme renouvelables.

Dans le domaine de l'énergie, et plus particulièrement des bioénergies, la biomasse énergie est la partie de la biomasse utilisée ou utilisable comme source d'énergie ; soit directement par combustion (ex : bois énergie), soit indirectement après méthanisation (biogaz) ou d'autres transformations chimiques (biocarburants, aussi appelés « Agro carburants » ou « agro combustibles »).

Le domaine de la bioénergie est subdivisé en filières (forêt-bois, agricole, déchet, pêche, algue et aquaculture) pour certaines encouragées par diverses collectivités. Il se présente comme répondant à des enjeux et objectifs de développement durable ; substitut aux énergies fossiles la biomasse-énergie contribue en effet à réduire les émissions de gaz à effet de serre, voire à restaurer certains puits de carbone (semi-naturels dans le cas des boisements et haies exploités). Cette énergie intéresse à nouveau les pays riches confrontés au changement climatique et à la perspective d'une crise des ressources en hydrocarbures fossiles ou uranium. La filière se développe rapidement, via des formes industrielles nouvelles (ex : avec les agro carburants et le bois énergie à usage industriel). Des risques de surexploitation de la ressource existent néanmoins.

## **2. Présentation de la biomasse**

La biomasse, végétale ou animale, constitue aujourd'hui **15 %** de la consommation énergétique mondiale. Elle est utilisée plutôt dans les pays en voie de développement pour cuisiner. La fraction d'énergie que la biomasse nous fournit aujourd'hui est donc disproportionnée par rapport à la place qu'elle occupe dans les potentiels énergétiques de la planète. L'utilisation énergétique de la biomasse est aujourd'hui encouragée par des questions d'ordre social, économique et surtout environnemental. En fait, l'accentuation des problèmes causés par les émissions croissantes de gaz à effet de serre concerne de plus en plus la population. L'utilisation de la biomasse n'engendre pas une augmentation de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère parce que celui-ci avait été absorbé par le processus de photosynthèse pendant la croissance de la plante. Le bilan est donc nul. Mais les avantages ne se limitent pas au seul aspect environnemental[2].

La production de biomasse pour l'énergie pourrait donc se développer considérablement à travers l'exploitation des ressources existantes et/ou l'agrandissement des plantations

énergétiques. On a trois sources potentielles de biomasse principales : les résidus, les forêts existantes et les plantations. Deuxièmement on peut considérer la biomasse marine et la biomasse constituée par les boues résultantes des stations d'épuration[2].

### 3. Classification de la biomasse

Dans les contextes énergétiques, le terme biomasse est habituellement utilisé pour désigner les matériaux des plantes, bien qu'il puisse avoir des origines différentes, être de composition différente et avoir des propriétés différentes. Compte tenu de sa diversité, un système de classification est nécessaire. Cela permet de prédire le comportement de la biomasse. En effet, le manque d'une terminologie acceptée et un système de classification universel dans la littérature scientifique, provoque des malentendus et des ambiguïtés. Plusieurs systèmes de classification ont été proposés. L'un des plus simples est celui qui suggère l'utilisation de seulement trois catégories de classification: les déchets, les produits forestiers et les cultures énergétiques. En revanche une autre classification, proposent l'utilisation de quatre catégories: les cultures énergétiques, les déchets agricoles et d'élevage, les déchets forestiers et les déchets municipaux.

Compte tenu des avancées récentes qui ont proposé deux nouveaux systèmes de classification de la biomasse, l'un basé sur l'origine de la biomasse, L'autre basée sur les propriétés de la biomasse (cf. tableau 1.1)[5].

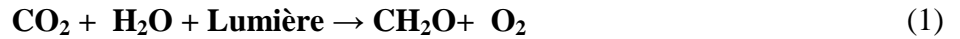
**Tableau 1.1: Systeme de classification de la biomasse [5]**

	Biomasse	Description
<b>Basé sur l'origine</b>	<b>Déchets de base</b>	Les sous-produits des cultures vivrières et des produits forestiers : les déchets céréaliers, déchets de bois.
	<b>Déchets secondaires</b>	Les sous-produits de la transformation de la biomasse pour la fabrication de produits alimentaires ou autres. Exemple : sciure de bois.
	<b>Déchets tertiaires</b>	La biomasse qui a été utilisée pour certaines fonctions mais a atteint la fin de sa vie utile. Exemple : le bois utilisé dans la construction.
	<b>Cultures énergétiques</b>	Exemples : Miscanthus, sorgho et Switch Grass
<b>Basé sur les propriétés</b>	<b>Bois et combustibles ligneux</b>	Bois dur et doux nouvellement récoltés
	<b>Biomasse agricole</b>	Paille, herbe, tiges.
	<b>Biomasse aquatique</b>	Algues
	<b>Déchets animaux et humains</b>	Os, fumier
	<b>Matériau contaminé et biomasse industrielle</b>	Déchets municipaux solides, boues de traitement des eaux usées, combustibles dérivés des ordures.
	<b>Cultures énergétiques</b>	Cultures destinées à la production d'énergie
	<b>Mélanges de biomasse</b>	

### 4. Énergie de biomasse :

De manière générale, les végétaux accumulent dans leurs cellules de l'énergie solaire sous forme de liaisons chimiques carbone-hydrogène. La photosynthèse est le processus responsable de cette accumulation et de la croissance végétale. Ainsi, l'interaction entre les trois éléments

clés de la croissance d'un arbre : énergie solaire, nutriments et eau, se réalise à l'intérieur des cellules vivantes contenant de la chlorophylle. Avec l'intervention de l'énergie solaire, l'arbre absorbe le dioxyde de carbone atmosphérique ( $\text{CO}_2$ ) et l'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ) contenue dans le sol, forme ainsi des glucides (sucres) et fixe le carbone (C) dans ses tissus. À la fin de cette opération, l'arbre rejette l'oxygène ( $\text{O}_2$ ) dans l'atmosphère, comme l'indique l'équation (1)[1]:



## 5. Débouchés économiques actuels de la biomasse :

Actuellement, l'ensemble de la biomasse terrestre sert principalement à nourrir la population mondiale. Même si la part de biomasse servant à la culture vivrière n'est que de 2% de toute la biomasse, elle dépasse les autres usages : 1% est utilisé comme bois de chauffage et 1% dans l'industrie non alimentaire (papier, fibre,...). L'utilisation de la biomasse comme source importante d'énergie dans le futur est en enjeu important en raison de l'épuisement du pétrole et du réchauffement climatique.[2]

## 6. Transformations de la biomasse :

Deux voies de transformations de la biomasse sont les plus utilisées actuellement : les méthodes thermochimiques et biologiques (cf. Figure 1.1) :

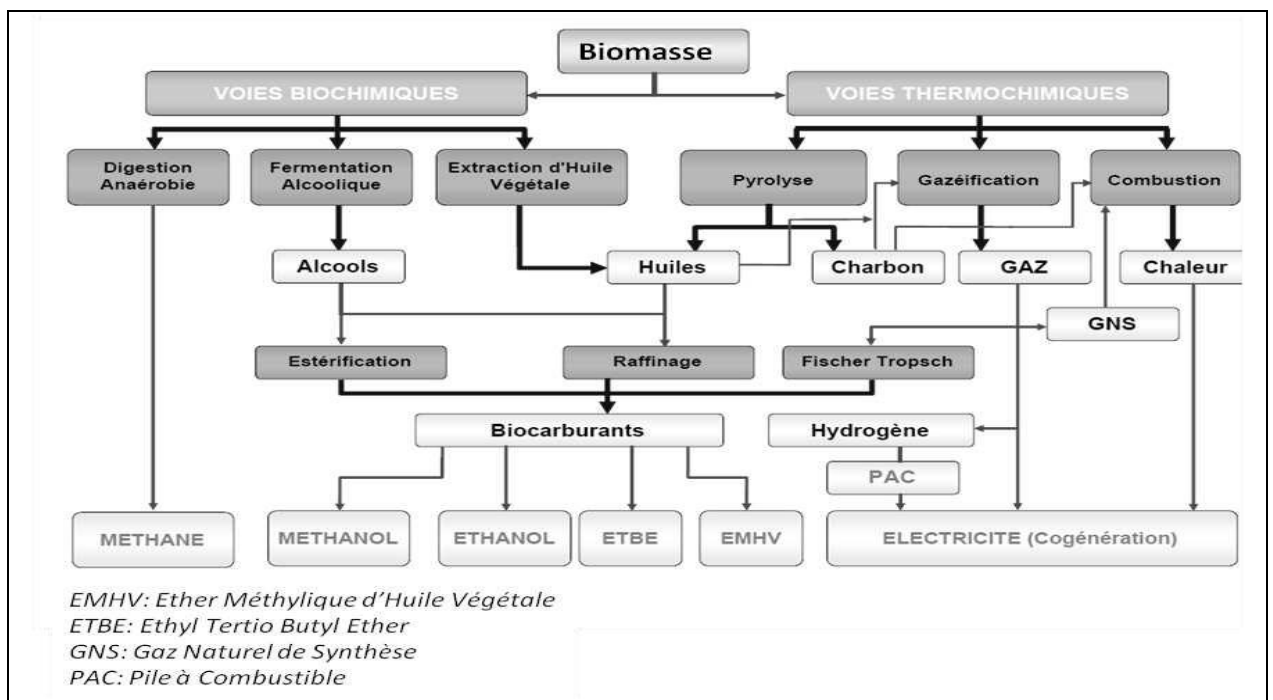


Figure 1.1: Filières de valorisation de la biomasse [6]

## 6.1. Méthodes Biologiques

Il s'agit d'une fermentation alcoolique qui permet de transformer la biomasse en éthanol (biocarburant). Cet alcool est produit par la fermentation des sucres.

Une autre méthode biologique correspond à la fermentation du méthane, qui est une digestion anaérobie de la biomasse par des bactéries. On l'utilise généralement pour le traitement de la biomasse humide dans les fermenteurs ou digesteurs. La cellulose est la substance qui se dégrade en un gaz et, qui est composée d'environ 60% de méthane et de 40% de dioxyde de carbone. Pour obtenir ce processus, il convient d'avoir une température de 30-35 °C. De par leur haut degré d'autonomie, ces digesteurs représentent une option favorable pour les fermes d'élevage intensif.

## 6.2. Méthodes Thermochimiques

Ces méthodes sont basées sur l'utilisation de la chaleur comme catalyseur de biomasse. Elles sont très utilisées pour la biomasse sèche, en particulier pour la paille et le bois.

### 6.2.1. Gazéification

Le processus de gazéification (cf. Figure 1.2) consiste à obtenir un gaz de synthèse (en général du dihydrogène ou du monoxyde de carbone, ainsi que des hydrocarbures gazeux en petite quantité) en portant la biomasse à une température assez élevée (de l'ordre de 800 –900 °C). A cette température, la biomasse réagit avec un réactif gazeux mis en présence, tel que l'air, la vapeur d'eau ou l'oxygène. A la différence de la combustion, l'oxydation n'est que partielle car la quantité d'oxygène en présence est limitée. Un des problèmes de ce type de procédé est qu'il produit également du méthane et des goudrons.

Ce procédé a de nombreux avantages en accord avec la biomasse d'origine : Le gaz produit est plus polyvalent et peut être utilisé de la même façon que le gaz naturel.

La biomasse peut être brûlée afin d'obtenir de la chaleur et de la vapeur afin d'alimenter des moteurs à combustion interne et des turbines à gaz pour produire de l'électricité.

La gazéification de la biomasse produit un carburant relativement exempt d'impuretés et, causes moins de problèmes de contamination lors de sa création.

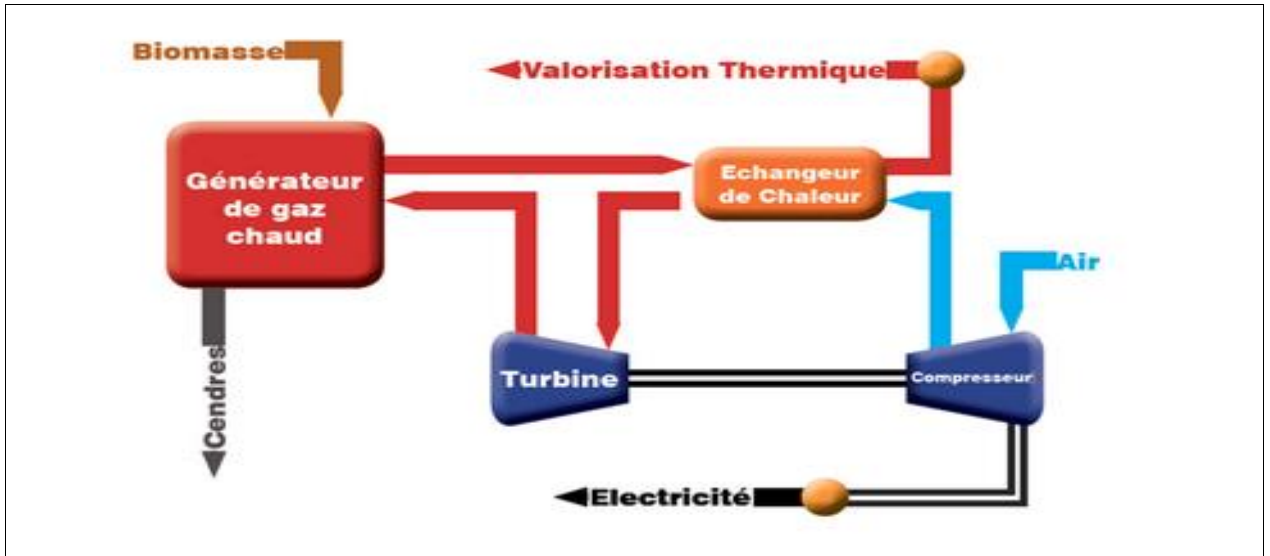
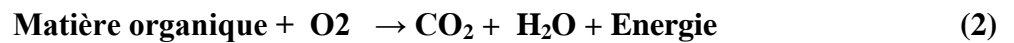


Figure 1.2: Schéma représentatif de la gazéification[7]

### 6.2.2. Combustion

Utilisée directement (bois à titre d'exemple) ou après pyrolyse, la biomasse peut être simplement utilisée comme combustible, c'est-à-dire « brûlée » afin de produire de la chaleur et donc de l'énergie[2]. Ce procédé est très utilisé depuis toujours avec le bois notamment ; Il s'agit de l'oxydation de la biomasse par l'oxygène dans l'air, de cette réaction se libère de l'eau et du dioxyde de carbone, qui peut être utilisé pour le chauffage domestique ainsi que la production de chaleur industrielle comme le montre l'équation (2)[1].



Notons qu'il existe une combustion dite « directionnelle » où la biomasse peut être brûlée directement dans des usines de traitement des déchets sans aucun traitement chimique pour produire de la vapeur afin de produire l'électricité[8].(cf. Figure 1.3)

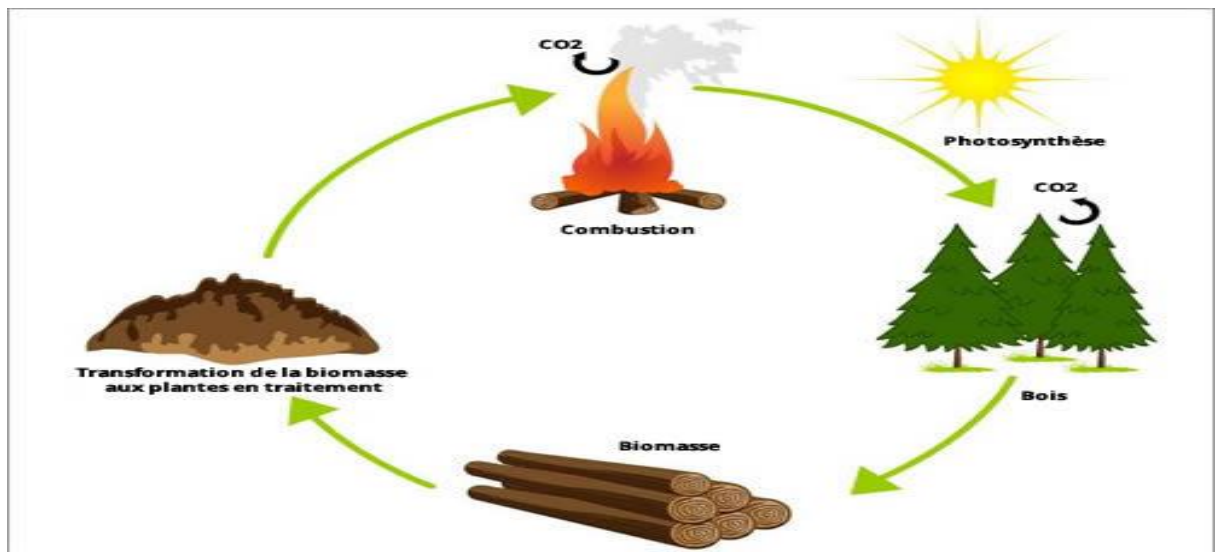


Figure 1.3 : Combustion [9]

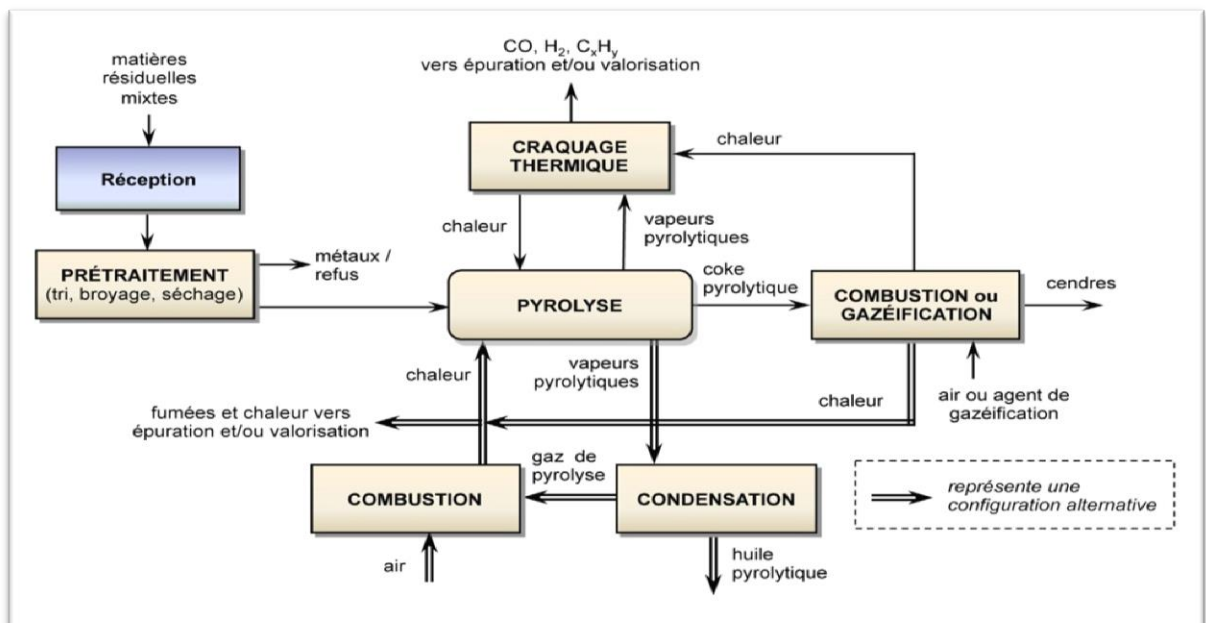
### 6.2.3. Pyrolyse

La pyrolyse (ou thermolyse) est une dissociation thermique de la matière organique et de la matière minérale, en l'absence d'oxygène (moins de 2 %), sous l'action de la chaleur (400 à 800 C). Il s'agit donc d'un traitement thermique sans combustion et endothermique.

Selon les conditions de la réaction (température, pression partielle en oxygène, pression totale), la fraction organique se décompose en gaz, huiles et résidus solides carbonés. Les faibles températures favorisent la production d'huile par rapport au gaz.

Ces sous-produits seront récupérés en sortie du procédé, dans le but d'être valorisés. Les sous-produits de la pyrolyse sont le gaz de synthèse, l'huile et le résidu carboné.

L'intérêt de la pyrolyse serait donc de permettre un prétraitement à basse température de la biomasse pour obtenir un produit torréfié, densifié en énergie, et qui peut être transporté et stocké facilement. Ce produit pourrait ensuite être utilisé dans un procédé de gazéification (cf. Figure 1.4)



**Figure 1.4: Processus thermique de la pyrolyse [10]**

La pyrolyse est donc une réaction chimique relativement lente se produisant à basse température pour convertir la biomasse en un combustible plus utile tel qu'un mélange gazeux riche en hydrocarbures et un résidu solide riche en carbone. Les principaux produits de la pyrolyse de la biomasse dépendent de la température, de la vitesse de chauffage, de la taille des particules et du catalyseur utilisé. La composition typique des gaz de la pyrolyse de la biomasse ligneuse comprend les principaux produits CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et H<sub>2</sub> ainsi que d'autres composés

organiques. Habituellement, la pyrolyse rapide produit plus de gaz que de solides. La principale réaction de pyrolyse est donnée par la réaction (3)[8]:



## 7. Valorisation énergétique de la biomasse

Face aux problèmes liés aux émissions de gaz à effet de serre et à la prochaine pénurie d'hydrocarbures, les scientifiques recherchent des nouvelles sources d'énergie pour faire rouler nos voitures et autres véhicules. Un nouveau secteur voit donc le jour, et offre certainement des possibilités assez intéressantes pour le futur : les biocarburants. L'idée est d'utiliser le potentiel agricole de nos pays pour produire des substituts ou des compléments à nos carburants actuels. Sous l'incitation et les directives européennes, les pays européens commencent à développer un vrai secteur agro-industriel pour la production de biocarburants[2].

La biomasse, qui constitue la plus abondante et la plus polyvalente des sources primaires d'énergie renouvelable, assure actuellement environ 12 % des besoins en énergie primaire de la planète et 4 % de ceux de l'Union Européenne. Selon les hypothèses et les scénarios pris en compte, elle pourrait, à l'horizon 2030-2050, assurer de 15 à 35 % des besoins énergétiques mondiaux.

La production d'électricité et de carburants à partir de biomasse est donc le plus souvent non compétitive avec les énergies fossiles (hors subventions) dans le contexte actuel, mais cet handicap pourrait se réduire et permettre de valoriser en énergie une part croissante du potentiel de la biomasse. La biomasse est susceptible de fournir de l'énergie sous diverses formes : chaleur, électricité, combustibles et/ou carburants gazeux, liquides et solides[11].

La demande future de biomasse doit être satisfaite de façon durable. Par exemple, si le bois combustible est extrait de zones écologiquement sensibles, il peut entraîner une dégradation des bassins versants et des bassins hydrographiques et une perte de biodiversité, d'habitat, etc. Il est donc nécessaire de produire de la biomasse de façon durable comme les plantations énergétiques sur les zones déboisées, terrains et terrains excédentaires en tenant compte des besoins futurs en terres pour la production alimentaire

L'avenir du chauffage de la biomasse dépend du développement des marchés des combustibles fossiles et des décisions politiques concernant le marché du chauffage. AEBIOM [**Association Européenne de Biomasse**] estime que le principe d'efficacité devrait guider la future stratégie de la biomasse. L'objectif principal devrait être de maximiser la contribution de la biomasse à la



consommation totale d'énergie à faible coût pour le consommateur. Pour ce faire, il faut au moins trois choses:

- 1-Minimiser les pertes de conversion;
- 2-Maintenir les rendements énergétiques finaux par hectare le plus élevé possible;
- 3-Faibles coûts pour améliorer la compétitivité de l'économie européenne[8].

## 8. Références

1. Bafouloulou, Y., Caractérisation énergétique de la biomasse phoenicicole 2013, Université de Skikda
2. Canonico, C., et al., La Biomasse énergie : Une solution au problème du changement climatique 2006, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
3. Seifert, T., et al., Biomass from Wood in the Tropics, in Bioenergy from Wood. 2014, Springer. p. 1-10.
4. <http://www.amt-solar.com/index.php/fr/biomasse/quest-ce-que-la-biomasse>.
5. Vargas-Moreno, J.M., et al., A review of the mathematical models for predicting the heating value of biomass materials. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012. 16(5): p. 3065-3083.
6. Rehmet, C., Theoretical and experimental studies of arcs in a three phase plasma torch coupled to a gasification process of organic matter. 2013, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
7. <http://www.cogenerationbiomasserhonealpes.org/definition-gazeification>.
8. Saidur, R., et al., A review on biomass as a fuel for boilers. Renewable and sustainable energy reviews, 2011. 15(5): p. 2262-2289.
9. <http://frapasa.com/fr/biomasse/>.
10. <http://www.mamunicipaliteefficace.ca/188-efficacite-energetique-ges-pyrolyse.html>.
11. Claudet, G., La valorisation énergétique de la biomasse.

**Liste des figures :**

<i>Figure 2.1 : Les trois constituants de la biomasse .....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 2.2 : La structure de la cellulose[2] .....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 2.3: La structure de la hemicellulose.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 2.4 :La structure de la lignine.....</i>	<i>16</i>

**Liste des tableaux:**

<i>Tableau 2.1: Comparaison de la composition des différents types de biomasse .....</i>	<i>17</i>
<i>Tableau 2.2: Composition chimique des principales catégories de la biomasse.....</i>	<i>21</i>
<i>Tableau 2. 3: Composition minérale des principales catégories de la biomasse.....</i>	<i>22</i>

<b>Chapitre 2 : Composition de la biomasse</b>	<b>13</b>
<b>1. Introduction</b>	<b>13</b>
<b>2. Composition structurelle</b>	<b>13</b>
2.1 Cellulose	14
2.2 Hémicellulose	15
2.3 Lignine	16
<b>3. Composition élémentaire</b>	<b>17</b>
3.1 Carbone, hydrogène et oxygène	17
3.2 Azote :	18
3.3 Soufre :	18
3.4 Chlore :	18
3.5 Cendres élémentaires :	18
<b>4. Composition immédiat</b>	<b>18</b>
4.1 Humidité (M) :	19
4.2 Matières volatiles (VM) :	19
4.3 Carbone fixe ou non combiné (FC) :	19
4.4 Cendres (A)	20
<b>5. Pouvoir calorifique</b>	<b>23</b>
5.1. Pouvoir calorifique inférieur (HHV)	23
5.2. Pouvoir calorifique supérieur (LHV)	23
<b>6. Références</b>	<b>24</b>

## Chapitre 2 : Composition de la biomasse

### 1. Introduction

L'identification et la caractérisation des combustibles solides est la première démarche à réaliser pour la détermination des propriétés (physiques, chimiques, pétrographiques, minéralogie), des applications potentielles et des problèmes environnementaux liés à ces carburants. La bibliographie révèle une gamme d'analyses qui comprend: (1) analyse structurale, (2) analyse approximative, (3) analyse élémentaire, (4) l'analyse des cendres, (5) analyse pétrographique, (6) analyse minéralogique, (7) la séparation procédures et (8), d'autres analyses de combustible à basse température des cendres (LTA) ou des cendres à haute température (HTA) pour une caractérisation spécifique du combustible solide. Des analyses identiques ou similaires sont également applicables pour caractérisation de la biomasse, malgré quelques particularités et limites[1].

### 2. Composition structurale

La biomasse contient des quantités variables de cellulose, d'hémicellulose et de lignine ainsi que de petites quantités de lipides, de protéines, de sucres simples et d'amidons. La biomasse contient également des constituants inorganiques et une fraction d'eau. Parmi ces composés, la cellulose, l'hémicellulose et la lignine sont les trois principaux constituants (cf. figure 2.1). La combinaison de la cellulose, hémicelluloses et lignines sont appelés « lignocellulose », qui comprend environ la moitié de la matière végétale produite par la photosynthèse et représente la ressource organique renouvelable la plus abondante sur la terre. La cellulose, l'hémicellulose et la lignine sont fortement engrené en lignocellulose et sont liés chimiquement par des forces non covalentes ou par des réticulations covalentes. La cellulose est la principale composante des matériaux lignocellulosiques, suivie de l'hémicellulose et de lignine. Nous Considérons que la cellulose et l'hémicellulose sont des macromolécules construits à partir de différents sucres. La lignine est un polymère aromatique synthétisé à partir des précurseurs phényl-propaniol.

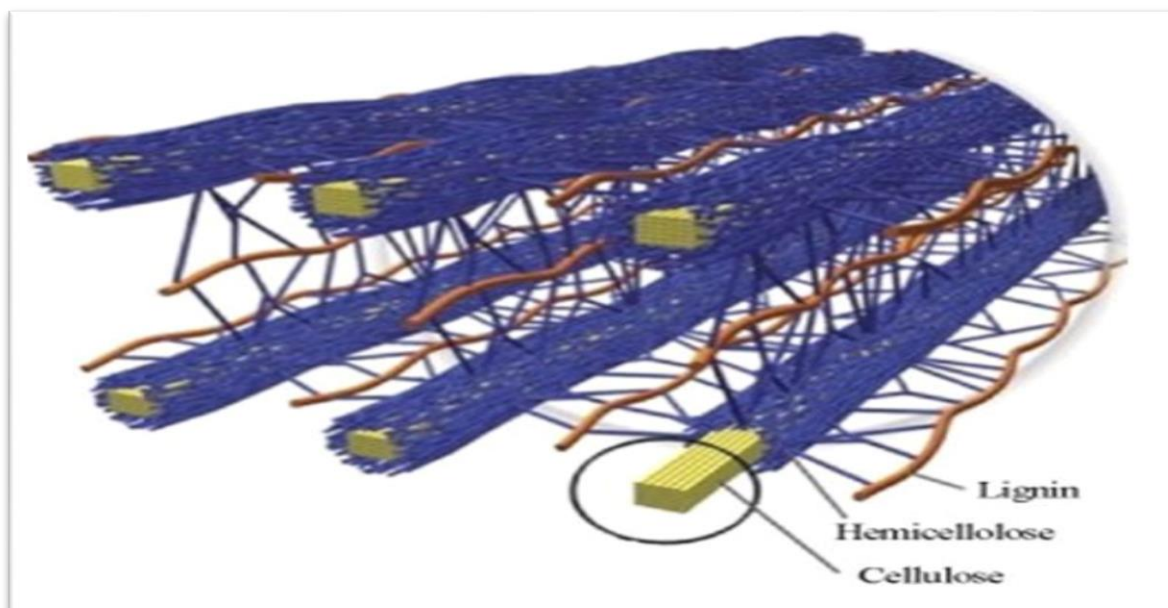


Figure 2.1 : Les trois constituants de la biomasse[2]

## 2.1 Cellulose

C'est le constituant majoritaire, il représente entre 40 et 50% de la masse totale. La cellulose, constituant principal de toutes les matières végétales, rentre dans la composition de la paroi des cellules végétales. La cellulose est un matériau de base pour un grand nombre d'industries qui a suscité un grand intérêt dans la recherche. Elle joue un rôle dans la structure des parois cellulaires de protection des végétaux, en particulier dans les tiges et les troncs ainsi que dans toutes les parties ligneuses des tissus végétaux. La cellulose confère au bois une résistance à la traction longitudinale. C'est un homopolymère dont le motif monomérique est le glucose dans la configuration D (cf. figure 2.2). Les molécules de glucose sont liées de façon linéaire par des liaisons osidiques  $\beta$ -1,4, le motif dimérique qui constitue la cellulose étant le cellobiose. Cette liaison osidique confère aux chaînes de glucose une conformation tridimensionnelle spécifique stabilisée par des liaisons hydrogène intra- et intermoléculaires. Les chaînes de glucose s'associent entre elles pour former des microfibrilles. Le degré de polymérisation (DP) des chaînes de glucose de la cellulose se détermine par différentes techniques analytiques dont la mesure de la viscosité intrinsèque, le dosage des chaînes de cellulose et la chromatographie d'exclusion stérique. Les valeurs de degré de polymérisation (DP) et de distribution en masses moléculaires dépendent du mode de détermination mis en œuvre. Le DP de la cellulose native n'est pas connu du fait que son extraction doit être préalablement effectuée. Le DP des celluloses industrielles peuvent varier de quelques centaines à plusieurs milliers d'unités monomériques selon son origine.

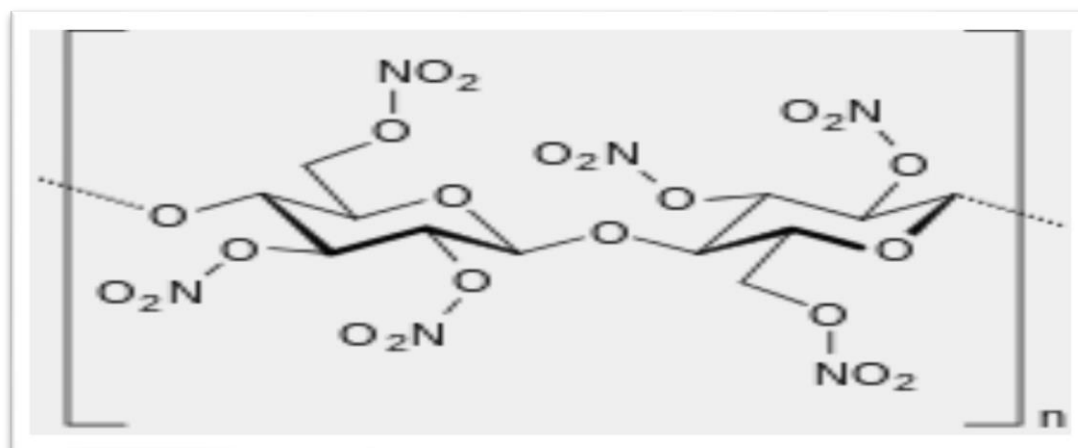


Figure 2.2 : La structure de la cellulose[2]

## 2.2Hémicellulose

Contrairement à la cellulose, l'hémicellulose est une famille de composés hétéro polysaccharidiques variés. Les unités monomériques de ces macromolécules glucidiques sont des pentoses (principalement xylose et arabinose), des hexoses (principalement glucose, mannose, galactose, rhamnose et fucose) et des acides carboxyliques (principalement les acides mannuronique et galacturonique) (cf. figure 2.3). Les unités monomériques sont assemblées en chaînes ramifiées et constituent des macromolécules de nature amorphe qui diffèrent par les associations diverses d'oses et d'acides glucidiques, de degré de polymérisation variant de quelques dizaines à plusieurs centaines d'unités monomériques. Le rôle structural de l'hémicellulose est le pontage des micro fibrilles de cellulose avec la matrice de lignine, les pectines et d'autres composés des parois et des membranes cellulaires. Ainsi, il existe des liaisons chimiques plus ou moins fortes entre les différentes fractions constitutives des parois végétales lignocellulosiques, de nombreuses liaisons esters et éthers ayant été caractérisées entre l'holocellulose et la lignine.[3]

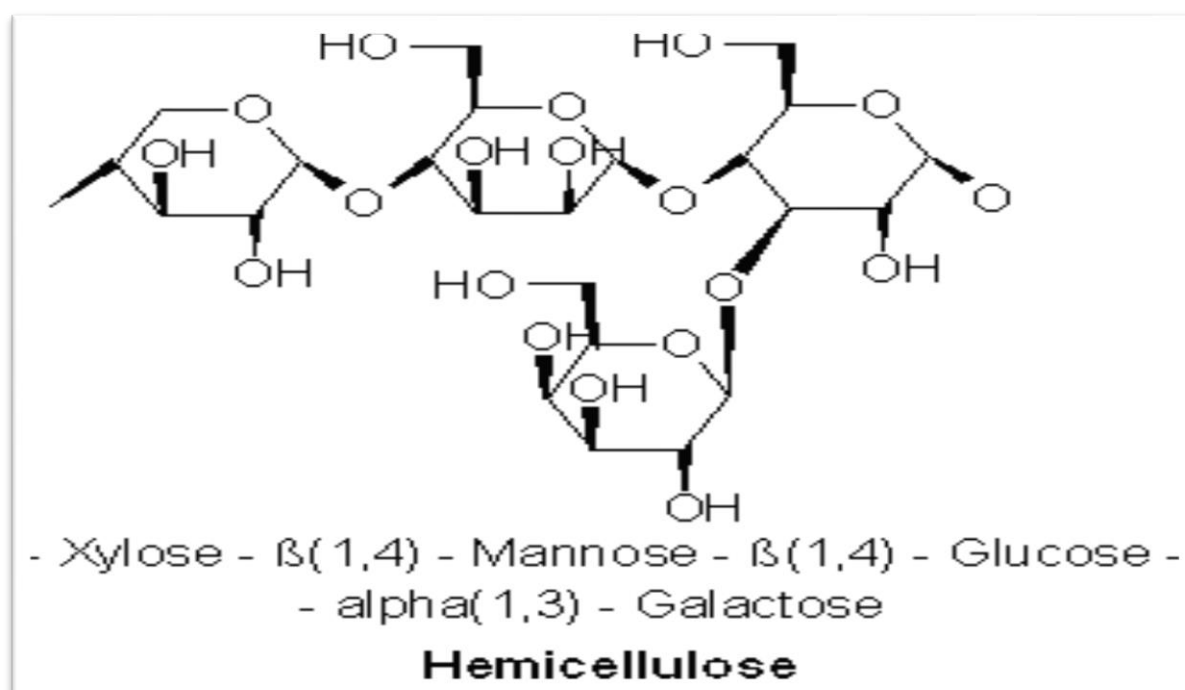


Figure2.3: La structure de la hemicellulose[2]

### 2.3 Lignine

C'est une molécule qui apporte rigidité, imperméabilité à l'eau ainsi qu'une résistance à la décomposition. La lignine représente 20 à 30 % de la masse totale du bois, elle est principalement localisée entre les cellules (cf. figure 2.4)

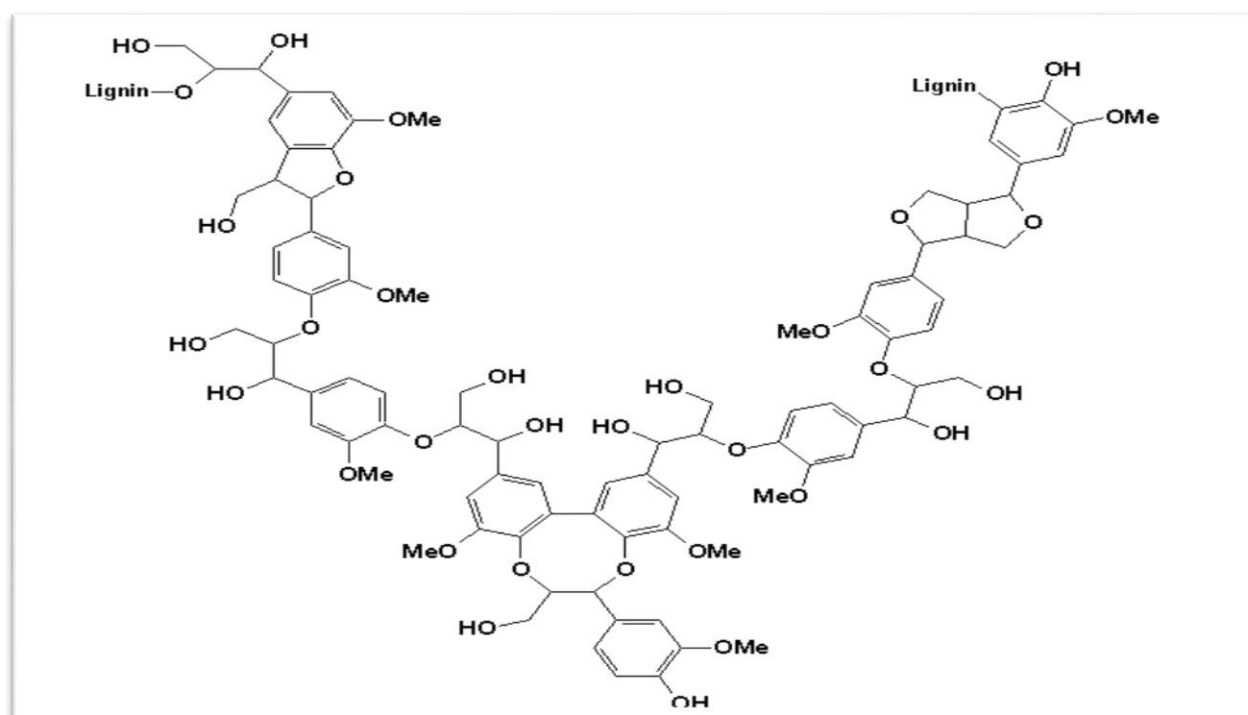


Figure 2.4 :La structure de la lignine[2]

### 3. Composition élémentaire

La composition élémentaire d'un combustible de biomasse est l'une de ses caractéristiques les plus importantes. Elle est généralement complexe, avec six éléments majeurs dans la phase organique (C, H, N, S, Cl et O) et dix dans la phase inorganique (Si, Al, Ti, Fe, Ca, Mg, Na, S et P). Ces dernières sont importantes dans la caractérisation des cendres. Des traces de métaux lourds sont également généralement présentes. Les pourcentages d'azote (N), de soufre (S) et de chlore (Cl) donnent une idée de l'impact de l'utilisation d'un combustible de biomasse alors que les concentrations du carbone (C), de l'hydrogène (H) et d'oxygène (O) permettent de déterminer la composition des huiles végétales et le rapport théorique de la combustion dans les systèmes de thermoconversion[4].

#### 3.1 Carbone, hydrogène et oxygène

Les principaux composants des biocarburants solides sont : le carbone (C), l'hydrogène (H) et l'oxygène (O). Ces éléments sont oxydés pendant la combustion par une réaction exothermique, entraînant la formation du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et du monoxyde de l'hydrogène (HO). Le carbone est l'élément de base de la chimie organique qui est utilisé par tous les organismes vivants connus. Sa concentration est positivement corrélée au pouvoir calorifique (HHV), ce qui explique la valeur élevée de ce dernier pour le bois en comparaison avec la biomasse herbacée. Il faut noter que l'hydrogène joue un rôle important dans tous les systèmes de combustion. Plus le rapport H + C / O du combustible est élevé, plus le HHV est grand. La détermination de C et H est habituellement effectuée en utilisant les méthodes analytiques alors que la teneur en O est habituellement établie comme la différence entre la somme des Pourcentages de C, H, N, S et celle des cendres. Certains auteurs négligent la teneur généralement en Cl en comparaison avec celle du C, H, N et S [4].

**Tableau 2.1: Comparaison de la composition des différents types de biomasse**

Composition en poids (%)	C	H	O
<b>Bois</b>	<b>52.1</b>	<b>6.2</b>	<b>41.2</b>
<b>Résidus agricoles</b>	<b>49.9</b>	<b>6.2</b>	<b>42.6</b>
<b>Paille de riz</b>	<b>48.9</b>	<b>6.0</b>	<b>43.9</b>
<b>Paille</b>	<b>48.2</b>	<b>6.5</b>	<b>45.1</b>
<b>Tige de coton</b>	<b>49.5</b>	<b>5.8</b>	<b>43.8</b>
<b>Dé à coudre de soja</b>	<b>45.4</b>	<b>6.7</b>	<b>46.9</b>
<b>Phoenicicole sous-produits</b>	<b>45.5</b>	<b>5.6</b>	<b>41.7</b>



### **3.2 Azote :**

L'analyse de la concentration de de l'azote (N) est particulièrement importante en terme de protection de l'environnement. L'un des principaux impacts environnementaux de la combustion des biocarburants est la production de NOx [4].

### **3.3 Soufre :**

Pendant la combustion, le soufre (S) dans les combustibles de la biomasse forme du SO<sub>2</sub> gazeux, parfois du SO<sub>3</sub>, et des alcalis. Cependant, la biomasse est généralement pauvre en S[4].

### **3.4 Chlore :**

Le chlore dans la biomasse exerce ses effets par ses sels et l'acide chlorhydrique qui est produit pendant la combustion. Ces composés ont un impact négatif sur les parois des fours métalliques. Ils forment aussi des émissions acides et des particules[4].

### **3.5 Cendres élémentaires :**

Les éléments majeurs (Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P, Si) et les éléments mineurs (As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Tl, Zn, avec Cl et S), peuvent former des cendres. Il est essentiel de connaître la teneur en cendres d'un combustible pour choisir la méthode de combustion appropriée. Certains éléments sont concentrés dans des produits spécifiques de la biomasse, tels que le silicium (Si) dans les déchets d'élagage des olives. Les combustibles à faible teneur en cendres sont préférables, comme le bois, certains types de paille, les résidus de fruits et la biomasse horticole[4].

## **4. Composition immédiat**

L'analyse immédiate permet d'évaluer le pourcentage de matière volatile (VM), le carbone fixe (FC) et la teneur en cendres. Cette analyse est très importante pour étudier le phénomène de combustion de la biomasse. Par exemple, une teneur en cendres dans la biomasse peut provoquer des problèmes d'inflammation au niveau de sa combustion. Un faible point de fusion des cendres peut provoquer des problèmes d'encrassement et de scorification. La volatilité élevée de la biomasse offre de nombreux avantages pour une matière première utilisée pour la combustion. En outre, une valeur élevée en carbone fixe et en matières volatiles augmentent la valeur de chauffage de tout combustible issu de la biomasse.

La composition chimique et minérale des principales catégories de la biomasse sont résumées dans les tableaux (2.2 et 2.3)

#### **4.1 Humidité (M) :**

L'humidité (M) ajoute du poids non précieux pour le carburant, ce qui diminue sa densité effective en vrac, les coûts de transport et de stockage. Comme l'évaporation est un processus endothermique, une humidité élevée diminue la teneur en énergie et les températures utiles de combustion du carburant, par conséquent, elle diminue la qualité et l'efficacité de la combustion. Des teneurs élevées en humidité dans les carburants nécessitent un temps de séchage plus important, ce qui implique le besoin en chambres plus grandes, affectant toute la conception du système de combustion. Outre ces faits, l'humidité augmente la respiration microbienne, ce qui diminue la qualité physique des carburants, en particulier sa durabilité. En résumé, on peut dire que les niveaux d'humidité élevés exigent un équipement plus grand, ce qui rend difficile leur d'entretien, diminue l'efficacité de combustion et augmente le coût du processus de valorisation.

Il existe deux formes d'humidité :

- L'humidité intrinsèque : c'est la teneur en humidité du matériau sans tenir compte de l'influence des conditions climatiques.
- L'humidité extrinsèque : les conditions climatiques régnantes pendant la moisson influencent la teneur en humidité de la biomasse.

#### **4.2 Matières volatiles (VM) :**

Les matières volatiles (MV) sont considérées comme étant la fraction de carburant (à l'exception humidité) libéré lorsqu'il est chauffé à haute température en absence de l'air. Il peut provenir du rendement organique ou inorganique de la biomasse et est formée par une partie combustible (gazeux C, CO ou H<sub>2</sub>) et une fraction non combustible (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> et SO). Les matières volatiles influence la décomposition thermique ; des teneurs élevées rendent l'allumage plus facile à basse températures, ce qui implique une forte réactivité et un important processus de combustion [1].

#### **4.3 Carbone fixe ou non combiné (FC) :**

Le carbone fixe (FC) est la fraction restante de la biomasse après la décomposition complète (libération) des matières volatiles, à l'exclusion des cendres et de l'humidité, qui brûle en formant un charbon (ou char). Le ratio VM/FC augmente le degré de réactivité de la biomasse. Une teneur élevée de ce ratio provoquerait la baisse de température d'allumage et baisserait la phase de résidence jusqu'à l'achèvement de la combustion[1].

#### 4.4 Cendres (A)

Les cendres (A) représentent le déchet inorganique qui reste après la combustion du carbone fixe. Ce paramètre influence le transport, la manutention et les coûts du processus de valorisation énergétique. Il a un effet sur l'émission de poussières, la manipulation de cendres et sur le choix de la technologie de combustion. Ceci s'explique par la diminution du pouvoir calorifique (HHV) et celle du rendement de la combustion. En effet, des teneurs élevées en cendres peuvent générer des dépôts de scories, ce qui crée une résistance thermique plus élevée au transfert de chaleur et nécessite un équipement plus cher et la maintenance. En plus de cela, en fonction de sa composition, l'érosion peut se produire dans les chambres thermiques. L'élimination des déchets et leur réutilisation peut également être affectée par la composition minérale de la biomasse, dans certains cas, ces déchets peuvent être utilisés comme engrais ou comme matériaux de construction [1].

Il existe deux types de cendres :

- **Cendres foyers** (mâchefer) forment un dépôt résiduel de la combustion si leur point de fusion est bas. Ces cendres deviennent dures comme de la roche.
- **Cendres volantes** : ce sont des cendres volatiles. En refroidissant les surfaces de transfert de chaleur, elles forment des agglomérats ou entraînent des phénomènes de corrosion[3]

## Chapitre 2

### Composition de la biomasse

Tableau 2.2: Composition chimique des principales catégories de la biomasse[5]

		M(%)	VM%	FC%	A%	Somme	C%	O%	H%	N%	S%	Somme
Bois et biomasse ligneuse (WWB)	Moy	19,00	78,00	18,50	3,50		52,10	41,20	6,20	0,40	0,08	
	Min	4,70	69,50	12,30	0,10	100	48,70	32,00	5,40	0,10	0,01	99,98
	Max	63,00	86,30	26,30	16,50		57,00	45,30	10,20	0,70	0,42	
La biomasse herbacée et agricole (HAB)	Moy	12,00	75,20	19,10	5,70		49,90	42,60	6,20	1,20	0,15	
	Min	4,40	59,30	12,40	0,90	100	42,20	34,20	3,20	0,10	0,01	100,05
	Max	48,00	85,50	37,90	20,10		58,40	49,00	9,20	3,40	0,60	
Graminées (HAG)	Moy	13,00	79,00	16,20	4,80		49,20	43,70	6,10	0,90	0,13	
	Min	4,50	73,40	13,70	0,90	100	46,10	42,50	5,10	0,30	0,04	100,03
	Max	42,00	81,60	18,10	9,80		52,00	44,50	6,50	2,60	0,27	
Pailles (HAS)	Moy	10,00	74,30	17,10	8,60		49,40	43,20	6,10	1,20	0,15	
	Min	7,40	64,30	13,60	4,70	100	48,50	40,10	5,60	0,50	0,08	100,05
	Max	17,00	80,50	19,50	20,10		50,60	44,60	6,40	2,80	0,28	
Autres résidus (HAR)	Moy	12,00	74,00	21,00	5,00		50,20	41,90	6,30	1,40	0,16	
	Min	4,40	59,30	12,40	1,40	100	42,20	34,20	3,20	0,10	0,01	99,96
	Max	48,00	85,50	37,90	18		58,40	49,00	9,20	3,40	0,60	
Biomasse animale (AB)	Moy	5,90	55,50	13,60	30,90	100	58,90	23,10	7,40	9,20	1,45	100,05
Mélange de biomasse	Moy	17,00	75,10	17,20	7,70		52,90	39,60	6,20	1,00	0,28	
	Min	7,30	69,40	15,90	3,30	100	50,90	33,10	5,90	0,40	0,04	99,98
	Max	30,00	78,50	18,20	12,50		56,70	42,50	6,60	2,70	0,85	
La biomasse contaminée (CB)	Moy	12,00	72,00	9,40	18,60		53,60	37,00	7,30	1,70	0,46	
	Min	2,50	48,00	0,50	3,60	100	45,40	16,40	6,00	0,20	0,01	100,06
	Max	38,00	84,20	17,30	46,30		70,90	46,10	11,20	6,10	2,33	
Toutes les variétés de biomasse	Moy	14,00	75,40	17,80	6,80		51,30	41,00	6,30	1,20	0,19	
	Min	2,50	47,80	0,50	0,10	100	42,20	16,40	3,20	0,10	0,01	99,99
	Max	63,00	86,30	37,90	46,30		70,90	49,00	11,20	12,00	2,33	

## Chapitre 2

### Composition de la biomasse

Tableau 2. 3: Composition minérale des principales catégories de la biomasse[5]

Variété de biomasse		SiO <sub>2</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Somme
Le bois et la biomasse ligneuse (WWB)	Moy	22,22	43,00	10,80	3,48	5,09	6,07	3,44	2,78	2,85	0,29	100
	Min	1,86	5,79	2,19	0,66	0,12	1,10	0,37	0,36	0,22	0,06	
	Max	68,18	83,50	32,00	13,01	15,10	14,57	9,54	11,66	29,82	1,20	
herbacée et la biomasse agricole (HAB)	Moy	33,39	14,90	26,70	6,48	3,66	5,62	3,26	3,61	2,29	0,18	100
	Min	2,01	0,97	2,290	0,54	0,10	0,19	0,22	0,01	0,09	0,01	
	Max	94,48	44,30	63,90	31,06	14,60	16,21	36,27	14,74	26,20	2,02	
Graminées (HAG)	Moy	46,18	11,20	24,60	6,62	1,39	4,02	0,98	3,66	1,25	0,08	100
	Min	8,73	2,98	2,93	3,14	0,67	1,42	0,58	0,83	0,09	0,01	
	Max	84,92	44,30	53,40	20,33	2,59	8,64	1,73	9,89	6,20	0,28	
Pailles (HAS)	Moy	43,94	14,1	24,5	4,13	2,71	4,66	1,42	3,01	1,35	0,16	100
	Min	7,87	2,46	12,6	0,98	0,10	1,67	0,41	1,18	0,16	0,02	
	Max	77,20	30,70	38,1	10,38	5,57	14,10	2,82	4,93	3,52	0,33	
D'autres résidus (HAR)	Moy	24,47	16,6	28,3	7,27	4,90	6,62	4,84	3,80	3,05	0,22	100
	Min	2,01	0,97	2,29	0,54	0,11	0,19	0,22	0,01	0,12	0,01	
	Max	94,48	44,1	63,9	31,06	14,6	16,21	36,27	14,74	26,2	2,02	
biomasse animale (AB)	Moy	2,90	49,00	7,67	28,17	1,69	2,75	0,35	3,91	3,50	0,02	100
Mélange de biomasse	Moy	44,19	17,5	6,00	5,72	10,80	3,52	6,34	2,66	2,53	0,74	100
	Min	34,75	11,5	3,11	1,08	9,77	2,31	4,19	1,88	1,25	0,52	
	Max	57,83	25,70	7,76	18,07	11,40	4,77	10,44	4,62	3,18	0,95	
biomasse contaminés (CB)	Moy	35,73	18,30	3,45	3,64	15,40	3,60	9,78	3,45	1,90	4,74	100
	Min	3,39	7,63	0,16	0,20	3,08	1,57	0,82	0,99	0,54	0,32	
	Max	60,10	26,80	9,70	15,88	53,50	6,45	22,18	10,55	4,06	27,58	
Toutes les variétés de la biomasse	Moy	29,76	25,30	17,90	5,71	5,51	5,42	4,00	3,28	2,48	0,66	100
	Min	0,02	0,97	0,16	0,20	0,10	0,19	0,22	0,01	0,09	0,01	
	Max	94,48	83,5	63,9	40,94	53,5	16,21	36,27	14,74	29,82	27,58	
Biomasse naturelle	Moy	29,14	26,00	19,40	5,92	4,49	5,60	3,41	3,27	2,54	0,24	100
	Min	0,02	0,97	2,19	0,54	0,10	0,19	0,22	0,01	0,09	0,01	
	Max	94,48	83,46	63,90	40,94	15,12	16,21	36,27	14,74	29,82	-	
Biomasse aquatique	Moy	1,65	12,39	15,35	9,76	0,85	12,50	1,87	25,74	19,88	2,02	99,99
Combustibles fossiles solides Tourbe	Moy	37,53	9,97	1,12	2,75	20,10	2,14	13,83	12,11	0,10	0,31	100
	Moy	54,06	6,57	1,60	0,50	23,20	1,83	6,85	3,54	0,82	1,05	
	Charbon	Min	32,04	0,43	0,29	0,10	11,30	0,31	0,79	0,27	0,09	
	Max	68,35	27,80	4,15	1,70	35,20	3,98	16,44	14,42	2,90	1,61	
Lignite	Moy	44,87	13,10	1,48	0,20	17,10	2,50	10,8	8,64	0,48	0,81	100
Le charbon sous-bitumineux	Moy	54,74	7,05	1,67	0,08	22,9	2,14	5,30	4,07	1,09	1,00	100
Le charbon bitumineux	Moy	56,14	4,90	1,61	0,22	24,8	1,55	6,68	2,16	0,77	1,15	100

## **5. Pouvoir calorifique**

Le pouvoir calorifique d'un combustible représente la quantité de chaleur libérée par la combustion complète de ce combustible, le combustible et le comburant (en général l'air) étant pris à une température et une pression de référence, et les produits de la combustion ramenés à la même température. La valeur du pouvoir calorifique est en général rapportée aux conditions normales, à savoir à 273 K (soit 0°C) et sous la pression atmosphérique, c'est-à-dire 1 atmosphère (soit 101325 Pa = 1,013 bar).

Pour un combustible solide, la chaleur dégagée par la réaction de combustion est exprimée en kilojoules par kg (kJ/kg) de combustible, ou éventuellement en kilowattheure par kilogramme (kWh/kg), dans le cas où l'on souhaite comparer entre elles différentes sources d'énergie (bois, combustibles fossiles, électricité) pour un même service rendu. Un kilowattheure vaut 3,6 mégajoules (MJ).

On définit deux grands types de pouvoirs calorifiques[3] :

### **5.1. Pouvoir calorifique inférieur (HHV)**

Le pouvoir calorifique inférieur représente la quantité de chaleur libérée par la combustion lorsque toute l'eau s'évapore dans les fumés comme c'est généralement le cas du bois utilisé comme source d'énergie. Sa formule est donnée par l'équation (1) :

$$\text{HHV} = 34030 \cdot X_c + 121640 \cdot X_H - 12540 \cdot X_o \quad (1)$$

**HHV** : Pouvoir calorifique inférieur (MJ/Kg)

**X<sub>c</sub>** : Fraction massique en carbone (%)

**X<sub>H</sub>** : Fraction massique en hydrogène (%)

**X<sub>o</sub>** : Fraction massique en oxygène (%)

### **5.2. Pouvoir calorifique supérieur (LHV)**

Le pouvoir calorifique supérieur représente la quantité de chaleur libérée par la combustion lorsque l'eau est condensée pour récupérer sa chaleur latente de condensation (cas des chaudières domestiques à condensation alimentées au gaz naturel ou au fioul, par exemple). Sur le plan pratique, seul le pouvoir calorifique inférieur présente un intérêt pour l'utilisateur de bois-énergie, les chaudières à condensation pour ce type de combustible étant peu diffusées. Par contre, la connaissance du HHV suppose celle du LHV, car c'est le pouvoir calorifique

## Chapitre 2

### Composition de la biomasse

---

supérieur qui est déterminé expérimentalement pour tous les combustibles[3]. Sa formule est donnée par l'équation (2) :

$$\text{LHV} = 0.0536 * \text{FC} + 0.1559 * \text{MV} + 0.0078 * \text{A} \quad (2)$$

- LHV** : Pouvoir calorifique supérieur calculer (MJ/Kg)  
**FC** : Carbone fixe par rapport à la matière sèche (%)  
**MV** : Matière volatile par rapport à la matière sèche (%)  
**A** : Cendre (%)

## 6. Références

1. García, R., et al., *Spanish biofuels heating value estimation. Part II: Proximate analysis data*. Fuel, 2014. 117: p. 1139-1147.
2. <https://en.wikipedia.org/>.
3. Bafouloulou, Y., *Caractérisation énergétique de la biomasse phoenicicole* 2013, Université de Skikda
4. Vargas-Moreno, J.M., et al., *A review of the mathematical models for predicting the heating value of biomass materials*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012. 16(5): p. 3065-3083.
5. Vassilev, S.V., et al., *An overview of the chemical composition of biomass*. Fuel, 2010. 89(5): p. 913-933.

**Liste des figures :**

<i>Figure 3.1: Les palmiers dattier [4]</i> .....	26
<i>Figure 3. 2: Le palmier dattier [7]</i> .....	31

**Liste des tableaux :**

<i>Tableau 3.1: Classification botanique du palmier dattier</i> .....	30
---	----



<b>Chapitre 3 : La Biomasse Phoenicicole</b>	<b>25</b>
<b>1. Introduction générale</b>	<b>25</b>
<b>2. Palmier dattier (<i>Phoenix dactylifera</i> L.)</b>	<b>25</b>
2.1 Particularités	26
2.2 Description	26
2.3 Culture	27
2.4 Variétés	27
2.5 Inventaire des cultivars	28
<b>3. Utilisations</b>	<b>28</b>
<b>4. Biomasse phoenicicole dans l'écosystème oasien</b>	<b>29</b>
<b>5. Types de la biomasse phoenicicole</b>	<b>30</b>
5.1 Biomasse saccharifère	30
5.2 Biomasse lignocellulosiques (palmes, pédicelle, lif, <i>kornaf</i> , spathe)	30
5.2.1. Stipe	30
5.2.2. Enveloppe de la spathe	31
5.2.3. Palme	31
<b>6. Palmier Dattier en Algérie</b>	<b>32</b>
6.1 Origine	32
6.2 Superficie et nombre	32
<b>7. Références</b>	<b>33</b>

## Chapitre 3 : La Biomasse Phoenicicole

### 1. Introduction générale

Le palmier dattier était primitivement cultivé dans les zones arides et semis arides Chaudes de l'ancien monde .il a été introduits par les Arabes à partir des côtes Orientales de l'Afrique .Le dattier fait l'objet d'une exploitation intensive en Afrique, en moyen orient, et aux USA : mais dans la plupart des pays ou sa culture est très anciennement pratiquée, son exploitation est souvent menée en association avec d'autres cultures

De nos jours, les réserves en pétrole brut, les capacités de raffinage limitées, et l'inquiétude grandissante, en ce qui concerne la dégradation de l'environnement, offrent d'excellentes perspectives au bioéthanol. Il est probablement la source d'énergie alternative pour les véhicules et la plus utilisée au monde.

En Algérie les cultivars de dattes sont nombreux et sont estimés à plus de 800 variétés. Ces ressources génétiques sont très mal exploitées à l'exception de *Deglet Nour* et à degré moindre, *Ghars*, *Degla Beida* et *Mech Degla* qui présentent une importance économique majeure[1].

### 2. Palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*)

Le Palmier dattier ou Dattier (*Phoenix dactylifera L.*) est une plante monocotylédone de la famille des Arécacées (Palmiers) et de la sous-famille des Coryphoideae, largement cultivé d'abord pour ses fruits : les dattes. Dans l'agriculture d'oasis saharienne, c'est la plante qui domine la strate arborée des arbres fruitiers qui poussent à son ombre et qui, eux-mêmes, couvrent cultures maraîchères, fourragères, voire céréalières. A priori, on ne connaît pas cette espèce à l'état spontané (sauvage), mais sub-spontané (échappée de culture). Cette plante monocotylédone n'est pas un arbre, au sens botanique, car elle ne produit pas de vrai bois. C'est donc abusivement que le terme d'arbre est utilisé pour parler d'un dattier. Toutefois ce palmier constitue souvent une des strates arborées dans son milieu.

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) arbre mythique, ayant des symboles multiples pour différentes civilisations et religions; Est l'élément essentiel de l'écosystème oasis. Ecologique, il joue un rôle économique et social. La biomasse phoenicicole générée par le procédé agricole de cette ressource présente de nombreux avantages, notamment la disponibilité, la biodiversité, l'aspect renouvelable et un potentiel l'énergétique significatif[2].

## 2.1 Particularités

Les palmeraies forment un ensemble assez vaste qui nous rappelle l'aspect d'une forêt. Sous l'effet des conditions édapho-climatiques des milieux sahariens, les palmeraies sont le résultat d'une grande ingéniosité des oasiens, caractérisées principalement par une maîtrise de captage et de répartition des eaux, ce qui permet de distinguer deux types de palmeraies : des palmeraies irriguées et d'autres, dites système Bour.

Les palmeraies offrent leur ombre et abaissent la température ambiante, devenant ainsi le meilleur endroit pour vivre au Sahara et constituant des endroits importants pour l'habitat et les activités de loisir[3] ;(cf. figure 3.1)



Figure3.1:Les palmiers dattier[4]

## 2.2 Description

Le Palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) est un grand palmier de 15 à 30 m de haut, au stipe (simili-tronc) cylindrique, portant une couronne de feuilles (les palmes). Les feuilles sont pennées, finement divisées et longues de 4 à 7 mètres. L'espèce est dioïque : les fleurs mâles et femelles sont portées par des individus différents. Les inflorescences mâles ou femelles, appelées spadices, sont enveloppées d'une très grande bractée membraneuse, la spathe. Les fleurs femelles ont trois carpelles indépendants, dont un seul se développe pour former la datte. Du fait de la longueur de la phase végétative du palmier, on ne peut connaître le sexe d'un plant qu'après 6 à 8 ans. Les fruits sont appelés dattes et sont groupés en régimes : ce sont des baies, à chair sucrée entourant un « noyau » osseux qui est en fait la graine[3].

### 2.3 Culture

La culture du palmier dattier est appelée phœniciculture. *Phoenix dactylifera L.* résiste bien au froid (jusqu'à -12 °C) comme à la sécheresse. C'est un grand palmier, qui pousse vite s'il est bien arrosé. Idéalement, il prospère en situation désertique aride, à condition d'avoir suffisamment d'eau à disposition. La pollinisation se fait par le vent (anémophilie) dans la nature. En culture, le nombre volontairement réduit (par l'Homme) de palmiers mâles oblige à pratiquer une pollinisation artificielle, à la main. Dans les oasis algériennes ou tunisiennes, où ils sont appelés *dhokkar* (= mâle en arabe), on en compte souvent un pour 100 pieds femelles.

La propagation des palmiers dattiers se fait par clonage : soit traditionnellement, par prélèvement de drageons ou rejets (qu'on appelle souvent en arabe *djebbar* ou *ghars* en Afrique du Nord), soit plus récemment par culture in vitro, afin de conserver les cultivars choisis. En effet, le simple semis d'un palmier ne permettrait ni de retrouver les qualités (gustatives du fruit notamment) d'origine, ni d'être certain de son sexe (et seuls les pieds femelles sont choisis pour être multipliés, car porteurs de fruits). Cela dit, le semis est très facile et souvent involontaire et peut, dans de rares cas, être à l'origine d'un palmier dattier femelle intéressant qui sera retenu, et reproduit, devant ainsi un nouveau cultivar. Les pieds mâles fleurissent 3 à 5 ans après le semis, les femelles 6 à 10 ans après. Dans les oasis traditionnelles en Afrique du Nord, les agriculteurs oasiens continuent à sélectionner à partir des populations de semis qui ont germé au hasard des variétés nouvelles qui seront ensuite multipliées par clonage : l'enrichissement des collections de clones ou cultivars se poursuit. Dans ces zones (le Draa et le Tafilalet au Maroc, Mzab, Gourara en Algérie, Djérid en Tunisie, etc., mais en fait, un peu partout où la phœniciculture existe), ce processus de sélection paysanne offre de nouveaux cultivars qui sont nommés, et donc aussi des noms vernaculaires à ces variétés de palmiers

### 2.4 Variétés

Il existe des milliers de cultivars, communément qualifiés de variétés. Comme le palmier-dattier est multiplié végétativement, ses cultivars sont des clones ou des groupes de clones. Les différents cultivars sont généralement classés selon la texture et la consistance des fruits à maturité en deux grands groupes : les dattes sèches et les dattes molles. Les dattes intermédiaires en demi-sèches ou demi-molles. En Algérie, plus de 1160 cultivars sont recensés. '*Deglet Noor*', '*Ghars*', '*Degla Beydha*', '*Tilemsu/Hmiira*', '*Tinnaser*', '*Tigazza*', '*Tazerzayet*', '*Taqerbuch*', sont très répandus. Il en existe bien d'autres caractérisant chaque région comme '*Seb'a Bedra*', '*Aggaz*', '*Cheykh Mhammed*', '*Aabbad*', '*Daglat Talmiin*', '*Adam Figiig*', '*Mahdi*', '*Wargliyyah*' etc. [3]

## 2.5 Inventaire des cultivars

Les cultivars du dattier sont identifiés par des appellations vernaculaires. Les caractères morphologiques du palmier adulte et surtout des fruits sont les critères habituellement utilisés pour distinguer les variétés. Les efforts de caractérisation sont hétérogènes d'un pays à un autre. Aujourd'hui, sur la base d'une proposition maghrébine, Bioversity International a édité les descripteurs du palmier dattier, ce qui permettra de décrire les cultivars selon un standard commun. Il est évidemment possible de facilement caractériser ces cultivars par analyse génétique, puisque ce sont des clones.

À force de généraliser la culture de cultivars dits meilleurs ou de bonne qualité ou encore d'exportation, le plus grand nombre de cultivars et surtout de francs et de palmiers mâles (*dokkars*) sont soumis à une érosion dramatique. [3]

En Algérie, plus de 50 % des palmiers cultivés sont du cultivar 'Deglet Noor', bien qu'il existe d'autres cultivars mieux adaptés, plus résistants à la sécheresse et aux maladies, et encore plus productifs ou plus précoces[5].

L'une des dattes les plus grosses est 'Daglat Talmiin'. L'une des plus précoces est 'Cheikh Mhammed' ou 'Wargliyyah/Ferranah' (maturité : juin). La datte la plus longue est celle du cultivar dit 'Seb'a Bedra' (>7 cm). L'un des cultivars résistants au Bayoud (fusariose) est le 'Taqerbucht' bien que d'autres sont supposés l'être comme 'Tiwraghin', 'Adama Figig', 'Akerbuch', 'Takermust'[5]

## 3. Utilisations

Le palmier dattier fournit des fruits, très énergétiques, mais bien d'autres choses. Plus de 130 usages sont identifiés auprès des populations oasiennes [5].

- Ses dattes servent à la production de miel de datte (Rob), de vinaigre et de boissons alcoolisées ou non (dans certains pays d'Afrique du Nord, le palmier dattier est utilisé pour extraire le *legmi* de son stipe (simili-tronc), en incisant le bourgeon terminal de la plante et en récupérant la sève, un peu à la manière de l'eau d'érable Amérique du Nord)
- Son « bois » est précieux, tant comme combustible que comme bois d'œuvre, dans des régions où les arbres sont très rares ;
- Ses feuilles (palmes) fournissent une matière première pour la fabrication de divers objets de vannerie. Entières, elles sont utilisées pour couvrir les toits ou fixer les dunes (*afreg*).

- Le rachis sert pour la confection des articles de meubles. Les bases des pétioles (karnaf) sont utilisées dans la construction ou dans des travaux artistiques d'ébénisterie (à Metlili, à côté de Ghardaïa, par exemple) ;
- Le bourgeon terminal, comme pour beaucoup de palmiers, peut être consommé comme chou palmiste ;
- Les épines de ses palmes sont utilisées comme porte-brochettes et aussi comme épingles dans le métier à tisser. Parfois certains nomades chasseurs l'utilisent pour fabriquer des pièges pour capturer des gazelles, des fennecs et des mouflons ; il est aussi souvent employé comme « arbre » d'ornement.

#### **4. Biomasse phoenicicole dans l'écosystème oasien**

Le palmier dattier (*Phoenix Dactylifera L.*) connu depuis l'antiquité, était considéré par les égyptiens comme un symbole de fertilité, représenté par les carthaginois sur les pièces de monnaies et les monuments, et utilisé par les grecs et les latins comme ornement lors des célébrations triomphales. Dans la tradition Chrétienne, les feuilles représentent un symbole de paix et rappellent l'entrée de Jésus dans Jérusalem.

Par ailleurs, le palmier dattier est une plante qui représente un intérêt écologique, économique et social majeurs pour de nombreux pays situés dans des zones arides qui comptent parmi les plus pauvres du globe.

Le développement de la phœniciculture permet de lutter durablement contre l'insécurité alimentaire dans les régions où la désertification est accentuée par les changements climatiques. En effet, le palmier dattier, en créant au milieu du désert un microclimat favorable au développement de cultures sous-jacentes, constitue l'axe principal de l'agriculture dans les régions désertiques et assure la principale ressource vivrière et financière des oasiens.

L'Algérie est un pays phoenicicole classé au sixième rang mondial et au premier rang dans le Maghreb pour ses grandes étendues de culture avec 160 000 ha et plus de 2 millions de jardins et sa production annuelle moyenne de dattes de 500 000 tonnes. [6]

La classification Botanique du Palmier Dattier (*Phoenix Dactylifera L.*) Est mentionnée dans le tableau 3.1 :

**Tableau 3.1: Classification botanique du palmier dattier[7]**

<b>Groupe</b>	<b>Spadiciflores</b>
<b>Ordre</b>	<b>Palmales</b>
<b>Familles</b>	<b>Palmacées</b>
<b>Sous famille</b>	<b>Coryfoïdées</b>
<b>Tribu</b>	<b>Phoenicées</b>
<b>Genre</b>	<b>Phoenix</b>
<b>Espèce</b>	<b>Dactylifera L.</b>

Le genre Phoenix comporte au moins douze espèces, la plus connue est le Dactylifera, dont les fruits « dattes » font l'objet d'un commerce international important.

## **5. Types de la biomasse phoenicicole**

Les opérations culturales de suivi et de gestion du palmier dattier offrent une gamme de produits et sous-produits polyvalents :

### **5.1 Biomasse saccharifère**

Elle est constituée de déchets de dattes représentant 25% de la production totale. Les rebuts de dattes ou écarts de tri de dattes représentent les fruits du palmier dattier non consommables par l'être humain.

### **5.2 Biomasse lignocellulosiques (palmes, pédicelle, lif, *kornaf*, spathe)**

#### **5.2.1. Stipe**

Le tronc du palmier dattier, aussi appelé tige est vertical, cylindrique et colonnaire de la circonférence. Le périmètre n'augmente pas lorsque la canopée des feuilles s'est pleinement développé. Il est de couleur brune, lignifiées et sans aucune ramification.

Sa circonférence moyenne est d'environ 1 à 1,10 m. Le tronc est composé de fibres dures, les faisceaux vasculaires cimentés dans une matrice de tissu cellulaire, qui est beaucoup plus proche de la partie lignifiée extérieure du tronc. Étant une monocotylédone, le palmier dattier n'a pas de cambium. Hauteur peut atteindre 20 mètres.[6]

### 5.2.2. Enveloppe de la spathe

Le Palmier dattier est une plante dioïque. Les organes de reproduction sont composés d'inflorescences mâles ou femelles portées par des palmiers différents. Les spathes ont une forme de grappes d'épis protégés par une bractée ligneuse close et fusiforme. Elles sont de couleur vert-jaunâtre et sont formées à partir de bourgeons développés à l'aisselle des palmes.

### 5.2.3. Palme

Les feuilles d'un palmier dattier sont de 3 à 6 m de long (4 m en moyenne) et ont une durée de vie normale de 3 à 7 ans. Il est nu des épines sur une courte distance, mais plein d'épines sur les deux côtés par la suite. Les zones intermédiaires sont la colonne vertébrale de type tracts, également appelés dépliant en forme de colonne vertébrale.

La structure de la feuille est la variable et dépend de l'environnement, il est utilisé comme un index taxonomique en vue de pouvoir différencier les variétés. Un palmier dattier adulte a environ 100 à 125 feuilles vertes avec une formation annuelle de 10 à 26 feuilles nouvelles[6]. ;(cf. Figure : 3.2) :

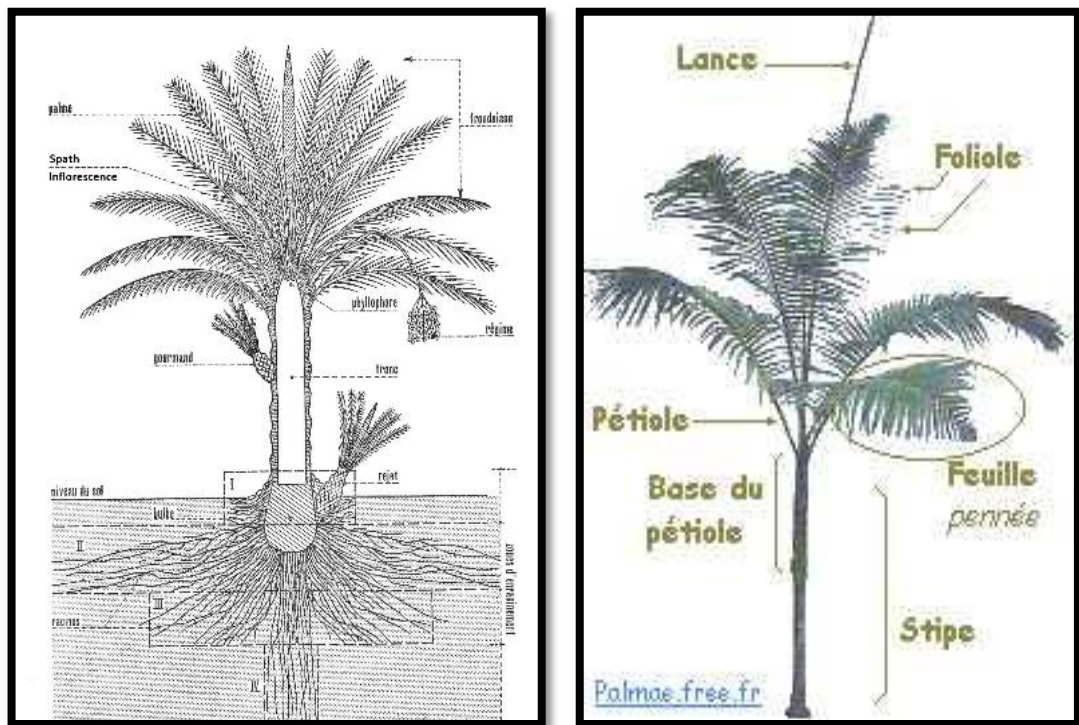


Figure 3. 2: Le palmier dattier [8]



## **6. Palmier Dattier en Algérie**

### **6.1 Origine**

L'origine du Palmier Dattier en Algérie, vient de la « péninsule arabique » ; à travers les commerçants qui ont propagé du Palmier autour de la Méditerranée, il était introduit spécialement dans les lieux disposant d'eau dans le Sahara. C'est ainsi que sont apparues les premières palmeraies de Oued Righ et des Ziban par le biais des bédouins nomades arabes, venus d'Orient, pour le commerce.

Le patrimoine phoenicicole national est concentré dans toutes les régions situées sous L'Atlas saharien. Dans la partie septentrionale est et centre du Sahara Algérien concentrées essentiellement dans le sud-est du pays. Parmi ces zones potentielles, à savoir : Souf, Ziban, Oued Righ, Cuvette de Ouargla, M'Zab, El-Goléa, Tamanrasset, Illizi et Tindouf.

### **6.2 Superficie et nombre**

Nous avons enregistré durant ces dernières décennies une augmentation de la superficie destinée à la phoeniculture, de plus de 150 mille hectares puis de 170 mille hectares, aussi bien une évolution remarquable en nombre du Palmier. En effet, 9 millions de pieds ont été signalés en 1996 par Messar, passe par la suite vers les 15 millions de palmiers enregistrés en 2005 et 16,5 million palmiers en 2008. Dernièrement ce potentiel est de l'ordre de plus de 17 millions palmiers[9].

## 7. Références

1. Boulal, A., et al., *Transformation des déchets de dattes de la région d'Adrar en bioéthanol*. Revue des énergies renouvelables, 2010. 13(3): p. 455-463.
2. Bousdira, K., L.h. Nouri, and J. Legrand, *Chemical Characterization of Phoenicicole Biomass Fuel in Algerian Oasis: Deglet Nour and Ghars Cultivars Case*. Energy & Fuels, 2014. 28(12): p. 7483-7493.
3. Sebihi, A.H., *Valorisation des produits du palmier dattier (Phoenix dactylifera L.); source de promotion des produits de terroirs - Cas de la région de Ouargla -*. 2014.
4. Rosillo-Calle, F. and J. Woods, *The biomass assessment handbook: bioenergy for a sustainable environment*. 2012: Earthscan.
5. [http://www.langues-anciennes.org/modules/phenix/le\\_palmier\\_dattier.html](http://www.langues-anciennes.org/modules/phenix/le_palmier_dattier.html).
6. Bafouloulou, Y., *Caractérisation énergétique de la biomasse phoenicicole* 2013, Université de Skikda
7. <https://en.wikipedia.org/>.
8. *Des livres informatiques "pour les nuls"*.
9. Absi, A., *ANALYSE DE LA DIVERSITE VARIETALE DU PALMIER DATTIER (Phoenix dactylifera L.) Cas des Ziban (Région de Sidi Okba)*. 2013, Université Mohamed Khider Biskra.

## Liste des figures :

Figure 1 : Teneurs en humidité de la biomasse phoenicicole.....	37
Figure 2 : Composition immédiate de la biomasse phoenicicole .....	39
Figure 3 : Composition élémentaire de la biomasse phoenicicole .....	42
Figure 4 : Pouvoir calorifique HHV (MJ /Kg) de la biomasse phoenicicole .....	44
Figure 5 : Projection des variables sur les plans (1 x 2) (a) et (1 x 3) (b) .....	48
Figure 6 : Projection des cas sur les plans (1 x 2) (a) et (1 x 3) (b) avec LIF_AZ .....	50
Figure 7 : Projection des cas sur les plans (1 x 2) (a) et (1 x 3) (b) sans LIF_AZ .....	52
Figure 8 : Composition immédiate de 1 <sup>er</sup> groupe.....	53
Figure 9 : Composition immédiate de 2 <sup>e</sup> groupe.....	54
Figure 10 : Composition immédiate de 3 <sup>e</sup> groupe.....	55

## Liste des tableaux :

Tableau 1 : Cultivars étudiés.....	34
Tableau 2 : Désignation des principaux sous-produits étudiés du palmier dattier.....	34
Tableau 3 : Protocoles et méthodes analytiques utilisées pour la caractérisation chimique des principaux sous-produits du palmier dattier [3].....	35
Tableau 4 : Calcul des erreurs absolues et relatives pour CHO et FC.....	36
Tableau 5 : Analyse de la variance ANOVA de la composition immédiate, élémentaire et du pouvoir calorifique de la biomasse phoenicicole .....	45
Tableau 6 : Corrélation entre les paramètres de composition immédiate et le pouvoir calorifique .....	46
Tableau 7 : Valeurs propres.....	46
Tableau 8 : Coordonnées factorielles des variables.....	47
Tableau 9 : Coordonnées factorielles des sous-produits phoenicicoles .....	49
Tableau 10 : Classification de la biomasse phoenicicole.....	52

## Sommaire

Liste des figures : .....	1
<b>1. Matériels et Méthodes d'analyses</b> .....	<b>34</b>
1.1. Présentation de la région d'étude et des échantillons .....	34
1.2. Méthodes d'analyses .....	34
1.3. Appareillage utilisé .....	35
<b>2. Calcul d'erreurs</b> .....	<b>35</b>
2.1. Paramètres expérimentaux .....	36
2.2. Paramètres calculés .....	36
2.3. Traitement statistique de résultats .....	36
<b>3. Interprétation et résultats</b> .....	<b>37</b>
3.1. Composition immédiate .....	37
3.2. Composition élémentaire .....	41

<b>3.3 Pouvoir calorifique</b>	<b>43</b>
<b>3.4 Classification de la biomasse phoenicole</b>	<b>46</b>
<b>4. Références:</b>	<b>56</b>

# Partie Expérimentale

## 1. Matériels et Méthodes d'analyses

### 1.1. Présentation de la région d'étude et des échantillons

La méthodologie d'échantillonnage et de préparation des échantillons est celle citée dans la référence [1, 2] .

Les échantillons étudiés représentent les principaux sous-produit du palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) correspondant aux cultivars dominant de l'oasis Guerrara -Algérie (tableau 1 et 2) [1]

**Tableau 1 : Cultivars étudiés**

Cultivars	Abréviations
TIMJAUHERT	TIM
TAFAZOUINE	TAF
AZERZA	AZ
KSEBBA	KSB
DEGLA BEYDA	DB
BENT QBALA	BQ
TANASLIT	TAN
ADDALA	ADL

**Tableau 2 : Désignation des principaux sous-produits étudiés du palmier dattier**

Désignation locale	Désignation scientifique
Lif (LIF)	Fibrilium, lif
Djerid (DJ)	Palm
Kernaf (KER)	Pétiole, kernaf
Arjoun (ARJ)	Régime
Khallab (KH)	Spathe
Addaf (AD)	Rachis
Saqqas (SAQ)	Pédoncule du régime

### 1.2. Méthodes d'analyses

La méthodologie d'analyses est celle décrite et résumée dans le tableau 3[3]:

**Tableau 3 : Protocoles et méthodes analytiques utilisées pour la caractérisation chimique des principaux sous-produits du palmier dattier [3]**

Protocoles et Paramètres d'analyse	Normes utilisées	Principes et méthodes
Pouvoir calorifique (HHV)	UNE-EN 14918	Biocombustibles solides
Humidité (M)	UNE-EN 14774-2	Chauffer le four à moufle à 750 ° C. Placer les creusets en porcelaine précédemment enflammés et couvrir dans le four pendant 10 min. Refroidir les creusets dans un dessiccateur pendant 1h. Peser les creusets et ajouter à chacun environ 1g(A). Mettre les échantillons au four à 105 ° C pendant 2 h. Placer les échantillons (B) dans un dessiccateur pendant 1 h et peser. $M = ((A - B) / A) \times 100$
Matière volatile (VM)	UNE-EN 15148:2010	Chauffez le four à moufle à 950 ° C. Préchauffer les creusets utilisés pour la détermination de l'humidité avec des couvercles en place et contenant l'échantillon(B), comme suit: avec la porte du four ouverte, pendant 2 min ou le rebord extérieur du four (300 ° C), puis pendant 3 min sur le bord du four (500 ° C). Déplacez ensuite les échantillons à proximité du four pendant 6 minutes avec la porte du moufle fermée. Regarder les échantillons à travers un petit trou dans la porte du moufle. En cas d'étincelles, les résultats sont erronés(C). Refroidir les creusets dans un dessiccateur pendant 1h et peser. $VM = ((B - C) / B) \times 100$
Les cendres (A)	UNE-EN 14775	Placer les couvercles et le creuset non couvert utilisé(C) pour la détermination de la matière volatile, et contenir l'échantillon dans le four à moufle à 750 ° C pendant 6h. Refroidir les creusets(D) avec les couvercles en place dans un dessiccateur et peser. Répéter le brûlage de l'échantillon jusqu'à ce qu'une période de chauffage de 1h se traduise par une perte inférieure à 0,0005 g $Cendres = (C / D) \times 100$
Carbone fixe (FC)	Formule empirique	$FC = 100 - VM - A$
Fractions massiques de la composition élémentaire CHO	Formule empirique de Parikh [4]	$C\% = 0,637 \times FC + 0,455 \times VM$ $H\% = 0,052 \times FC + 0,062 \times VM$ $O\% = 0,304 \times FC + 0,476 \times VM$

### 1.3. Appareillage utilisé

- Four, avec régulation automatique de la température à  $105 \pm 1$  °C.
- Four à Moufle, pour contrôler les températures à  $750 \pm 5$  °C et  $950 \pm 5$  °C.
- Balance analytique, d'une capacité d'au moins 100 g et d'une sensibilité de 0,1mg.
- Creusets en porcelaine, 41 par 37mm avec couvercles en porcelaine.
- Dessiccateur, contenant du chlorure de calcium comme agent de séchage.

## 2. Calcul d'erreurs

Deux types d'erreurs ont été calculés au cours de la manipulation :

- L'erreur absolue  $\Delta x$  qui désigne l'erreur maximale susceptible de commettre dans l'évaluation de x. L'incertitude absolue s'exprime donc dans les unités de la grandeur mesurée.
- L'erreur relative  $\Delta x/x$  représente l'importance de l'erreur par rapport à la grandeur mesurée. L'incertitude relative n'a pas d'unités et s'exprime en général en % 100 ( $\Delta x/x$ ).

## 2.1. Paramètres expérimentaux

Les erreurs de la composition immédiate (M, VM et A) et du pouvoir calorifique (HHV) sont données par les équations suivantes :

$$\text{L'erreur absolue : } \Delta x = \text{moyenne} |x_i - x_{\text{moy}}|$$

$$\text{L'erreur relative: } E = \frac{\Delta x}{x}$$

Tel que  $x$  : représente M, VM, A et HHV

## 2.2. Paramètres calculés

Le calcul d'erreurs pour ces paramètres se base sur la méthode des dérivées partielles :

$$\text{Soit : } X = F(a, b, c, \dots)$$

$$\Rightarrow dX = \frac{\partial F}{\partial a} da + \frac{\partial F}{\partial b} db + \frac{\partial F}{\partial c} dc + \dots$$

$$\Rightarrow \Delta X = \left| \frac{\partial F}{\partial a} \right| \Delta a + \left| \frac{\partial F}{\partial b} \right| \Delta b + \left| \frac{\partial F}{\partial c} \right| \Delta c + \dots$$

Tel que : X présente la composition élémentaire (C, H, O) ou le carbone fixe (FC)

Le tableau 4 représente le calcul des erreurs absolues et relatives pour la composition élémentaire et le carbone fixe :

**Tableau 4 : Calcul des erreurs absolues et relatives pour CHO et FC**

Paramètres	X	$\Delta X$
FC = 100 - VM - A	100 - VM - A	$\Delta VM + \Delta A$
C = 0,637 FC + 0,455 VM	0,637 FC + 0,455 VM	0,637 $\Delta FC$ + 0,455 $\Delta VM$
H = 0,052 FC + 0,062 VM	0,052 FC + 0,062 VM	0,052 $\Delta FC$ + 0,062 $\Delta VM$
O = 0,304 FC + 0,476 VM	0,304 FC + 0,476 VM	0,304 $\Delta FC$ + 0,476 $\Delta VM$

## 2.3. Traitement statistique de résultats

L'Analyse de la Composante Principale (ACP) est la méthode statistique utilisé pour la classification de la biomasse phoenicicole étudiée en se basant sur les paramètres chimiques mesurés/calculés : la composition immédiate et le pouvoir calorifique.

Rappelons que : l'Analyse de la Composante Principale (ACP) est une méthode de la famille de l'analyse des données et plus généralement de la statistique multivariée. Le principe de cette méthode consiste à transformer des variables corrélées entre elles en nouvelles variables décorréelées les unes des autres. Ces nouvelles variables sont nommées « composantes



principales », ou axes principaux. Elle permet au praticien de réduire le nombre de variables et de rendre l'information moins redondante[5].

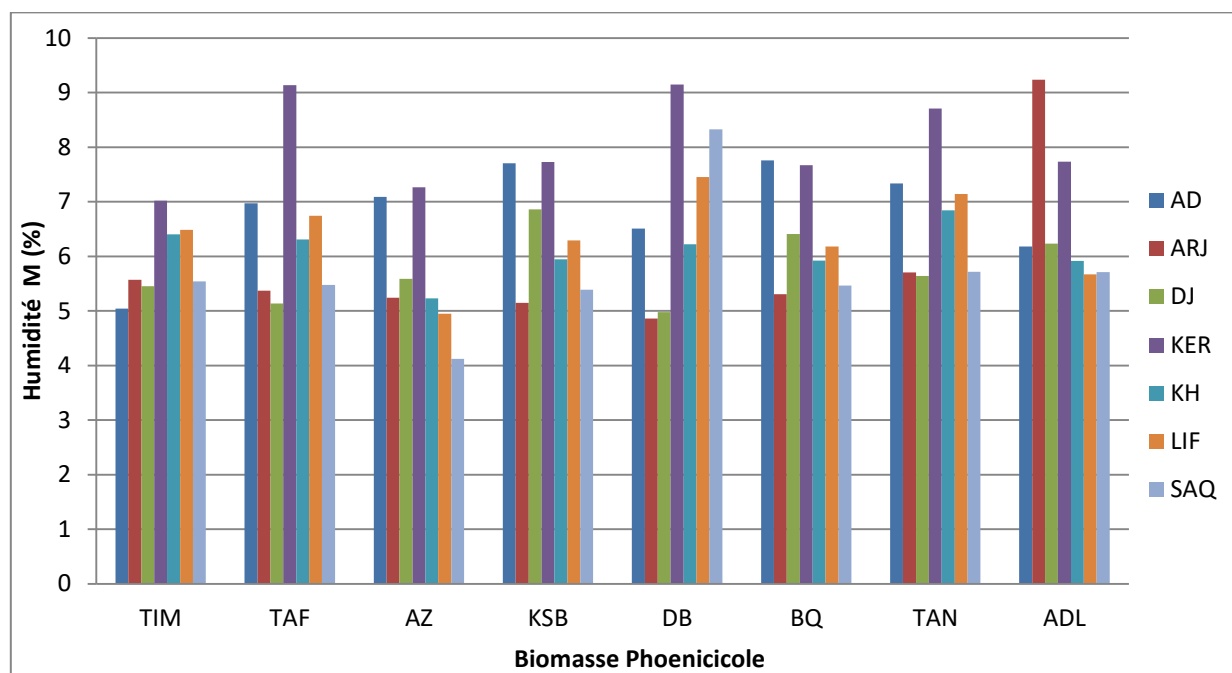
L'analyse de variance ANOVA est la méthode utilisée pour l'étude de variabilité de paramètre chimique intra et entre les cultivars et sous-produits phoenicicoles considérés (étudiés).

### 3. Interprétation et résultats

#### 3.1. Composition immédiate

Les figures 1 et 2 représentent la composition immédiate de la biomasse phoenicicole correspondante aux principaux cultivars de l'oasis de Guerrerra à savoir : Timjuhart, Tafiziwin, Azerza, Kseba, Begla Beyda, Bent Qbala, Taneslit et Addala.

#### Humidité (M)



**Figure 1: Teneurs en humidité de la biomasse phoenicicole**

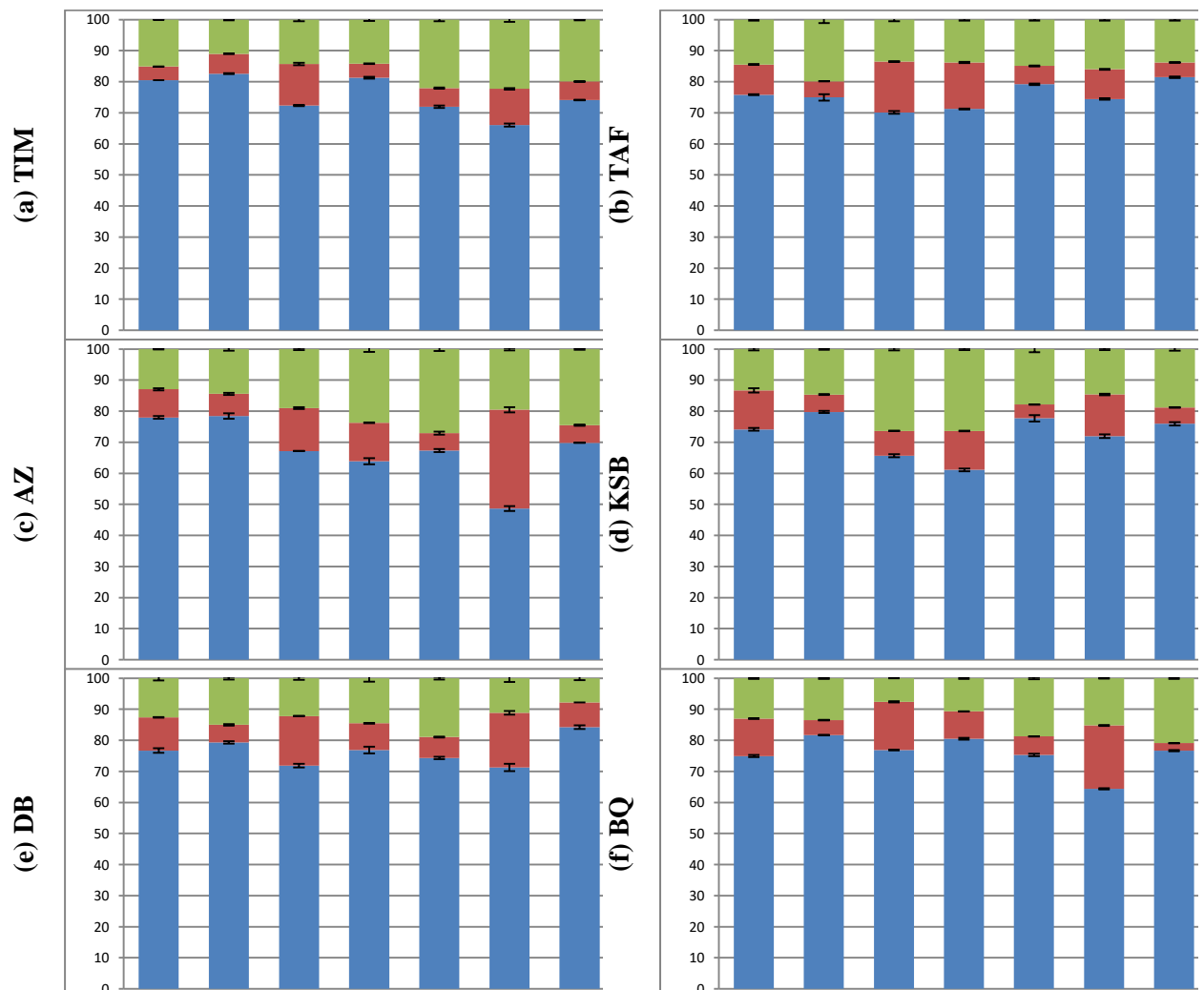
La figure 1 représente la teneur en humidité des principaux sous-produits des principaux cultivars dans l'oasis de Guerrera. Cette figure montre que ce paramètre connaît une variation significative entre les différents déchets, notamment entre SAQ et KER dont les teneurs en humidité sont estimées en moyenne 5,719% et 8,053% respectivement.

D'une manière générale, la teneur en humidité varie entre  $(4,120 \pm 0,043) \%$  (SAQ\_AZ) et  $(9,139 \pm 0,054) \%$  (KER\_TAF) ; sa teneur moyenne est de  $(6,380 \pm 0,049) \%$  (KH\_TIM).

Une comparaison des sous-produits du palmier dattier, donne la classification suivante :

- AB(5,90%) < PB(6,40%) < HAB,HAR,CB(12,00%) < HAG (13,00%) < WWB(19,00%), en considérant les biocombustibles solides citées dans la littérature [6].
- SAQ (5,719%) < DJ (5,788%) < ARJ (5,806%) < KH (6,100%) < LIF (6,366%) < AD (6,826%) < KER (8,053%) en considérant les déchets étudiés.
- AZ (5,641 %) < TIM (5,931 %) < BQ (6,388 %) < KSB (6,440 %) < TAF (6,451 %) < ADL (6,670 %) < TAN (6,729 %) < DB (6,787 %), en considérant les cultivars étudiés.

Nous constatons que notre biomasse est naturellement sèche indépendamment des cultivars et des sous -produits correspondants considérés. Ces faibles teneurs en humidité, augmenteraient la qualité et l'efficacité énergétique de combustion de notre biomasse. Ceci qui engendre des quantités élevées en énergie et des températures optimales de combustion[7]. Par conséquent ce critère est avantageux pour une éventuelle valorisation thermique.



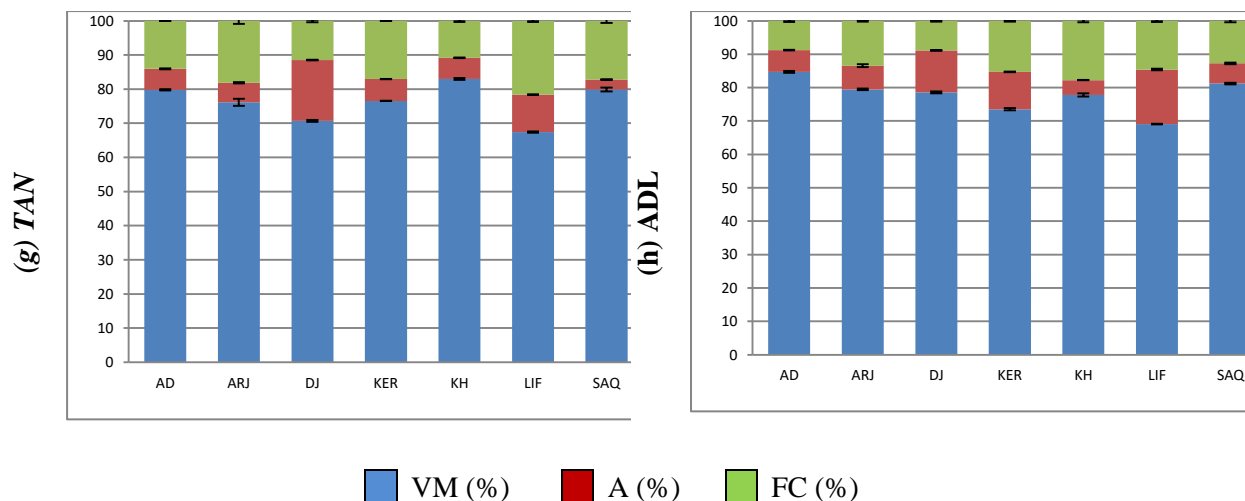


Figure 2: Composition immédiate de la biomasse phoenicicole

### Matières volatiles (VM)

La figure 2 montre que la teneur en matières volatiles (VM) varie entre  $48,631 \pm 0,801\%$  (LIF\_AZ, figure 2.c) et  $84,703 \pm 0,324\%$  (AD\_ADL, figure 2.h), elle est estimée en moyenne à  $74,614\%$  (LIF\_TAF, figure 2.b).

En considérant ce dernier paramètre, une classification de notre biomasse par rapport aux biocombustibles cités en littérature, place les sous-produits phoenicicoles dans l'ordre suivant : PB ( $74,64\%$ ) > HAG ( $69,00\%$ ) > HAS ( $66,70\%$ ) > HAB ( $66,00\%$ ) > HAR ( $64,60\%$ ) > CB ( $63,7\%$ ) > WWB ( $62,90\%$ ) > AB ( $52,50\%$ )[6]. Nous constatons que la biomasse phoenicicole (PB) étudiée a une teneur élevée en matières volatiles en comparaison avec les autres catégories de biomasse. Ceci traduit sa réactivité thermique élevée, ce qui lui confère une basse température d'ignition (de la combustion). Toutefois, cette fraction volatile qui peut être organique ou inorganique, et qui inclut les hydrocarbonés, CO, CO<sub>2</sub>, H et le goudron ; est rapidement dissipées et les températures élevées doivent être maintenues longtemps si la combustion doit être achevée et le niveau d'émission doit être contrôlé [8].

Une comparaison générale de la teneur en matières volatiles entre différents déchets en tenant en considération le caractère variétal, nous conduit à la classification suivante :

VM\_AZ ( $67,604\%$ ) < VM\_KSB ( $72,327\%$ ) < VM\_TAF ( $75,315\%$ ) < VM\_TIM ( $75,551\%$ ) < VM\_BQ ( $75,762\%$ ) < VM\_TAN ( $76,210\%$ ) < VM\_DB ( $76,371\%$ ) < VM\_ADL ( $77,773\%$ )

VM\_LIF ( $66,655\%$ ) < VM\_DJ ( $71,652\%$ ) < VM\_KER ( $73,117\%$ ) < VM\_KH ( $75,822\%$ ) < VM\_SEQ ( $77,932\%$ ) < VM\_AD ( $78,070\%$ ) < VM\_ARJ ( $79,049\%$ )

En se basant sur ce classement qui ne connaît pas une variabilité significative, nous pouvons dire que : les cultivars AD, DB, TAN, BQ, TIM et TAF sont les plus favorits pour une thermoconversion. Les variétés AZ et KSB le sont légèrement moins. Par ailleurs, les parties

inflorescence, rachis et pétioles disposeraient d'un potentiel énergétique supérieur à celui des parties fibrilium et palme (DJ).

### **Cendres (A)**

La figure 2 montre aussi que la teneur en cendre varie globalement entre  $2,425 \pm 0,059\%$  (SAQ\_BQ, figure 2.f) et  $20,402 \pm 0,142\%$  (LIF\_BQ, figure 2.f), elle est estimée à  $9,043\%$  (LIF\_TAF, figure 2.b). L'analyse de la variance (ANOVA) (cf. Tableau 5) appliquée à ce paramètre en tenant en considération l'ensemble des sous-produits des huit cultivars étudiés, montre que la teneur en cendre ne connaît pas une grande variabilité. Ceci est expliqué par l'homogénéité des milieux d'échantillonnage considéré. En revanche, cette entité peut exceptionnellement atteindre des valeurs extrêmes pouvant s'élever à  $20,402 \pm 0,142\%$  jusqu'à  $31,839 \pm 0,845\%$  (cas des LIF\_BQ et LIF\_AZ, figure 2.c). Ces teneurs élevées en cendres sont attribuées à la nature du sol (utilisation de fertilisants) et la qualité de l'eau d'irrigation [9].

Par ailleurs, une comparaison des sous-produits du palmier dattier avec les biocombustibles solides citées dans la littérature ( $0,1-46\%$ )[6], lui donne un classement intermédiaire: AB ( $30,9\%$ ) > CB ( $18,6\%$ ) > PB ( $9,043\%$ ) > HAS ( $8,6\%$ ) > HAB ( $5,7\%$ ) > HAR ( $5,0\%$ ) > HAG ( $4,8\%$ ) > WWB ( $3,5\%$ ). La composition minérale de la biomasse phoenicicole étudiée se rapproche globalement de celle de la paille (HAS) dont la teneur en cendre est estimée à  $8,600\%$ . Des cas exceptionnels peuvent se présenter notamment pour la partie Lif ( $20 - 31\%$ ) dont la composition en cendres se rapproche de celles des combustibles solides fossiles, eaux usées, déchets des serres plastiques, fientes ( $4 - 52\%$ ) [6].

Une comparaison générale des cendres entre différents déchets en tenant en considération le caractère variétal, nous conduit à la classification suivante :

A\_TIM ( $7,464\%$ ) < A\_TAN ( $8,016\%$ ) < A\_KSB ( $8,820\%$ ) < A\_ADL ( $9,163\%$ ) < A\_TAF ( $9,493\%$ ) < A\_BQ ( $9,993\%$ ) < A\_DB ( $10,442\%$ ) < A\_AZ ( $12,213\%$ )

A\_SEQ ( $5,110\%$ ) < A\_KH ( $5,652\%$ ) < A\_ARJ ( $5,935\%$ ) < A\_AD ( $8,892\%$ ) < A\_KER ( $9,922\%$ ) < A\_DJ ( $14,170\%$ ) < A\_LIF ( $16,472\%$ )

En se basant sur ce classement qui ne connaît pas une variabilité marquante, nous pouvons dire que : les cultivars TIM et TAN sont relativement acceptables pour une thermoconversion. Le reste des variétés, notamment AZ, DB et BQ doivent subir des traitements préliminaires pour qu'ils soient conformes à une telle valorisation.

### **Carbone fixe (FC)**

Enfin, la teneur en carbone fixe (FC) varie entre  $7,599 \pm 0,063\%$  (DJ\_BQ, figure 2.f) et  $27,065 \pm 0,617\%$  (KH\_AZ, figure 2.c), elle est estimée en moyenne à  $15,936\%$  (LIF\_TAF, figure 2.b). Rappelons que la teneur en FC est calculée comme la différence entre 100% et la somme des VM et des cendres (% en poids sec). Cette plage de valeurs (7 – 27%) relative à la biomasse phoenicicole étudiée est inclut dans celle des biocombustibles conventionnels (1 à 38%) [6].

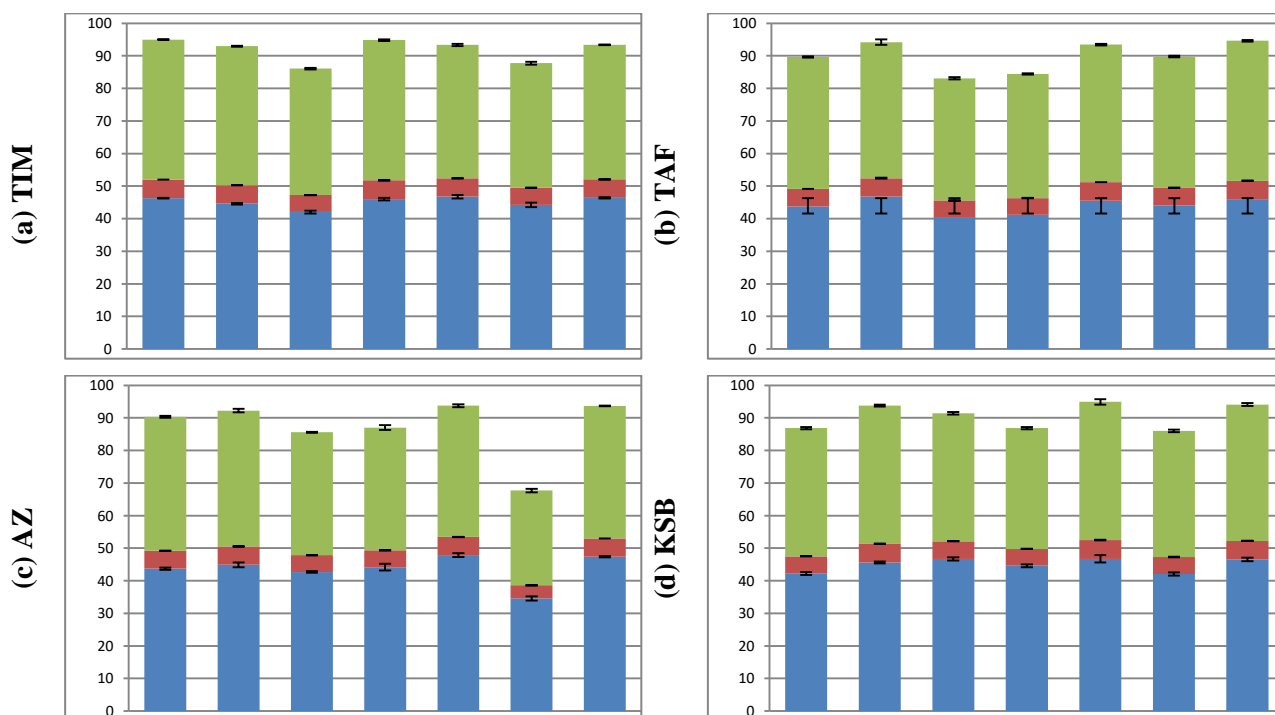
Une variabilité significative du carbone fixe est révélée par l'analyse de la variance (ANOVA) ( tableau 5) car  $p\text{-value}=2\% < 5\%$  seuil de significativité.

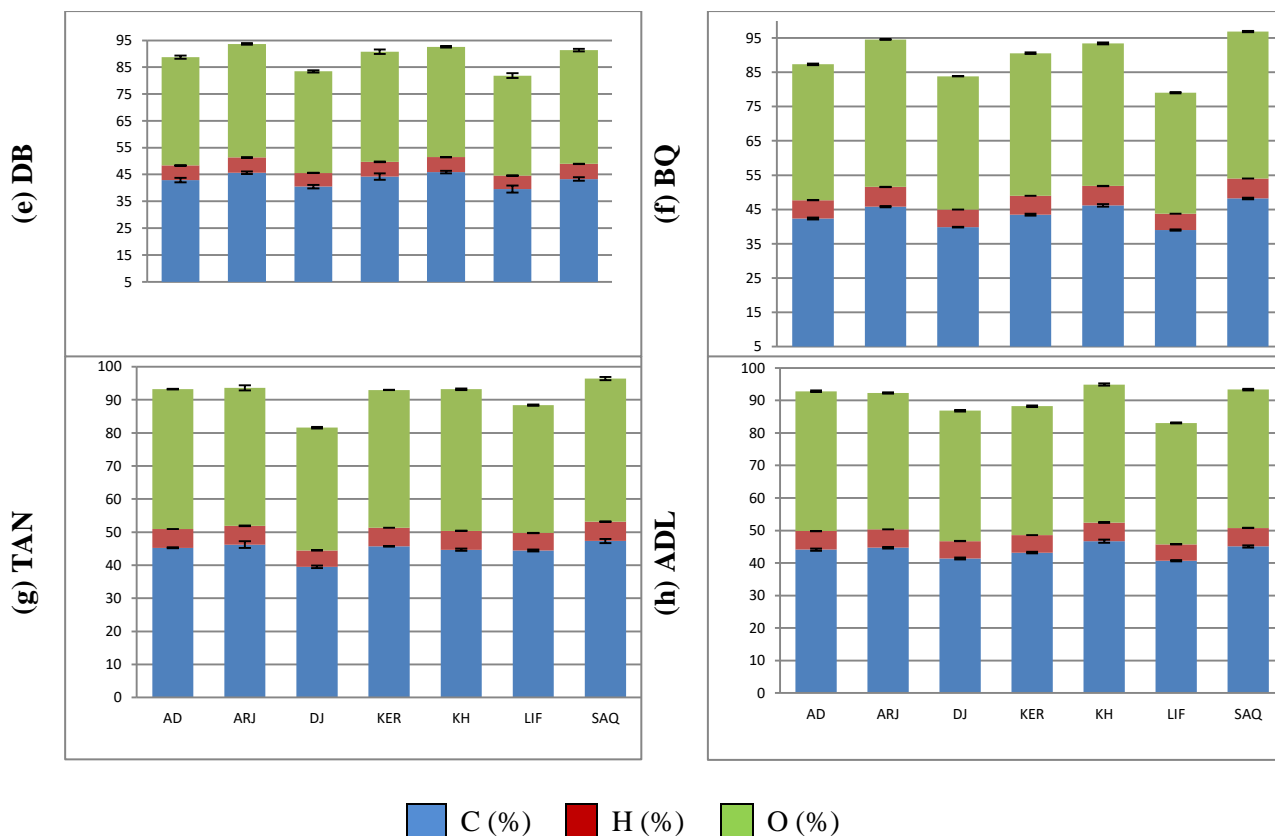
Une comparaison générale du carbone fixe entre différents déchets en tenant en considération le caractère variétal, nous conduit à la classification suivante :

FC\_ADL (13,064%) < FC\_DB (13,187%) < FC\_BQ (14,246%) < FC\_TAF (15,192%) < FC\_TAN (15,774%) < FC\_TIM (16,985%) < FC\_KSB (18,853%) < FC\_AZ (20,183%)

FC\_AD (13,038%) < FC\_DJ (14,178%) < FC\_ARJ (15,016%) < FC\_LIF (16,872%) < FC\_SEQ (16,958%) < FC\_KER (16,962 %) < FC\_KH (18,525%)

### 3.2 Composition élémentaire





**Figure 3 : Composition élémentaire de la biomasse phoenicicole**

La figure 3 représente la composition élémentaire (CHO) des principaux sous-produits du palmier dattier des huit cultivars étudiés :

- La teneur en carbone (C) varie entre  $34,568 \pm 0,616\%$  (LIF\_AZ, figure 3.c) et  $48,199 \pm 0,240\%$  (SAQ\_BQ, figure 3.f), elle est estimée en moyenne à  $44,100\%$  (LIF\_TAF, figure 3.b).
- La teneur en hydrogène (H) varie entre  $4,031 \pm 0,070\%$  (LIF\_AZ, figure 3.c) et  $5,848 \pm 0,065\%$  (LIF\_AZ, figure 3.c), elle est estimée en moyenne à  $5,455\%$  (LIF\_TAF, figure 3.b).
- La teneur en oxygène (O) varie entre  $29,085 \pm 0,501\%$  (LIF\_AZ, figure 3.c) et  $43,263 \pm 0,445\%$  (SAQ\_TAN, figure 3.c), elle est estimée en moyenne à  $40,361\%$  (AD\_DB, figure 3.e)

L'analyse de variance ANOVA de la composition élémentaire (figure 5), révèle que cette dernière ne connaît une variabilité importante. Une exception est constaté pour près de 60 % de la partie Lif dont la teneur en CHO est beaucoup plus faible par rapport aux autres sous-produits phoenicicoles étudiés et aux biocombustibles solides cités dans la biographie [1, 6]. Cela signifie que le Fibrilium a une faible densité énergétique qui est confirmée ultérieurement par les valeurs du pouvoir calorifique (HHV) [10, 11]

D'autre part, les valeurs maximales du carbone, estimées entre 45 et 48%, sont attribuées à la partie inflorescence (spathe et pédoncule du régime) des cultivars étudiés.

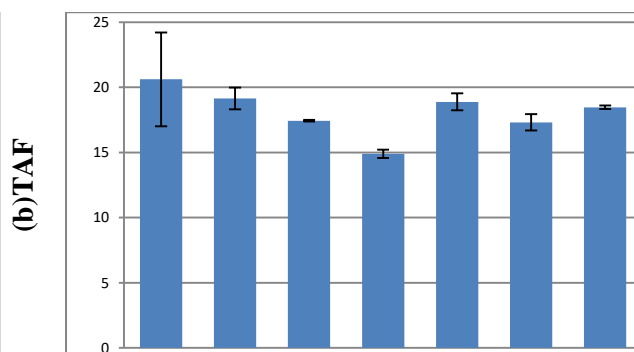
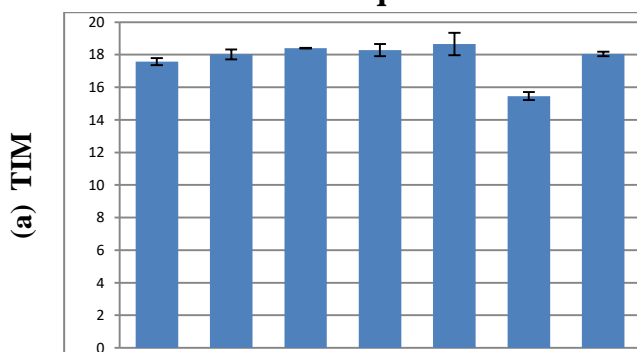
En tenant en considération les différents sous-produits de chaque cultivars, nous pouvons dire La teneur en hydrogène et en oxygène connaissent la même tendance ; elles sont basses pour les parties fibrilium et relativement élevée pour les parties inflorescences (régimes et spathes).

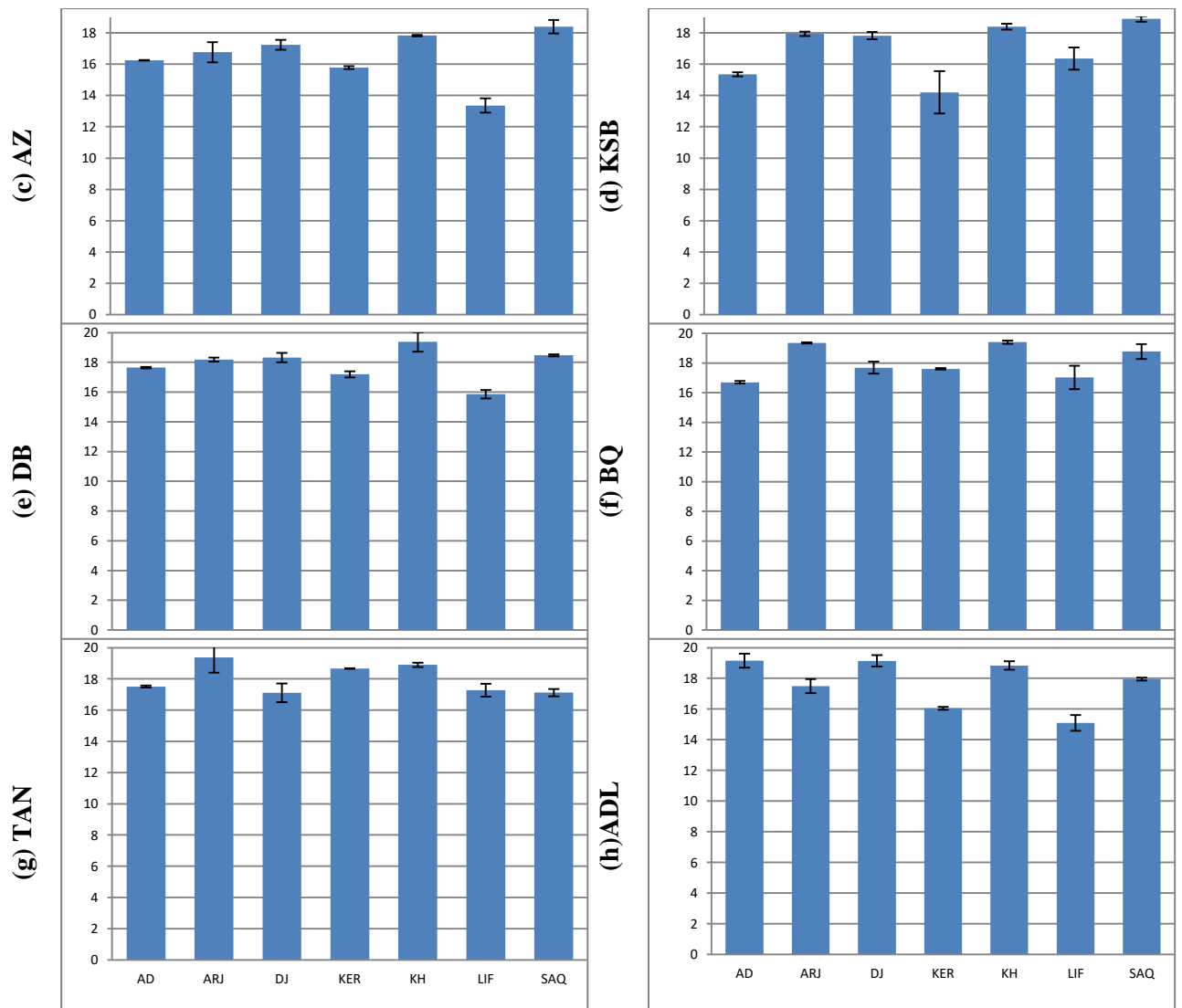
Une comparaison générale des différents déchets étudiés, en tenant en considération la composition élémentaire et du caractère variétal, nous conduit à la classification suivante :

- C\_DB(43,149%) < C\_BQ(43,546%) < C\_AZ(43,616%) < C\_ADL(43,709%) < C\_TAF(43,946 %) < C\_TAN(44,724 %) < C\_KSB(44,918%) < C\_TIM(45,195 %)
- H\_AZ(5,241 %) < H\_DB(5,421%) < H\_BQ(5,438%) < H\_KSB(5,465%) < H\_TAF(5,460 %) < H\_ADL(5,501%) < H\_TAN(5,545%) < H\_TIM(5,567%)
- O\_AZ(38,315%)<O\_KSB(40,159%)<O\_DB(40,361%)<O\_BQ(40,393%)<O\_TAF(40,468 %) < O\_ADL(40,991%)<O\_TIM(41,126%)<O\_TAN(41,071%)

Sur le plan variétal, Cette classification nous amène à dire que le cultivar DB dispose d'une composition élémentaire basse par rapport aux autres cultivars. Ce qui implique que son potentiel énergétique pourrait être moins important que celui des autres cultivars. La variété TIM connaît une tendance inverse, sa composition élémentaire est élevée par rapport aux autres cultivars, ce qui signifie que son potentiel calorifique est également important.

### 3.3 Pouvoir calorifique





**Figure 4 : Pouvoir calorifique HHV (MJ /Kg) de la biomasse phoenicicole**

La figure 4 donne une observation générale du pouvoir calorifique des principaux déchets des cultivars étudiés dans l'oasis de Guerrara. Une observation générale de la figure 4 associée à l'analyse de variance ANOVA (tableau 5) du pouvoir calorifique de l'ensemble des sous-produits phoenicicoles montre qu'il n'y a pas une variation significative de ce paramètre entre les différents déchets phoenicicoles ( $p$ -value > 5% seuil de significativité), à l'exception du sous-produit fibrilium, qui se distingue de l'ensemble.

De manière générale, le pouvoir calorifique (HHV) des sous-produits des cultivars étudiés varie entre  $(13,358 \pm 0,250)$  MJ/kg (LIF\_AZ, figure 4.c) et  $(20,603 \pm 0,688)$  MJ/kg (AD\_TAF, figure 4.b). La valeur moyenne est estimée à  $(17,191 \pm 0,200)$  MJ/kg (KER\_DB, figure 4.e). Une comparaison du pouvoir calorifique des cultivars étudiés, donne la classification suivante :  $HHV\_AZ (16,515 \text{ MJ/kg}) < HHV\_KSB (16,993 \text{ MJ/kg}) < HHV\_ADL (17,672 \text{ MJ/kg}) <$



HHV\_TIM (17,776 MJ/kg) < HHV\_DB (17,863 MJ/kg) < HHV\_TAN (17,993 MJ/kg) < HHV\_BQ (18,082 MJ/kg) < HHV\_TAF (18,102 MJ/kg).

En se basant sur cette entité thermique qui ne connaît pas une variabilité significative, nous pouvons dire que : les cultivars TAF, BQ et TAN sont les favoris pour une thermoconversion. Cette catégorie est suivie par les variétés DB, TIM et ADL. Enfin, les cultivars AZ et KSB sont les moins intéressants pour de telle valorisation.

**Tableau 5 : Analyse de la variance ANOVA de la composition immédiate, élémentaire et du pouvoir calorifique de la biomasse phoenicicole**

		<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>Degré de liberté</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité é</i>
<b>Composition immédiate</b>	<b>VM</b>	Entre Groupes	508,69	7	72,67	1,89	9%
		A l'intérieur des	1844,85	48	38,43		
		Total	2353,54	55			
	<b>A</b>	Entre Groupes	107,77	7	15,40	0,51	82%
		A l'intérieur des	1439,23	48	29,98		
		Total	1547,00	55			
	<b>FC</b>	Entre Groupes	328,23	7	46,89	2,67	2%
		A l'intérieur des	843,08	48	17,56		
		Total	1171,32	55			
<b>Composition élémentaire</b>	<b>C</b>	Entre Groupes	27,16	7	3,88	0,51	82%
		A l'intérieur des	362,11	48	7,54		
		Total	389,27	55			
	<b>H</b>	Entre Groupes	0,49	7	0,07	0,63	73%
		A l'intérieur des	5,35	48	0,11		
		Total	5,84	55			
	<b>O</b>	Entre Groupes	40,08	7	5,73	0,87	54%
		A l'intérieur des	315,22	48	6,57		
		Total	355,30	55			
	<b>HHV</b>	Entre Groupes	16,00	7	2,29	1,14	35%
		A l'intérieur des	96,27	48	2,01		
		Total	112,26	55			

Remarque : F est le facteur de

La partie LIF apparaît comme la moins intéressante énergétiquement pour l'ensemble des cultivars étudiés en raison des faibles valeurs du pouvoir calorifique obtenus (figure 4) alors que pour plus de 60 % des cultivars analysés, la partie spathe se présente comme favorite pour une valorisation énergétique. Rappelons que le pouvoir calorifique, dépend de la teneur en cendre, et en humidité, c'est ce qui explique les valeurs extrêmes remarquées notamment pour les parties Fibrilium où des teneurs élevées en cendre ont été enregistrées (cf. tableau 6). Ces

cenres peuvent inhiber la réactivité thermique de la biomasse. Inversement, les faibles teneurs en cenres observées pour les spathes expliqueraient leur réactivité thermique [1] .

**Tableau 6 : Corrélation entre les paramètres de composition immédiate et le pouvoir calorifique**

	<i>M %</i>	<i>VM %</i>	<i>A %</i>	<i>HHV (MJ/Kg)</i>
<i>M %</i>	1,000			
<i>VM %</i>	0,078	1,000		
<i>A %</i>	0,064	<b>-0,715</b>	1,000	
<i>HHV (MJ/Kg)</i>	-0,259	0,615	<b>-0,646</b>	1,000

### 3.4 Classification de la biomasse phoenicicole

L'analyse de la composante principale (ACP) est la méthode statistique utilisée pour la classification de la biomasse phoenicicole étudiée. Le tableau 7 représente les valeurs propres calculées en tenant en considération les variables expérimentales correspondant à la composition immédiate et le pouvoir calorifique. Le choix de ces variables a permis de fournir 93,288% des informations des données dans un système à trois dimensions : 58,316% de l'information par l'axe 1, 26,776% par l'axe 2 et 8,196% de l'information par l'axe 3.

**Tableau 7 : Valeurs propres**

<i>N° de valeur</i>	<i>Valeurs propres</i>	<i>Variance total accumulé %</i>	<i>Valeur propre accumulée</i>	<i>Accumulation %</i>
1	2,333	58,316	2,333	58,316
2	1,071	26,776	3,404	<b>85,093</b>
3	0,328	8,196	3,732	<b>93,288</b>
4	0,268	6,712	4,000	100,000

Le tableau 8 et la figure 5 (a et b) montrent que :

- La 1<sup>ère</sup> composante représente les variables VM, A, CHO et HHV
- La 2<sup>ème</sup> composante représente la variable FC
- La 3<sup>ème</sup> composante représente la variable M

Tableau 8 : Coordonnées factorielles des variables

<i>Variable</i>	<i>Facteur1</i>	<i>Facteur2</i>	<i>Facteur3</i>	<i>Facteur4</i>
M %	-0,160	<b>-0,970</b>	0,156	0,100
VM %	<b>0,870</b>	-0,282	-0,106	-0,390
A %	<b>-0,894</b>	0,098	0,303	-0,314
HHV	<b>0,866</b>	0,205	<b>0,448</b>	0,086

Le tableau 9 et les figures 6 (a et b) correspondent aux projections des individus sur les deux plans 1x2 et 1x3 montrant que :

- Le 1<sup>er</sup> groupe comporte les individus suivants : les fibrilliums des huit cultivars étudiés, KER\_KSB et KER\_AZ ainsi que tous les DJ à part DJ\_ADL.
- Le 2<sup>e</sup> groupe comporte les individus suivants : les spathes des huit cultivars étudiés, les SAQ de tous les cultivars à l'exception de SAQ\_DB ; les régimes de tous les cultivars à l'exception de ARJ\_ADL ; les rachis des quatre cultivars (TIM, TAF, DB et ADL) enfin KER\_TIM et DJ\_ADL.
- Le 3<sup>e</sup> groupe comporte les individus suivants : les pétioles des cinq cultivars (DB, BQ, TAN, ADL et TAF) ; les rachis des quatre cultivars (AZ, KSB, BQ et TAN) enfin SAQ\_DB et ARJ\_ADL.

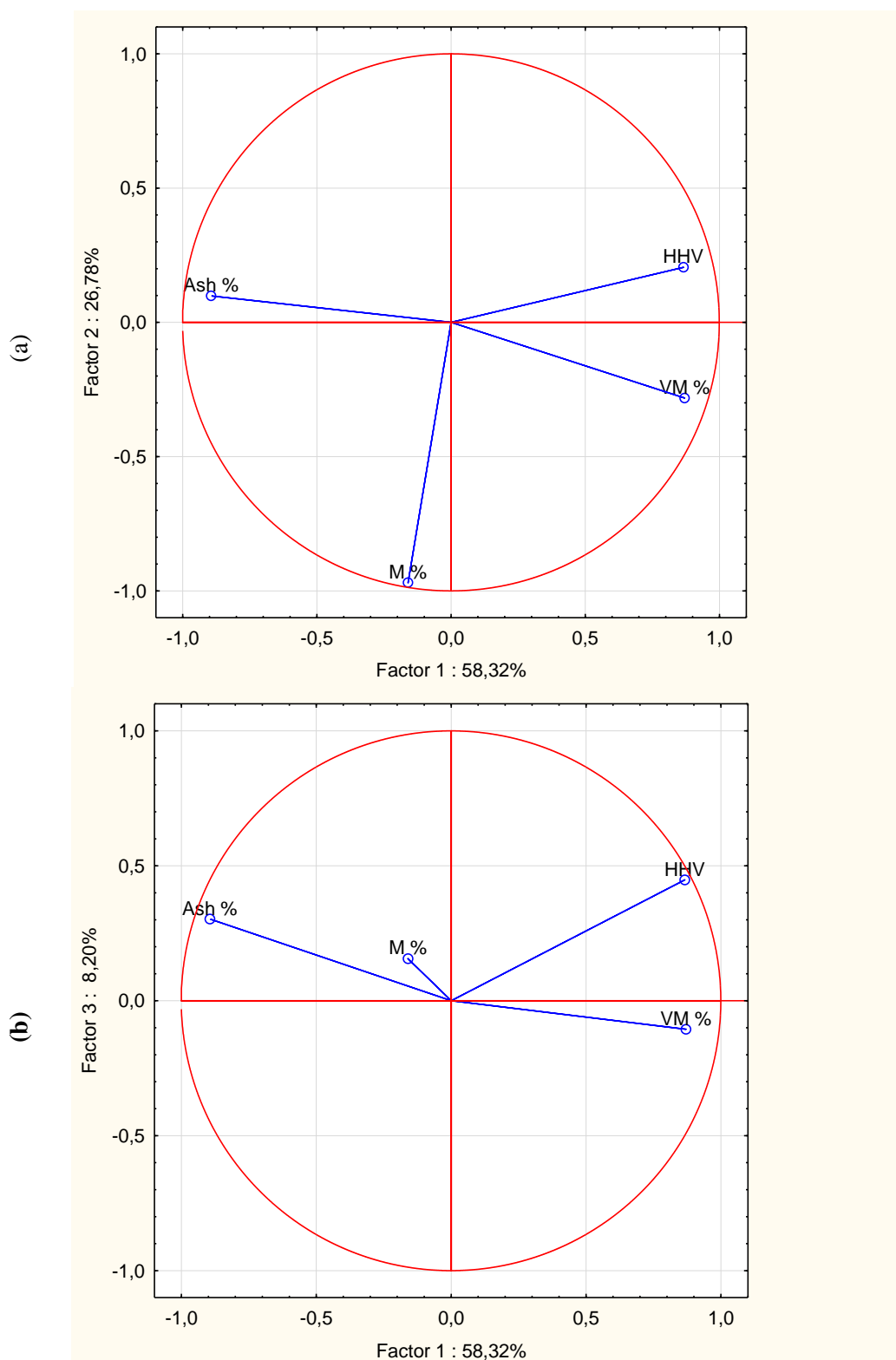


Figure 5 : Projection des variables sur les plans (1 x 2) (a) et (1 x 3) (b)

Tableau 9 : Coordonnées factorielles des sous-produits phénoliques

<i>Individus</i>	<i>Facteur 1</i>	<i>Facteur 2</i>	<i>Facteur 3</i>	<i>Facteur 4</i>
AD_TIM	1,172	0,719	<b>-1,011</b>	-0,321
ARJ_TIM	1,260	0,311	-0,496	-0,655
DJ_TIM	-0,239	1,004	0,663	-0,245
KER_TIM	1,326	-0,783	-0,171	-0,024
KH_TIM	0,556	0,171	0,300	0,826
LIF_TIM	<b>-1,859</b>	0,011	-0,702	0,499
SAQ_TIM	0,589	0,682	-0,298	0,368
AD_TAF	1,203	-0,104	1,763	0,272
ARJ_TAF	1,195	0,918	0,161	0,461
DJ_TAF	-1,119	1,270	0,421	-0,495
KER_TAF	<b>-2,237</b>	<b>-2,330</b>	-0,217	-0,109
KH_TAF	1,293	-0,024	0,191	0,015
LIF_TAF	-0,191	-0,324	-0,071	0,027
SAQ_TAF	1,532	0,463	-0,412	-0,300
AD_AZ	-0,276	-0,903	-0,725	-0,389
ARJ_AZ	0,352	0,583	-1,075	-0,460
DJ_AZ	-1,215	0,964	0,253	0,188
KER_AZ	<b>-2,069</b>	-0,460	-0,211	0,831
KH_AZ	-0,026	1,173	-0,332	<b>1,115</b>
LIF_AZ	<b>-6,301</b>	<b>2,026</b>	0,300	-0,298
SAQ_AZ	0,503	<b>2,031</b>	-0,344	0,705
AD_KSB	-1,406	-1,295	-0,618	-0,349
ARJ_KSB	1,109	0,738	-0,645	-0,313
DJ_KSB	-0,579	-0,011	0,324	1,300
KER_KSB	<b>-2,998</b>	-0,930	-0,871	1,026
KH_KSB	1,168	0,231	-0,264	0,237
LIF_KSB	-1,164	0,075	-0,240	-0,307
SAQ_KSB	1,172	0,831	0,005	0,311
AD_DB	0,043	-0,168	0,103	-0,358
ARJ_DB	1,190	1,017	-0,555	-0,290
DJ_DB	-0,559	1,439	0,782	-0,572
KER_DB	-0,127	<b>-2,366</b>	0,253	0,237
KH_DB	0,983	0,333	0,660	0,523
LIF_DB	<b>-1,981</b>	-0,816	0,182	-0,574
SAQ_DB	1,165	-1,857	0,493	-0,519
AD_BQ	-0,749	-1,188	0,066	-0,215
ARJ_BQ	<b>1,918</b>	0,711	0,036	-0,251
DJ_BQ	-0,460	0,001	0,586	<b>-0,944</b>
KER_BQ	0,466	-1,283	0,059	-0,396
KH_BQ	1,194	0,521	0,503	0,455
LIF_BQ	<b>-2,316</b>	0,696	<b>1,010</b>	-0,178
SAQ_BQ	1,494	0,673	-0,340	0,550
AD_TAN	0,682	-1,052	-0,317	-0,076
ARJ_TAN	1,298	0,647	0,386	0,345
DJ_TAN	-1,407	0,827	0,496	-0,685
KER_TAN	0,713	-1,840	0,749	0,628
KH_TAN	1,561	-0,600	0,239	-0,365
LIF_TAN	-1,001	-0,328	0,341	0,740
SAQ_TAN	1,042	0,116	<b>-1,233</b>	-0,026
AD_ADL	<b>1,824</b>	-0,105	0,212	-0,682
ARJ_ADL	0,381	<b>-2,529</b>	0,218	0,161
DJ_ADL	0,618	0,218	<b>0,994</b>	-0,660
KER_ADL	-1,032	-1,220	-0,348	-0,032
KH_ADL	1,351	0,312	-0,035	0,270
LIF_ADL	<b>-2,187</b>	0,563	-0,705	-0,561
SAQ_ADL	1,143	0,238	-0,510	-0,442

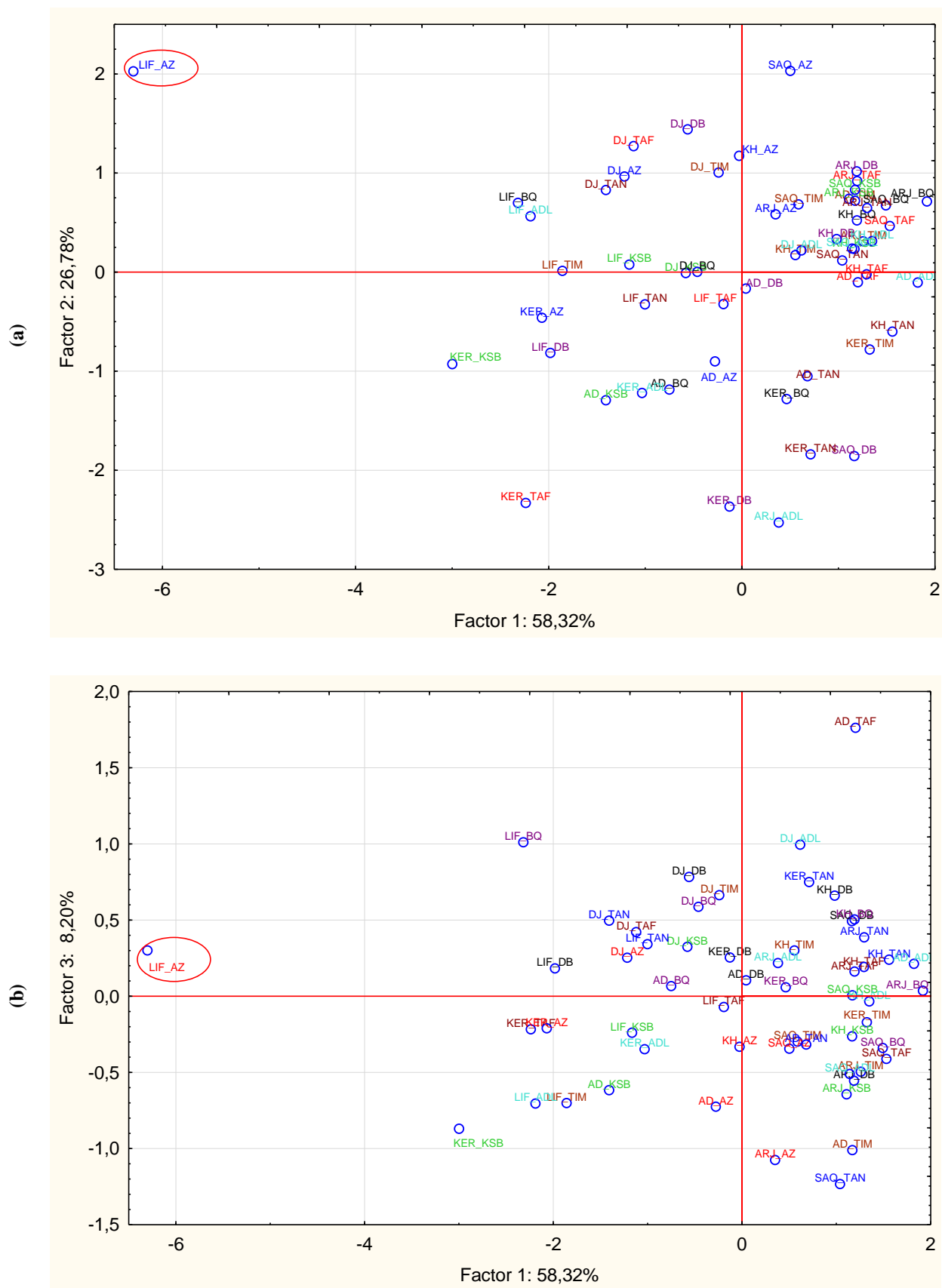
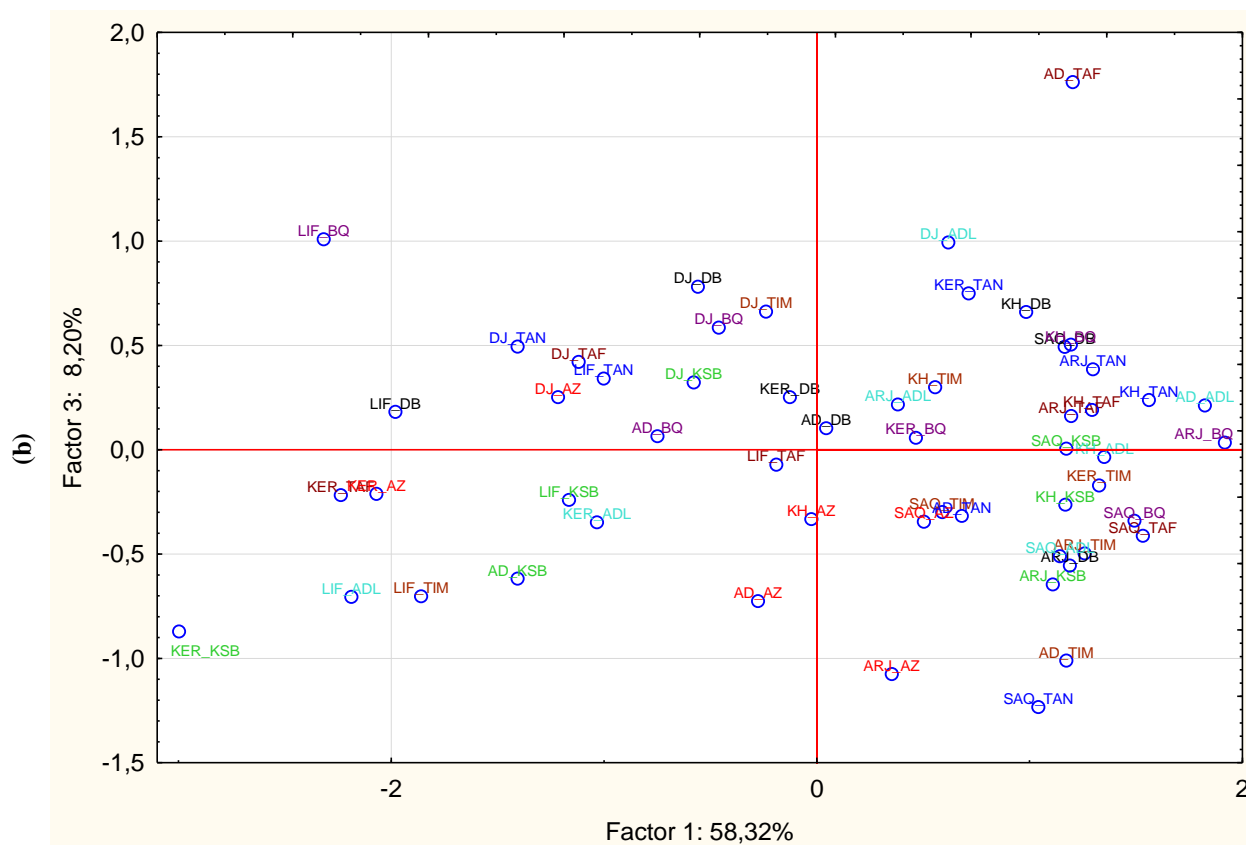


Figure 6 : Projection des cas sur les plans (1 x 2) (a) et (1 x 3) (b) avec LIF\_AZ



**Figure 7 : Projection des cas sur les plans (1 x 2) (a) et (1 x 3) (b) sans LIF\_AZ****Identification des groupes**

La classification de 56 échantillons de biomasse phoenicicole correspondant aux principaux sous-produits des huit cultivars étudiés, a été réalisée par l'analyse de la composante principale (ACP) et illustré dans le Tableau 10 et les Figure 6 et 7. Cette classification a permis d'identifier les trois groupes suivants :

**Tableau 10 : Classification de la biomasse phoenicicole**

	%	VAR	M %	VM %	A %	FC %	HHV	C %	H %	O %	Cel	Hem	Lig	C/H
Gr1	30%	MOY	6,271	67,630	15,501	16,869	16,525	41,517	5,070	37,320	40,027	16,953	21,953	8,191
		MIN	4,949	48,631	7,969	7,599	13,358	34,568	4,031	29,085	29,700	8,100	11,600	7,715
		MAX	7,732	76,841	31,839	26,362	18,318	46,670	5,446	40,286	50,600	28,900	31,900	8,644
Gr2	50%	MOY	5,972	79,759	5,841	14,400	18,654	45,463	5,694	42,343	30,938	43,488	14,050	7,982
		MIN	5,465	76,134	2,425	8,771	17,117	41,401	5,333	40,100	26,000	23,300	11,600	7,731
		MAX	6,844	84,703	12,553	20,894	19,372	48,199	5,848	43,263	39,800	54,500	19,400	8,252
Gr3	20%	MOY	8,169	77,201	9,525	13,274	16,924	43,582	5,477	40,783	34,655	34,464	15,545	7,959
		MIN	7,090	71,222	6,156	7,825	14,884	41,206	5,134	38,101	26,000	28,900	12,000	7,694
		MAX	9,235	84,226	14,963	17,061	18,667	45,698	5,678	42,470	39,800	54,500	18,200	8,112

**Groupe 1 :**

Le premier groupe représente 30% de la biomasse étudiée. Il est constitué essentiellement des parties Lifs et palmes (DJ) des huit cultivars étudiés. La composition immédiate de ce groupe est caractérisée par une faible teneur en matières volatiles (~ 67%), une teneur élevée en cendres qui peut atteindre 31% et également une teneur élevée en carbone fixe (atteignant 26%) (cf. tableau 10 et figure 8).

Sur le plan énergétique, cette catégorie dispose d'un faible pouvoir calorifique (16 MJ/kg en moyenne) qui est dû à plusieurs facteurs : la faible composition élémentaire CHO, la teneur élevée en cendres (>15%) et la teneur élevée en lignine notamment pour le fibrilium qui atteint les 31%.

Ces éléments montrent que le premier groupe dispose stabilité thermique qui le distingue des autres catégories.



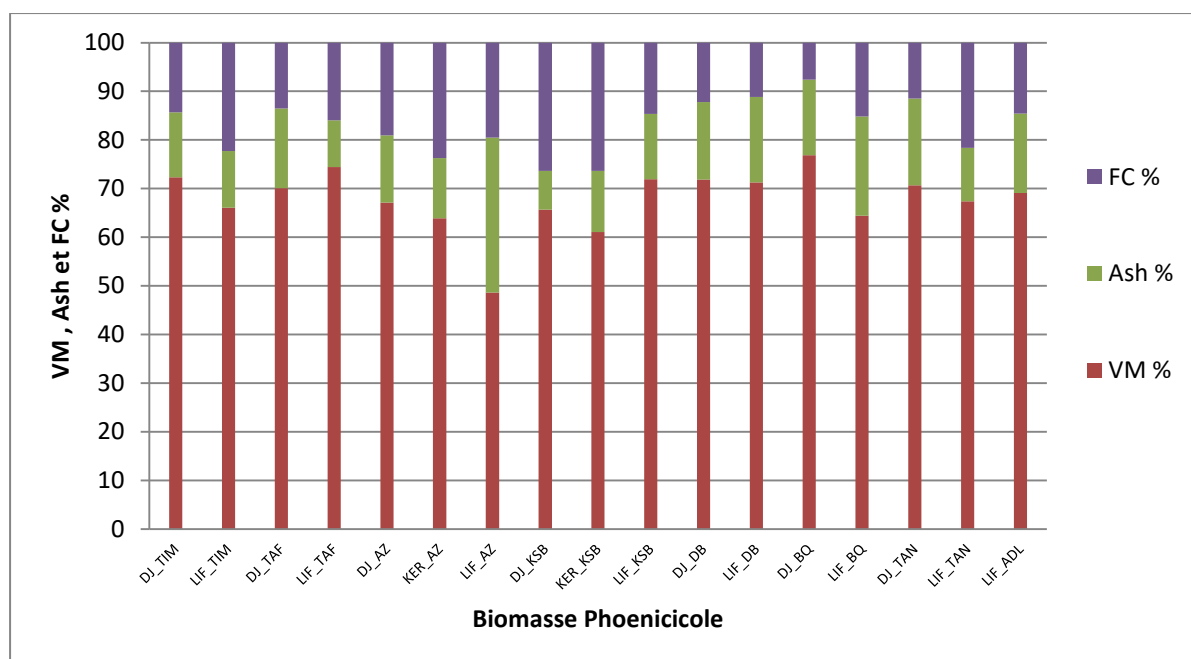


Figure 8 : Composition immédiate de 1<sup>er</sup> groupe

## Groupe 2 :

Le deuxième groupe représente la proportion la plus importante de la biomasse étudiée (50%). Il représente les différentes parties de l'inflorescence (spathe et pédoncule du régime), des pétioles et des rachis correspondant aux cultivars étudiés. La composition immédiate de ce groupe se distingue par une teneur élevée en matières volatiles (~80%), une faible teneur en cendres qui avoisine 5% et une teneur moyenne en carbone fixe (~15%) (cf. tableau 10 et figure 9).

Sur le plan énergétique, cette catégorie dispose d'un pouvoir calorifique élevée par rapport au premier groupe, qui atteint 19 MJ/kg en moyenne. Ceci s'explique par une composition élémentaire CHO forte, une teneur faible en matières minérales (< 7%) et la teneur élevée en hémicellulose. C'est précisément le cas de la partie régime où ce composant atteint 54%.

Ces propriétés confèrent à ce groupe une réactivité thermique intéressante et pourrait le placer comme favorite pour une éventuelle thermoconversion.

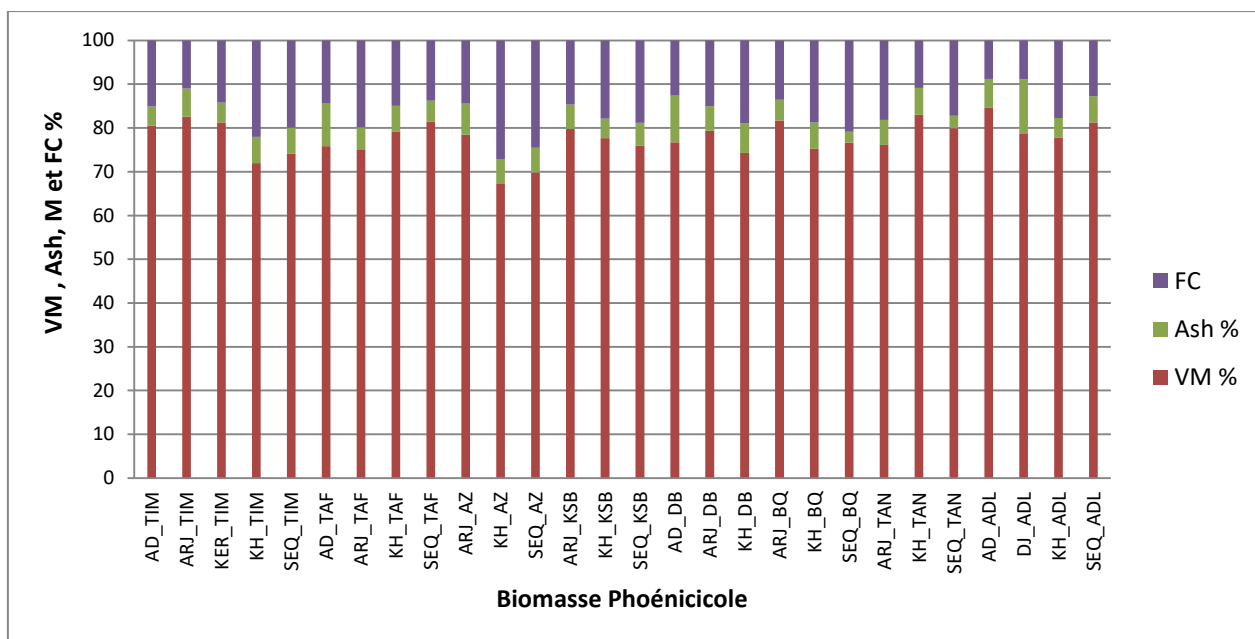


Figure 9 : Composition immédiate de 2<sup>e</sup> groupe

### Groupe 3 :

Le troisième groupe représente 20% de la biomasse étudiée. Il est principalement constitué de la partie palme (pétiole et rachis) de biomasse phoenicicole considérée. Contrairement aux précédents groupes, ce dernier dispose d'une composition immédiate intermédiaire, caractérisée par une teneur modérément élevée en matières volatiles, qui est d'environ (77%), une teneur moyenne en cendres estimée à 9,5 % et une faible teneur en carbone fixe (13%) (cf. tableau 10 et figure 10).

Sur le plan thermique, cette catégorie dispose d'un pouvoir calorifique moyen (~17 MJ/kg) qui s'explique par une composition intermédiaire en cellulose et hémicellulose.

Par ailleurs la composition élémentaire de ce groupe est compatible à celle des biocombustibles solides conventionnels.

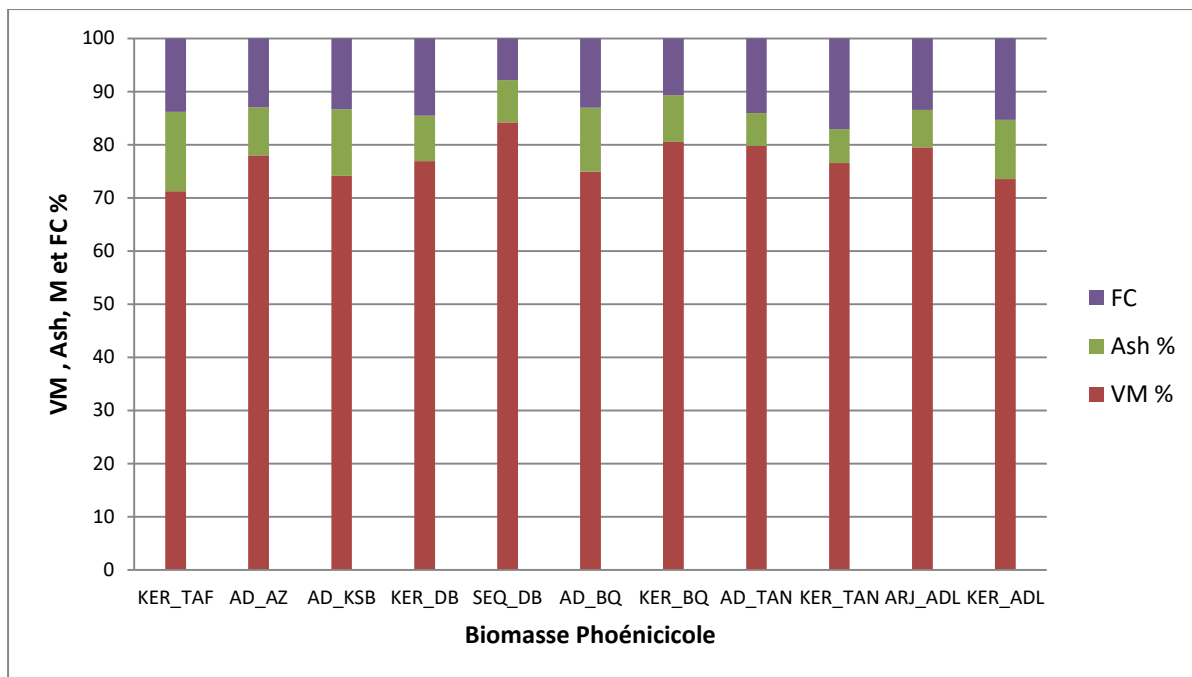


Figure 10 : Composition immédiate de 3<sup>e</sup> groupe

#### 4. Références:

1. Bousdira, K., L.h. Nouri, and J. Legrand, *Chemical Characterization of Phoenicicole Biomass Fuel in Algerian Oasis: Deglet Nour and Ghars Cultivars Case*. Energy & Fuels, 2014. 28(12): p. 7483-7493.
2. Bousdira, K., et al., *Kinetic pyrolysis study and classification of date palm biomass*. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2017. 9(1): p. 013102.
3. ASTM, *Standard test method for chemical analysis of wood charcoal*, in D 1762-84. 2007.
4. Parikh, J., S. Channiwala, and G. Ghosal, *A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels*. Fuel, 2005. 84(5): p. 487-494.
5. Jolliffe, I.T., *Principal component analysis*,. Springer, ed. S. Edition.
6. Vassilev, S.V., et al., *An overview of the chemical composition of biomass*. Fuel, 2010. 89(5): p. 913-933.
7. El may, Y., et al., *Study on the thermal behavior of different date palm residues: Characterization and devolatilization kinetics under inert and oxidative atmospheres*. Energy, 2012. 44(1): p. 702-709.
8. García, R., et al., *Spanish biofuels heating value estimation. Part II: Proximate analysis data*. Fuel, 2014. 117, Part B: p. 1139-1147.
9. Nordin, A., *Chemical elemental characteristics of biomass fuels*. Biomass and Bioenergy, 1994. 6(5): p. 339-347.
10. Parikh, J., S.A. Channiwala, and G.K. Ghosal, *A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials*. Fuel, 2007. 86(12–13): p. 1710-1719.
11. Özyuğuran, A. and S. Yaman, *Prediction of Calorific Value of Biomass from Proximate Analysis*. Energy Procedia, 2017. 107: p. 130-136.

## Conclusion générale

Cette étude nous permis l'évaluation de la qualité énergétique des principaux sous-produits du palmier dattier (*phoenix dactylifera L.*), des huit cultivars les plus dominants de l'oasis de Guerrara (Timjahart, Tafiziouine, Azarza, Ksebba, Degla Beïda, Bent Qbala, Tanaslit et Addala), en se basant sur la réalisation des analyses immédiates (humidité, cendre, matière volatile et carbone fixe), la mesure du pouvoir calorifique ainsi que la détermination de la composition élémentaire.

Ce travail nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les déchets phoenicicoles étudiés renferment de faibles teneurs en humidité (6.4% en moyenne), ce qui favorise une thermoconversion sans traitement préliminaire.
- Globalement, la teneur en matières volatiles des sous-produits du palmier étudiés est élevée (~75%) en comparaison avec les biocombustibles solides conventionnels, ce qui traduit une réactivité thermique intéressante. Malgré le peu d'écart que connaît ce paramètre entre les cultivars, la variété Addala apparait comme la plus attractive en raison de sa valeur élevée en matières volatiles contrairement au le cultivar Azerza qui connaît une tendance inverse.
- Les sous-produits phoenicicoles étudiés ont une teneur élevée en cendres (9% en moyenne), ce qui constitue un critère limitant pour une éventuelle valorisation énergétique. C'est précisément le cas des cultivars Azerza et Degla Beyda ainsi que les sous-produits fibrilium et les palmes. A l'opposé de ces déchets, l'inflorescence renferme les plus faibles teneurs en cendres.
- Le pouvoir calorifique de l'ensemble des sous-produits phoenicicoles étudiés apparait comme très avantageux (moyenne de 17MJ/kg) en comparaison avec les biocombustibles solides cités dans la littérature, c'est précisément le cas des cultivars Tafiziouin, Bent Qbala et Taneslit. Les variétés Azerza et Kseba sont les moins intéressantes (relativement) sur le plan thermique.
- La composition élémentaire s'avère également intéressante pour l'ensemble des sous-produits étudiés à l'exception du fibrilium dont CHO sont largement en deçà des valeurs trouvées.

- 
- Les cendres ont un effet capital sur la qualité énergétique de la biomasse en général, et les sous-produits phoenicoles en particulier. En effet, deux corrélations majeures (négatives) ont été établies : celle avec le pouvoir calorifique et les matières volatiles.

Par ailleurs, une classification de la biomasse phoenicole étudiée en se basant sur le pouvoir calorifique et la composition immédiate a abouti sur l'identification de trois groupes. Le premier, constitué de la partie fibrilium et la palme (DJ), est caractérisé par une faible réactivité thermique due à une teneur élevée en cendre et en lignine. Le second correspond à la partie inflorescence, pétiole et rachis. Ce groupe dispose d'une réactivité thermique très intéressante qui favorise une éventuelle thermoconversion. Enfin le dernier groupe constitué des parties palme (pétiole et rachis), a des caractéristiques thermochimiques intermédiaires.

Aussi, nos recommandations sont les suivantes :

- Une étude plus fiable de la biomasse considérée exige la considération d'un éventail d'échantillon important, en tenant compte de plusieurs paramètres : l'âge du palmier, l'état d'entretien des pieds, les conditions pédoclimatiques
- La composition immédiate et HHV sont des éléments nécessaires mais pas suffisants pour l'évaluation de la qualité énergétique de notre biomasse, des analyses complémentaires (analyses élémentaires, analyses des cendres, analyses physiques et thermiques) permettraient une meilleure appréciation de cet aspect

Cette étude pourrait être complétée par la mesure expérimentale de la quantité de carbone et d'hydrogène libérée, et de la comparer avec les résultats calculés ce qui aboutirait sur une évaluation de l'énergie à travers les gaz nation libérées par la combustion.

Cette valorisation énergétique des déchets retenus pour cette étude permet d'effectuer le même travail appliqué à d'autres déchets (noyaux) du palmier dattier, par l'évaluation de leur qualité énergétique.

---

Une évaluation de la valeur énergétique des huiles des déchets du palmier dattier reste à déterminer en vue d'une valorisation énergétique.

## Résumé :

La valorisation et la préservation de la biomasse oasisienne contribuent sensiblement au développement des espaces oasiens. Le caractère hétérogène de cette ressource renouvelable, son volume, sa disponibilité et sa dispersion géographique rend sa valorisation difficile dans ces écosystèmes fragiles. Ainsi l'objectif de cette étude est l'évaluation précise de la qualité énergétique de ce gisement spécifique. Ceci constitue l'une des premières démarches pour une valorisation optimale et intégrée. L'approche utilisée dans l'étude proposée repose sur :

- La caractérisation chimique et thermique de la biomasse (immédiate, minérale et élémentaire) en considérant l'aspect variétal.
- Un traitement statistique préliminaire des données (ANOVA...) constituées par une centaine d'éléments et complété par d'autres analyses (ACP...) afin d'obtenir une classification de la biomasse étudiée en considérant les paramètres les plus significatifs.

Les caractéristiques chimiques et thermiques de biomasse phoenicicole étudiée s'avèrent intéressantes néanmoins la composition minérale constitue un paramètre limitant car elle dépasse la limite admise par les standards internationaux même si des mesures d'atténuation existent.

**Mots clés :** Caractérisation chimique et énergétique –Biomasse phoenicicole –classification - analyses statistiques

## المخلص :

الحفاظ على الكتلة الحيوية الواحاتية وتقييمها يساهم بشكل كبير في تطوير مناطق الواحات. أما عدم تجانس هادا المورد المتجدد، من حيث الحجم، والوفرة والتنشئت الجغرافي يؤدي الى صعوبة التقييم في هذه النظم الإيكولوجية الهشة وهكذا فإن الهدف من هذه الدراسة هو التقييم الدقيق لنوعية الطاقوية لهذا المنجم المتجدد . وبالتالي فهذه واحدة من أولى الخطوات لتقييم متكامل وأمثل ويستند النهج المتبع في الدراسة المقترحة على:

- الخصائص الكيميائية والحرارية للكتلة الحيوية (الرطوبة والمعادن والعناصر الكيميائية) لجميع الاصناف المدروسة .
- معالجة البيانات الإحصائية الأولية بواسطة: (تحليل التباين) يتكون من منات العناصر وباستكمال تحليلات أخرى (تحليل المكون الرئيسي...) للحصول على اصناف الكتلة الحيوية المصممة والنظر في المعايير الأكثر أهمية.

وقد اثبتت الخصائص الكيميائية والحرارية للكتلة الحيوية المدروسة لنخيل انها مثيرة للاهتمام لتشكيلها عامل حاد ولكن يتجاوز الحد المسموح به وفقا للمعايير الدولية رغم وجود اجراءات للتخفيف من حدتها.

الكلمات الدالة: الخصائص الكيميائية و الطاقوية –الكتلة الحيوية للنخيل –التصنيف –التحليل الاحصائي

## Summary:

The valorization and preservation of oasis biomass contribute significantly to the development of oasis areas. The heterogeneous nature of this renewable resource, its volume, its availability and its geographical dispersion make it difficult to exploit these fragile ecosystems. Thus the objective of this study is the precise evaluation of the energy quality of this specific deposit. This is one of the first steps towards optimal and integrated valuation.

The approach used in the proposed study is based on:

- Chemical and thermal characterization of biomass (immediate, mineral and elementary) by considering the varietal aspect. A preliminary statistical treatment of the data (ANOVA ...) made up of a hundred elements and complemented by other analyzes (ACP ...) in order to obtain a classification of the biomass studied considering the most significant parameters.

The chemical and thermal characteristics of the phoenicicole biomass studied prove to be an interesting one. Nevertheless the mineral composition is a limiting parameter because it exceeds the limit allowed by the international standards even if mitigation measures exist.

**Key words:** Chemical and energetic characterization - phoenicicole biomass -classification and statistical analyzes