

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE



CENTRE UNIVERSITAIRE DE TISSEMSILT  
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme

De master académique en

Pétrochimie et raffinage

Visa du chef de département des

Science et technologies

Signature

Date

**Etude sur la production d'hydrogène à partir  
de la biomasse**

Encadreur : Mr.Aisset Miloud

Réalisé par :

Signature

Mlle. Ait Abdelkader Sarah

date 15/07/2019

Mr. SahedAbdelGhani

**Membre du jury**

**Mr.Aisset Miloud      MAA      Encadreur      centre universitaire de Tissemsilt**

**Mr. Kaas Sid Ahmed      MAA      Examineurcentre universitaire de Tissemsilt**

**Dr. Chellali Rachid      MCB      Président      centre universitaire de Tissemsilt**

**Année universitaire 2018/2019**

## ***Remerciement***

*On remercie dieu tout puissant de nous avoir donné la force, le courage, la santé et les moyens afin d'accomplir mon travail.*

*On tient à exprimer notre gratitude à tous ceux qui, de près ou de loin, nous a accompagnées et soutenus tout au long de ce travail.*

*On sera toujours infiniment reconnaissants envers celui qui nous a donné l'occasion de faire ce mémoire, notre cher promoteur Mr. **AISSET MILOUD** , qui nous 'a beaucoup aidé , nous 'a soutenu moralement , toujours accordé un soutien sans failles et encourager dans la rédaction de ce mémoire , qui a suivi ce travail avec beaucoup d'intérêt .et pour avoir consacré l'attention indispensable à l'amélioration de notre mémoire ,nos discussions avec lui ont été très enrichissantes pour nous , on le remercie très sincèrement par la confiance et l'intérêt qu'il nous 'a témoignée.*

*Merci infiniment aux jurys qu'on estime beaucoup, autant pour leurs qualités humaines bien connues, qu'a leurs compétences scientifiques, on les remercie pour avoir accepté avec gentillesse de faire partie de ce jury.*

*On adresse également nos profonds remerciements et toute notre reconnaissance à tous les enseignants du département de sciences et technologies notamment les enseignants de la pétrochimie et raffinage du pétrole ainsi que tout le personnel du département.*

# *Dédicace*

## *A mon très cher père*

*J'ai toujours trouvé auprès de toi, compréhension et soutien. Tes prières et tes conseils ne m'ont jamais fait défaut tout au long de mes études. Trouve à travers ce modeste travail, la récompense de ton affection, de tes sacrifices et de ta patience.*

### *Ma très chère maman Nacira « mamati »*

*Si les parents doivent regretter quelque chose un jour, c'est de n'avoir pas assez fait pour l'éducation de leurs enfants ; les enfants de n'avoir pas assez aimé leurs parents. Maman, je n'oublierai jamais tes sages conseils prodigués à mon endroit. C'est toi qui disais qu'on ne remercie pas ses parents. Seulement, je ne trouve pas aujourd'hui un moyen d'éviter de te remercier pour tout ce que tu as fait pour nous. Ton souci primordial a toujours été la réussite de tes enfants. Que tes sacrifices, des peines et tes privations trouvent leurs récompenses dans l'aboutissement de ce modeste travail.*

*A mes très chers frangins (**amine et islam**) que je les aime beaucoup, je vous adresse mes vifs remerciements pour votre soutien, amour et encouragement.*

*A ma précieuse et unique sœur (**nesrine**) pour les souvenirs, les moments que nous avons passés ensemble pour ton précieux soutien moral. Pour ton aide dans ce travail malgré que t'es loin de moi*

*A ma très chère **Mani** que dieu vous protège pour nous*

*A la mémoire de mes grands parents*

*A mes oncles et tantes, cousins et cousines : reconnaissance infinie.*

*A le plus sympa dans ma vie que j'aime trop Hocine*

*A mon très cher mon binôme **Abdo**, continuons dans la voie de la consolidation de nos liens d'amitié et de fraternité gardons toujours l'esprit frère et sœur.*

*A tous mes amies et amis qui ont essayé de me remonter le moral(meriem,fatima,nerimen,ahlem,houria,kiki,fadoua,fatiha,khaled ,lounes, , merci infiniment pour l'encouragement , amour , et soutien.....*

*A tous mes amis promotion 2014 pétrochimie et raffinage, je garderai toujours en souvenir les moments que nous avons passés ensemble. Que le tout puissant nous garde aussi longtemps en contact .*

**Sarah**

## ***Dédicace***

*C'est tout simplement que je dédie ce projet de fin d'étude....*

### ***A mes chers parents***

*Autant de phrases et d'expressions aussi éloquentes soient-elles ne sauraient exprimer ma gratitude et ma reconnaissance. Vous avez su m'inculquer le sens de la responsabilité, de l'optimisme et de la confiance en soi face aux difficultés de la vie. Vos conseils ont toujours guidé mes pas vers la réussite. Votre patience sans fin, votre compréhension et votre encouragement sont pour moi le soutien indispensable que vous avez toujours su m'apporter. Je vous dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain et je ferai toujours de mon mieux pour rester votre fierté et ne jamais vous décevoir. Que Dieu le tout puissant, vous préserve, vous accorde santé, bonheur, qui étudie de l'esprit et vous protège de tout mal.*

### ***A mes adorables sœurs***

#### ***Mes chers frères***

*Merci d'être toujours à mes côtés, par votre présence, par votre amour dévoué et votre tendresse, pour donner du goût et du sens à ma vie. En témoignage de mon amour et de ma grande affection, je vous prie de trouver dans ce travail l'expression de mon estime et mon sincère attachement. Je prie Dieu, le tout puissant, pour qu'il vous donne bonheur et prospérité.*

### ***A mes chers amies : Abdelillah.Said.Amin.Ilias.Yacine.Mohamed***

*Votre amitié est un honneur et une fierté pour moi. Je vous remercie d'avoir embelli ma vie par de précieux moments de bonheur. J'espère du fond de mon cœur que vous trouverez dans ce travail l'expression de mon amour et de mon estime les plus sincères. Que Dieu, le tout puissant éclaire votre vie de santé, de bonheur et de succès.*

### ***A tous mes amis de centre universitaire El-wancharissi.***

*C'est une grande fierté et honneur pour moi d'être parmi vous.*

*A tous ceux dont l'oubli du nom n'est pas celui du cœur.*

***Abdelghani***

# *Sommaire*

### Sommaire

Remerciement.....	I
Dédicace .....	II
Sommaire.....	V
Liste des figures.....	XII
Liste des tableaux .....	XV
Liste d' abréviation.....	XVII
Symboles .....	XIV
Symboles chimiques.....	XIX
<b>Introduction générale.....</b>	<b>2</b>

#### *Chapitre I : Généralités sur le bioraffinage et la biomasse .*

I .1 Introduction .....	4
I.2. Définition de bioraffinage .....	4
I.3. Définition de la bio raffinerie .....	4
I.4.Biocarburants .....	5
I .1.4.1.Les biocarburants gazeux .....	6
I .1.4.2.Les biocarburants liquides .....	6
1. Biocarburants de première génération .....	6
2. Biocarburants de deuxième génération .....	6
3. Biocarburants de troisième génération .....	6
I .1.5. Définition de la biomasse .....	6
I .1.5.1.Types de la biomasse .....	7
I .1.6.Les avantages de l'utilisation de biomasse .....	7
I .1.7.Les poussant pour l'utilisation de la biomasse .....	8

#### *Chapitre II :Hydrogène et procédés de production à partir de la biomasse*

II. 1.Définition de l'hydrogène .....	10
II.2. Les propriétés de l'hydrogène .....	10
II.3. Combustion de l'hydrogène.....	10
II.4.Risques associés à l'hydrogène .....	11

## Sommaire

---

II.5.Applications .....	12
II.6. Stockage de l'hydrogène.....	12
II.6. 1.Stockage sous forme comprimé .....	12
II.6. 2.Procédé .....	12
II.6. 3.Réservoir .....	12
II.7. Les procédés de conversion thermochimiques de la biomasse .....	13
II.7. 1.La Combustion .....	13
II.7.1.1.Combustion directe de la biomasse .....	13
II.8..Lagazéification .....	14
II.8.1.Les réactions chimiques de la gazéification.....	15
II.8.1.1.Les réactions principales .....	16
II.8.1.1.1.L'oxydation homogène .....	17
II.8.1.1.2.L'oxydation hétérogène .....	17
II .8.2 Le principe et le produit .....	17
II .8.3. Les utilisations .....	18
II .8.4.Elimination des goudrons.....	18
II .8.5.Avantages de la gazéification.....	18
II .9. Les conversions biochimiques de la biomasse .....	19
II .9.1. La fermentation.....	19
II .9.2. La transestérification .....	19
II .9.3.La digestion anaérobie (ou bio méthanisation) .....	19
II .9.3.1.Etapes microbiologiques et biochimiques de la méthanisation.....	20
II .9.3.2. Les paramètres et les conditions de la méthanisation.....	21
II .9.3.3. Les paramètres physico-chimiques de la fermentation .....	21
II .9.3.4. Les enjeux de la méthanisation .....	22
II .9.3.5. Biogaz.....	22
<b>Chapitre III : Etudes interprète des résultats passés.</b>	
III.1.Production d'hydrogène par gazéification du bois et du charbon de bois par Dr. Kamel Hélouâni .....	24
III.1.1. Gazéification du bois par une seule étape.....	24

III.1.2. Résultats .....	24
III.1.3. Discussion .....	24
III.2. Gazéification du bois par deux étapes indépendantes .....	25
III.2.1.La pyrolyse (carbonisation) .....	25
III.2.2.Résultats .....	25
III.2.3. L'hydro-gazéification .....	25
III.3.Conclusion .....	26
III.4.La pyrolyse .....	26
III.5.Gazéification conventionnelle .....	27
III.6.Problèmes rencontrés .....	27
III.6.1.Solution .....	28
III.7. Conversion de la biomasse dans un milieu supercritique .....	28
III.8.Conversion thermochimique en milieu alcalin.....	28
III.8.1.Principe de procédé .....	28
III.8.2.Les avantages .....	29
III.9.Analyse 01 : ( la gazéification par le procédé BFR ) .....	29
III.9.1.Résultats .....	29
III.9.2. Discussion et interprétation.....	29
III.10.Analyse 02 .....	30
III.10.1.Présentation graphique des résultats et interprétation.....	30
III.10.2. Stœchiométrie de la réaction .....	31
III.10.3.Résultat .....	31
III.11.Analyse 03 .....	31
III.11.1.Les réactifs et les produits.....	31
III.11.2.Catalyseur .....	31
III.11.3.Résultats .....	31
III.11.4.Présentation graphique et interprétation .....	32



III.12. Etude sur la conception d'un réacteur à biomasse pour la production d'hydrogène	32
.....	32
III.12.1.Montage .....	32
III.12.2. Le but de travail .....	32
III.12.3.Le principe de travail .....	33
III.12.4.Résultats et présentation graphique .....	33
III.13.Etude graphique sur la variation de pourcentage d'hydrogène en fonction de temps de résidence .....	33
III.13.1. Manipulation 1 .....	33
III.13.1.1.Résultats et présentation graphique.....	34
III.13.1.2. Interprétation graphique .....	34
III.14.Étude graphique sur la variation de pourcentage d'hydrogène produit en fonction de la température .....	34
III.14.1.Manipulation 02 .....	34
III.14.1.1.Résultats et interprétation graphique .....	35
III.14.2.Manipulation 03 .....	35
III.14.2.1. Conditions opératoires de la manipulation 03.....	35
III.14.2.2. Résultats et interprétation .....	36
III.15.Manipulation 04 : (la Gazéification de copeaux de bois) .....	36
III.15.1. Résultats et interprétation .....	37
III.16.Manipulation 05 : (la gazéification des boues de désencrage ) .....	38
III.16.1.Résultats et interprétations .....	38
III.17.Discussion et interprétation générale.....	39
III.17.1. a variation de nombre de mole d'H <sub>2</sub> produit en fonction de la température et la pression .....	41
III.17.2.La variation de nombre de moles des d'hydrogène en fonction de la température .....	41
III.17.3.La variation de nombre de moles des d'hydrogène en fonction de la température .....	42

III.18. Conclusion .....	42
<b>Chapitre IV : Partie pratique</b>	
IV. Etude sur la conversion thermochimique de la biomasse dans un milieu alcalin .....	44
IV.1. Introduction .....	44
IV.2. La conversion thermochimique de la biomasse en milieu alcalin.....	44
IV.2.1. Principe de procédé .....	44
IV.2.2. Le montage .....	44
IV.2.3. La composition de la Biomasse .....	48
IV.2.3.1. Les copeaux de bois .....	48
IV.2.3.2. Composition chimique du bois .....	49
IV.2.3.3. Les palmiers dattiers .....	50
IV.2.3.4. L'Hydroxyde de sodium NaOH .....	50
IV.2.3.5. L'eau : H <sub>2</sub> O .....	51
IV.3. Manipulations .....	51
IV.3.1. Principe de travail .....	51
IV.3.2. La gazéification des copeaux de bois en présence de NaOH .....	52
IV.3.2.1. Résultats .....	52
IV.3.2.2. <i>Présentation graphique des résultats et discussion</i> .....	53
IV.3.2.3. <i>Présentation graphique des résultats et discussion</i> .....	55
IV.3.3. <i>Manipulation 02 : La gazéification des palmiers dattiers en présence de NaOH</i> .....	56
IV.3.3.1. Résultats .....	57
IV.3.3.2. Présentation graphique et interprétations .....	57
IV.3.3.3. Présentation graphique des résultats et interprétation.....	59
IV.4. Discussion générale.....	60
IV.4.1. Les <i>Produits secondaire obtenus</i> .....	60

## *Sommaire*

---

IV.5.Conclusion .....	63
Conclusion générale .....	65
Bibliographie .....	67

# *Liste des figures*

### Liste des figures

<b>Figure I-1</b> : Les différents biocarburants produits à partir de biomasse .....	05
<b>Figure I-2</b> : quantité de GES émise par différents combustibles .....	08
<b>Figure II.1</b> : Conversion thermochimique de la biomasse (Swierczynski, 2004).....	13
<b>Figure III-1</b> : Conversion des différents composants de la biomasse par le procédé BFR à une .....	29
<b>Figure III-2</b> : Rendement de la conversion de différentes substances pour produire de l'Hz à une température de 260 °C dans un seul réacteur. ....	30
<b>Figure III-3</b> : Premier réacteur. ....	32
<b>Figure III-4</b> : Graphique de la pression exercée par l'argon présent dans le réacteur en fonction de la température. ....	33
<b>Figure III-5</b> : Pourcentage d'H <sub>2</sub> produit en fonction du temps pour la Manipulation 01 (T= 225-253 °C).....	34
<b>Figure III-6</b> : la variation de la pression du système ( Argon+ H <sub>2</sub> ) en fonction de la température .....	36
<b>Figure III-7</b> : Résidus solides présent dans le réacteur à la fin de la réaction de la Manipulation 05 .....	39
<b>Figure III-8</b> : Compilation des résultats des manipulations du nombre de moles d'H <sub>2</sub> produit en fonction de la température. ....	41
<b>Figure III-9</b> : Compilation des résultats des manipulations du nombre de moles d'Hz produit en fonction de la pression.....	42
<b>Figure IV-1</b> : photo du réacteur de gazéification – Réacteur 01 .....	45
<b>Figure IV-2</b> : ballon tricol .....	45
<b>Figure IV-3</b> : cocote modèle traditionnel – Réacteur 02.....	46
<b>Figure IV-4</b> : photo d'un bécher de 800 ml.....	46
<b>Figure IV-5</b> : Un pot en plastique avec un robinet pour le contrôler le gaz.....	47
<b>Figure IV-6</b> : le montage expérimentale .....	47
<b>Figure IV-7</b> : schéma de la conversion thermochimique de la biomasse.....	48
<b>Figure IV-8</b> : les copeaux de bois .....	49
<b>Figure IV-9</b> : les différents constituants principaux du bois.....	50
<b>Figure IV-10</b> : les écorces de palmiers dattiers.....	50
<b>Figure IV-11</b> : l'hydroxyde de sodium.....	51
<b>Figure IV-12</b> : graphe de variation de la quantité de vapeur d'eau utilisée en fonction de temps en présence de NaOH et les copeaux de bois.....	54

## Liste des figures

---

<b>Figure IV-13</b> : graphe de variation de volume de gaz dégagé en fonction de temps en présence de NaOH+coupeaux de bois.....	54
<b>Figure IV-14</b> : la variation de volume de gaz en fonction de temps.....	56
<b>Figure IV-15</b> : la variation de variation de la quantité de vapeur d'eau utilisée en fonction de temps.....	56
<b>Figure IV-16</b> : graphe de la variation de volume de gaz dégagé en fonction de temps.....	57
<b>Figure IV-17</b> : graphe de variation de la quantité de vapeur d'eau en fonction de temps.....	58
<b>Figure IV-18</b> : graphe de la variation de volume de gaz en fonction de temps (en absence de NaOH).....	59
<b>Figure IV-19</b> : graphe de la variation vapeur d'eau utilisée en fonction de temps (en absence de NaOH).....	59
<b>Figure IV-20</b> : la production de gaz à partir des coupeaux de bois.....	60
<b>Figure IV-21</b> : charbon noir.....	60
<b>Figure IV-22</b> : goudron noir très visqueux.....	61
<b>Figure IV-23</b> : l'état du réacteur 01 après l'expérience.....	61
<b>Figure IV-24</b> : charbon noir produit après la gazéification des palmiers dattiers.....	62
<b>Figure IV-25</b> : la production de gaz a partir des palmiers dattiers.....	62

# *Liste des tableaux*

## Liste des tableaux

---

### Liste des tableaux

<b>Tableau II-1</b> :Caractéristiquesd'inflammation de l'hydrogène et du gaz naturel .....	12
<b>Tableau III-1</b> : Conditions opératoires de la Manipulation 02 .....	34
<b>Tableau III-2</b> : Résultats de la manipulation 02 .....	35
<b>Tableau III-3</b> : les conditions opératoires de la manipulation 03. ....	35
<b>Tableau III-4</b> : les résultats obtenus de la manipulation 03.....	36
<b>Tableau III-5</b> : les conditions opératoires de la manipulation 04. ....	37
<b>Tableau III-6</b> : les résultats de la gazéification des copeaux de bois .....	37
<b>Tableau III-7</b> : les conditions opératoires de la manipulation 05.....	38
<b>Tableau III-8</b> : les résultats de la manipulation 05 . ....	38
<b>TableauIII-9</b> : Compilation des résultats des manipulations et pourcentage d'efficacité de conversion .....	39
<b>Tableau IV-1</b> : Résultat de la manipulation : copeaux de bois + NaOH .....	53
<b>Tableau IV-2</b> : Résultats de la manipulation (gazéification des copeaux de bois en absence de NaOH.....	55
<b>Tableau IV-3</b> : Résultat de la manipulation ( gazéification des palmiers dattiers en présence de NaOH.....	57
<b>Tableau IV-4</b> : Résultat de la gazéification des palmiers dattiers en absence de NaOH .....	59



# *Liste d'abréviation*

**Liste d'abréviation.**

<b>GES</b>	gaz à effet de serre
<b>GNV</b>	gaz naturel véhicule
<b>GN</b>	gaz naturel
<b>2G</b>	deuxième génération
<b>PSA</b>	Prostate SpecificAntigen
<b>PSI</b>	pouvoir calorifique inférieur
<b>BIO_SNG.</b>	bio _ syntheticnaturalgas
<b>ETBE</b>	éthyle tertio butyl éther
<b>EMHV</b>	l'ester méthylique d'huile végétale
<b>BFR</b>	Besoin en fonds de roulement

*symboles*

## **Symbole**

---

### **Symbole**

D : diametre

H : houteur

V gaz : volume du gaz

$\pi$ :3.14

*symboles chimiques*

## *Symbole chimique*

---

### Éléments chimique

**NaOH : hydroxyde de sodium**

**CO : monoxyde de carbone**

**CO<sub>2</sub> : dioxyde de carbone**

**H<sub>2</sub> : hydrogene**

**N<sub>2</sub> : nitrogene**

**CaO : oxyde de calcium**

**CaCO<sub>3</sub> : carbonate de calcium**

**H<sub>2</sub>O : l'eau**

**C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub> : diethylaminoethylcelluse**

**Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> : carbonate de sodium**

**Ni : nicle**

**Cu : cuivre**

**Fe : fer**

**Co : cobalt**

**Rh : rhodium**

**Ru : ruthenium**

**Pt : platine**

**Pd :palladium**

# *Introduction générale*

**Introduction Générale**

De nos jours, la consommation d'énergie est une des plus grandes préoccupations. Car elle est en augmentation et elle a un grand impact sur notre environnement. Les principales conséquences sont, la pollution atmosphérique causant une augmentation de l'effet de serre qui provoque un réchauffement climatique. Ce réchauffement climatique risque d'engendrer une fonte partielle des calottes polaires élevant ainsi le niveau des mers, inondant les zones côtières basses, certaines îles et les deltas. [1]

Un souci préoccupant au sujet des énergies non renouvelable qui s'épuisent et deviennent de plus en plus rare. De nombreux combustibles fossiles ne suffiront plus pour subvenir aux besoins des personnes à l'avenir. [2]

Les énergies renouvelables apparaissent comme la réponse à la disparition programmée des énergies fossiles. L'intérêt est de faire des énergies renouvelables une ressource quasiment illimitée. En outre, les émissions de gaz à effet de serre sont sensiblement réduites grâce à ces énergies renouvelables, beaucoup plus propres que la combustion pétrolière. [3]

Les procédés dits « traditionnels » de récupération de l'hydrogène qui reposent sur l'extraction de ressources fossiles hydrocarbures sont très énergivores et fortement décriés pour leurs impacts environnementaux (émissions de GES, etc...). C'est pourquoi une volonté est apparue de générer de l'hydrogène combustible à partir de ressources renouvelables. Notre travail présente de quelle manière l'hydrogène peut être produit à partir de la biomasse . L'étude détermine les procédés techniques qu'il est possible de mettre en œuvre. [4]

L'objectif de ce travail est une synthèse des nouvelles technologies utilisées pour la production de l'hydrogène à partir de la biomasse , de sorte que :

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur le bio raffinage et la biomasse.

Le deuxième chapitre est dédié à une étude générale et détaillée sur l'hydrogène, en tant qu'un vecteur d'énergie et les procédés ( thermochimiques et biologiques) pour la production d'hydrogène à partir de la biomasse .

Le troisième chapitre est consacré à une étude interprète des autres résultats qui ont été obtenus par des chercheurs qui ont travaillé sur le même thème de notre mémoire de fin d'études.

Ensuite , le quatrième chapitre qui représente notre partie pratique, dans ce chapitre on essayé de décrire tout ce qu'on a fait à laboratoire et comment on a appliqué le procédé de la conversion thermochimique de deux types de biomasse pour produire l'hydrogène, et puis ,on a analyser et interprété nos résultats pour faire une petite conclusion à la fin de ce chapitre sur notre travail.

Nous terminons ce travail par une conclusion générale.



*Chapitre I*  
*Généralités sur le bioraffinage et la biomasse*

**I.1. Introduction :**

Le devenir énergétique mondial passera par un mix varié de ressources énergétiques qui permettront de pallier non seulement à une demande en énergie croissante mais aussi à une diminution des stocks disponibles en énergies fossiles. Parallèlement, il est devenu indispensable de privilégier des solutions durables et renouvelables afin de préserver au mieux l'environnement pour les générations futures. Dans ce cadre, la production d'énergie dite « propre » présente des enjeux majeurs tant environnementaux qu'économiques et sociétaux. Une telle énergie doit pouvoir être produite dans le cadre d'une filière ayant un impact le plus faible possible sur l'environnement et dans un contexte sociétal et économique favorable, c'est-à-dire acceptable par l'utilisateur dans la notion de maîtrise des risques et du coût de l'énergie dans un contexte mondiale de réduction du pouvoir d'achat. L'approvisionnement énergétique doit également permettre de répondre à des besoins énergétiques aux caractéristiques variées (industries, particuliers, transports, etc.)[4]

L'utilisation rationnelle de la biomasse comme substitut au carbone fossile constitue donc un enjeu majeur et est la force motrice du développement des bioraffineries qui auront un rôle important à jouer dans un avenir proche.

Il est en effet globalement accepté à l'échelle mondiale qu'une utilisation rationnelle et durable de la biomasse pourrait potentiellement remplacer une partie des ressources fossiles tant au niveau du secteur énergétique qu'au niveau d'autres secteurs

De là est né le concept du bioraffinage et de la bio raffinerie (ou raffinerie végétale) qui valorise l'ensemble de la plante pour générer des produits à plus haute valeur ajoutée[5]

**I.2. Définition de bioraffinage :**

Le bioraffinage peut être défini comme le processus de transformation durable de la biomasse en une gamme de produits biobasés (incluant les produits alimentaires, les produits chimiques et les biomatériaux) et en bioénergie (biocarburants, électricité, chaleur) commercialisables.[5]

Le bioraffinage est un peu comme le raffinage du pétrole brut, c'est-à-dire une série de procédés industriels qui permettent de transformer la matière ligneuse en une variété de produits chimiques commerciaux. Dans une bioraffinerie, les principaux composés chimiques issus du bois (cellulose, hémicellulose, lignine et matières extractibles) servent à la fabrication de produits à valeur ajoutée tels que des biocombustibles, des produits chimiques spéciaux, des matières premières de base pour d'autres industries et des précurseurs de matières plastiques ainsi que d'autres polymères. [6]

**I.3. Définition de la bio raffinerie :**

Les **bioraffineries** sont des installations qui transforment la biomasse en biocarburant, chaleur et puissance (bioénergie), ainsi qu'en produits chimiques à valeur ajoutée, biomatériaux, produits

destinées à l'alimentation humaine, animale, etc...

Le concept de bioraffinerie est d'optimiser la valorisation de toutes les composantes des agro-ressources. Il s'agit d'une transformation durable de la biomasse en énergie et une gamme de produits. En produisant plusieurs produits, une bioraffinerie peut optimiser la valeur qu'elle tire des matières premières. Par exemple, elle pourrait produire un produit chimique ou alimentaire à faible volume mais à haute valeur, en plus d'un carburant de transport en grosses quantités (comme le bioéthanol ou biogazole). De plus, il est possible de générer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par les processus de transformation.[7]

Dans les bioraffineries axées sur l'énergie, la biomasse est d'abord utilisée pour la production de biocarburants, électricité et chaleur, et les résidus du procédé sont vendus comme alimentation animale ou mieux encore sont valorisés comme produits à haute valeur ajoutée pour optimiser les aspects économiques et écologiques de la filière complète de la biomasse.[8]

#### I.4. Biocarburants :

Le principal intérêt revendiqué par le biocarburant est de ne pas être une énergie fossile et de fournir une énergie renouvelable, contribuant très peu à l'augmentation du taux de CO<sub>2</sub> présent dans l'atmosphère. En effet, la plante durant sa croissance consomme par la photosynthèse une quantité de dioxyde de carbone qui sera dégagée lors de la combustion du biocarburant.

Plusieurs types de biocarburants sont utilisés, principalement GNV (gaz naturel véhicule), les alcools, et les huiles esters. Les biocarburants liquides sont classés en trois générations selon la matière première.[9]

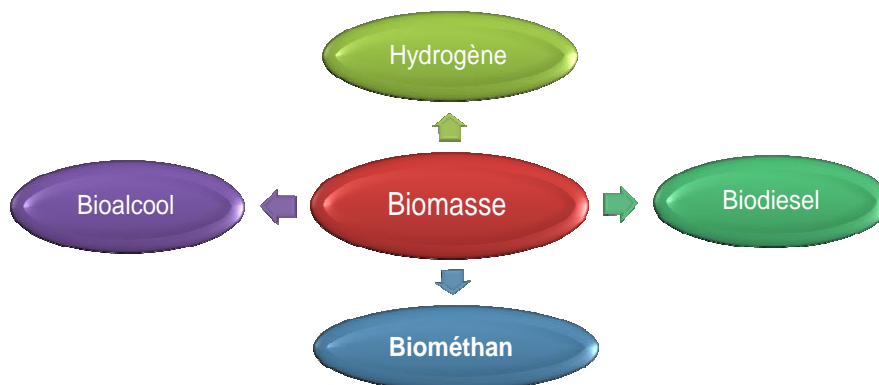


Figure I-1 : Les différents biocarburants produits à partir de biomasse

**I .1.4.1.Les biocarburants gazeux :**

Ce sont des combustibles obtenus à partir du méthane contenu dans le biogaz. Ce dernier résulte de la fermentation, hors de la présence d'oxygène (donc hors de la présence de l'air), de n'importe quel matériau organique : déchets alimentaires, déchets de bois, paille, et bien sûr produits des cultures. En pratique ce biogaz est obtenu en mettant des matériaux organiques dans une enceinte qui est à l'abri de l'air et en "laissant faire" les bactéries qui vont les décomposer. Les gaz issus de cette fermentation sont composés de 65 % de méthane, 34 % de CO<sub>2</sub> et 1 % d'autres gaz dont le sulfure d'hydrogène et le di azote. [10]

**I .1.4.2.Les biocarburants liquides :****1. Biocarburants de première génération :**

Les biocarburants de première génération (agrocarburants), sont produits à partir de la biomasse agricole par exemple ; la betterave sucrière, la canne à sucre, le tournesol, le colza, le soja, le blé, le maïs, etc.[9]

**2. Biocarburants de deuxième génération :**

La deuxième génération concerne le bioraffinage de la biomasse lignocellulosique qui valorise les molécules de structuration des plantes. Cette nouvelle génération permet de résoudre certains des problèmes soulevés avec l'éthanol et le biodiesel de première génération.

cette nouvelle génération de biocarburant a également pour objectif de réduire nettement les émissions de gaz à effet de serre et la concurrence avec les produits alimentaire causé par les biocarburants de première génération.[9]

**3. Biocarburants de troisième génération :**

La troisième génération de biocarburants est produit à partir de microalgues. En effet, certaines espèces d'algues sont naturellement riches en huile, l'idée est donc de cultiver des quantités massives d'algues pour produire du carburant. Pour y parvenir, il faut juste de l'énergie solaire, de l'eau et du CO<sub>2</sub>. En couplant un centre de production d'algues avec une usine émettant du CO<sub>2</sub>, il serait possible de trouver une utilité à ce gaz plutôt que de le rejeter dans l'atmosphère.

**I .1.5. Définition de la biomasse :**

Le monde de la biomasse est extrêmement vaste et il est difficile d'en faire une présentation à la fois rapide et complète.

Le terme de biomasse désigne la masse de matière vivante végétale, présente à la surface du globe. Une partie de ce gisement, constituée principalement des plantes et des arbres, peut être exploitée à des fins énergétiques.[10]

La biomasse est produite par les organismes vivants principalement par l'activité photosynthétique des plantes, mais aussi des animaux, des insectes, des micro-organismes... Elle

est essentiellement constituée de polymères complexes de carbone, hydrogène, oxygène et azote, de soufre en faible proportion et d'éléments inorganiques. L'aspect renouvelable introduit une distinction qui permet de n'en retenir qu'une fraction d'une part, d'y ajouter la production fatale de déchets issus d'autres composés organiques naturels industriellement transformés, donc pas toujours naturels, d'autre part.[11]

#### I .1.5.1.Types de la biomasse :

La biomasse est donc partout et disponible en grande quantité. Plus précisément, la biomasse exploitable par l'homme peut être classée suivant cinq origines différentes :

- **La biomasse d'origine agricole** qui regroupe les cultures alimentaires et énergétiques mais également les résidus, par exemple les tiges non consommables, et les déchets de l'agriculture tels que les surplus et produits non-calibrés pour la consommation et, finalement, les effluents d'élevage comme les déjections et litières animales qui forment les fumiers et les lisiers.
- **La biomasse d'origine forestière** qui englobe les forêts soit le bois comme matière première de même que les résidus et déchets issus de l'activité forestière lors de la première transformation du bois. La biomasse d'origine aquatique, soit les résidus des activités de pêche et d'aquaculture ainsi que les cultures d'algues et de micro-algues.
- **La biomasse d'origine industrielle** regroupe principalement tous les produits connexes de l'industrie agroalimentaire et de l'industrie du bois de deuxième transformation.
- **La biomasse d'origine collective** qui comprend l'ensemble des déchets produit par l'homme et notre société, soit les déchets[12]

#### I .1.6.Les avantages de l'utilisation de biomasse :

On peut utiliser la biomasse comme source d'énergie ,Tout simplement pour les raisons suivantes :

- Elle est **neutre en CO<sub>2</sub>**
- Elle est **disponible partout** et souvent en grande quantité
- Elle aide à la **gestion des déchets** solides
- Elle est **inoffensive** et sûre
- Elle est **écologique**
- Elle est **renouvelable**
- Elle peut être transformée en **différentes sources d'énergie**. [13]

**I.1.7. Les facteurs pour l'utilisation de la biomasse :**

Le développement des bioénergies s'inscrit dans une mouvance internationale plus large, visant la réduction de la dépendance des économies nationales à l'utilisation des combustibles fossiles et, par conséquent, la réduction des émissions de GES qui en découlent. Les gouvernements cherchent des alternatives du côté des énergies renouvelables afin de diminuer, entre autres, l'impact de l'importation et de la consommation de produits pétroliers. Dans ce contexte, l'emploi de biomasse pour la production de chaleur, en remplacement des combustibles fossiles, représente une avenue intéressante pour lutter contre les changements climatiques. L'avantage lié à l'utilisation de la biomasse agricole repose principalement sur la capacité des végétaux à capter une bonne partie du carbone émis lors de leur combustion. La filière de la biomasse agricole n'est toutefois pas tout à fait carboneutre, c'est-à-dire qu'elle ne récupère pas autant de CO<sub>2</sub> qu'elle en émet dans l'atmosphère. Bien que le carbone dégagé lors de la combustion soit éventuellement réabsorbé par les plantes lors de la photosynthèse, une quantité relativement importante de combustibles fossiles est utilisée dans les opérations de culture des biomasses agricoles (fonctionnement de la machinerie, production d'engrais chimiques ou de pesticides, etc.). [14]

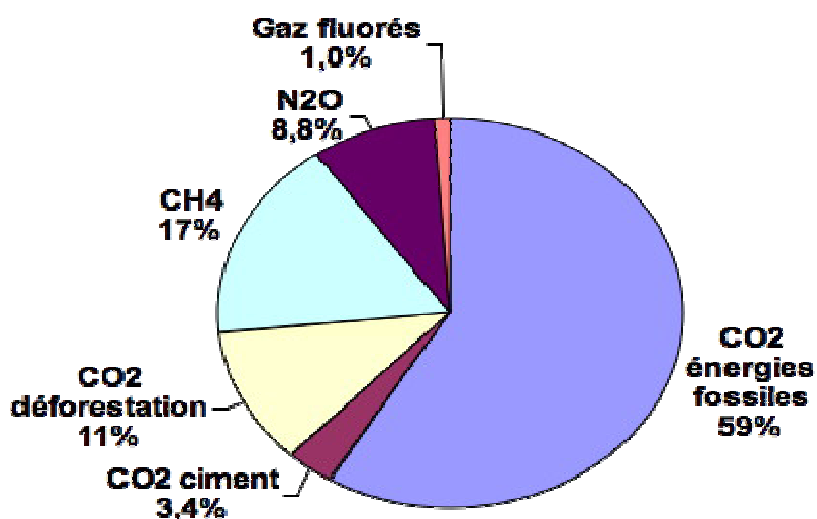


Figure I-2 : quantité de GES émise par différents combustibles

## *Chapitre II*

# *Hydrogène et procédés de production à partir de la biomasse*

### II.1. Définition de l'hydrogène :

Le nom hydrogène vient des deux mots : hydro = eau, et gène = générateur, donc le mot hydrogène signifie « générateur d'eau », c'est l'élément le plus abondant dans l'univers (Il compose 75% de la masse de toute la matière dans les étoiles et les galaxies.), c'est le carburant du soleil (chaque seconde 620 millions de tonnes d'hydrogène sont converties en 615,7 millions de tonnes d'hélium], Jupiter est constitué de 99,8% d'hydrogène et d'hélium. L'hydrogène est un gaz diatomique, tient la première place dans la classification de Mendeleïev, il possède la plus simple structure atomique (un proton dans son noyau et un électron dans son atome) . [16]

### II.2. Les propriétés de l'hydrogène :

L'hydrogène est un gaz diatomique, tient la première place dans la classification de Mendeleïev, il possède la plus simple structure atomique (un proton dans son noyau et un électron dans son atome), il porte les caractéristiques suivantes :

- Incolore, inodore et non toxique;
- Très inflammable dans l'air: 4% à 74,5% (20°C et 1atm);
- Brûle avec une flamme peu visible et détone facilement; · Plus léger que l'air

### II.3. Combustion de l'hydrogène :

Pour qu'il y ait combustion, **trois conditions doivent être respectées** :

- La présence d'un **carburant** (hydrogène, propane, méthane, etc.)
- La présence d'un **comburant** (oxygène)
- Une énergie d'inflammation (étincelle, point chaud, etc.)

Dans l'air, l'hydrogène brûle avec une très faible flamme bleue, presque invisible, sa combustion qui produit de l'eau est très exothermique, son pouvoir calorifique est de 141,79 MJ/Kg .

La flamme de la combustion de l'hydrogène dans l'air est quasi-invisible et est très chaude (2480 °K). Les propriétés de l'hydrogène présentées au tableau 3 en font un gaz extrêmement inflammable. De nombreuses précautions doivent donc être prises en considération lors de son utilisation. [10]

**Tableau N° II-1 : Caractéristiques d'inflammation de l'hydrogène et du gaz naturel**



Paramètre	unité	hydrogène	GN
Température d'auto inflammation dans l'air	°K	858	813
Température de flamme dans l'air à 300 K	°K	2480	2 148
Limites d'inflammabilité dans l'air	% vol	4-75	5.3-15
Limites de détonation dans l'air	% vol	13-65	6.3-13.5
Energie minimale d'inflammation	MJ	0.017	0.3
Energie explosive théorique	kg de TNT/m <sup>3</sup>	2.02	7.03
Surpression de détonation	bar	14.7	16.8
Coefficient de diffusion dans l'air	cm/s	0.61	0.16
Vitesse de flamme dans l'air	cm/s	260	37.14
Vitesse de détonation dans l'air	km/s	2.0	1.8
Mélange stoechiométrique dans l'air	% vol	29.53	9.48

#### II.4. Risques associés à l'hydrogène:

Comme tout autre gaz ou liquide combustible, l'hydrogène présente des risques liés à ses propriétés physicochimiques.. L'hydrogène se distingue des autres gaz ou liquides combustibles, comme le gaz naturel, le propane ou l'essence, par plusieurs aspects, facilitant ou complexifiant la maîtrise des risques :

la plus grande perméation de l'hydrogène à travers les matériaux provoque également plus de fuite que les autres gaz combustibles ;

- Une probabilité d'inflammation plus élevée
- Une probabilité d'explosion à l'air libre plus faible :
- Une combustion plus rapide
- Une flamme très peu visible
- Une flamme très peu radiative [17]

Près de 20 % des accidents étudiés résultent de la formation accidentelle de H<sub>2</sub> par contact eau / métal en fusion, formation de gaz à l'eau, réaction impliquant des hydrures ou par corrosion des aciers. Ce dernier cas peut concerner nombre d'installation, notamment toutes celles utilisant des acides concentrés ; il peut en effet y avoir des dilutions accidentelles. [18]

#### II.5.Applications: [19]

L'hydrogène peut être converti en électricité, en chaleur ou en force motrice selon l'usage final. Il a l'avantage de présenter une capacité de stockage (problématique avec l'électricité) et de pouvoir être produit sans émission de CO<sub>2</sub>. En tant que vecteur énergétique, il trouve ainsi :

- **des applications stationnaires** : stockage d'énergie dans les bâtiments en assurant une fourniture d'électricité et de chaleur grâce à la cogénération, ce qui permettrait le développement des bâtiments à énergie positive ;
- **des applications mobiles** : l'hydrogène peut alimenter des véhicules équipés de moteurs à combustion fonctionnant au gaz. Par ailleurs, un réservoir d'hydrogène peut-être associé à une pile combustible pour améliorer l'autonomie de véhicules électriques (électro-mobilité de 2<sup>e</sup> génération, dite 2G, la première correspondant aux véhicules électriques) ;
- **des applications industrielles** : l'hydrogène est un composant chimique très employé dans l'industrie.

## II.6. Stockage de l'hydrogène : [20]

Il existe multiples modes de stockage de l'hydrogène. Si les deux premiers modes de stockages sont actuellement les plus utilisés, ils sont loin de satisfaire par leurs performances; aussi les autres modes sont également étudiés. [20]

### II.6. 1. Stockage sous forme comprimé :

Le stockage sous forme comprimée est l'un des plus utilisé actuellement (PSA, Nissan, DaimlerChrysler): la pression va de 200-350 à 700 bars. Des stations services existent déjà: notamment celles de Munich, Chicago, Détroit ou Hambourg. [20]

### II.6. 2. Procédé :

- La compression nécessite de l'énergie, l'évaluation de celle ci dépend du processus considéré: le processus de compression isotherme n'est pas réalisable, le processus adiabatique est plus proche de la réalité. Une compression à plusieurs étages avec un refroidissement entre chaque étage permet de se rapprocher du mode isotherme: l'énergie dépensée se situe entre ces deux limites. Lors d'un remplissage rapide, on assiste à une augmentation de température. On peut évaluer à 10% du PCI l'énergie nécessaire pour comprimer H<sub>2</sub> de 1 à 700 bars [20]

### II.6. 3. Réservoir :

\_ L'H<sub>2</sub> peut être stocké dans des bouteilles de 10 L jusqu'à des réservoirs de 10.000 m<sup>3</sup>. Les bouteilles commercialisées actuellement permettent des pressions jusque 350 bars. Il existe des réservoirs ronds ou cylindriques: les premiers sont peu adaptés aux applications automobiles pour des raisons de place, les seconds rendent une adaptation de la géométrie du véhicule nécessaire.

\_ Stockage sous terrain De même que le gaz naturel, il est possible de stocker l'hydrogène sous terre sous forme comprimée: aquifères, cavernes salées (saltcavern) .le stocke dans les mines de sel. Cette méthode n'est intéressante que pour les quantités importantes d'hydrogène.

## II.7. Les procédés de conversion thermochimiques de la biomasse :

Les trois principales méthodes de conversion thermochimique de la biomasse couramment développées correspondent à la combustion, la pyrolyse et la gazéification.

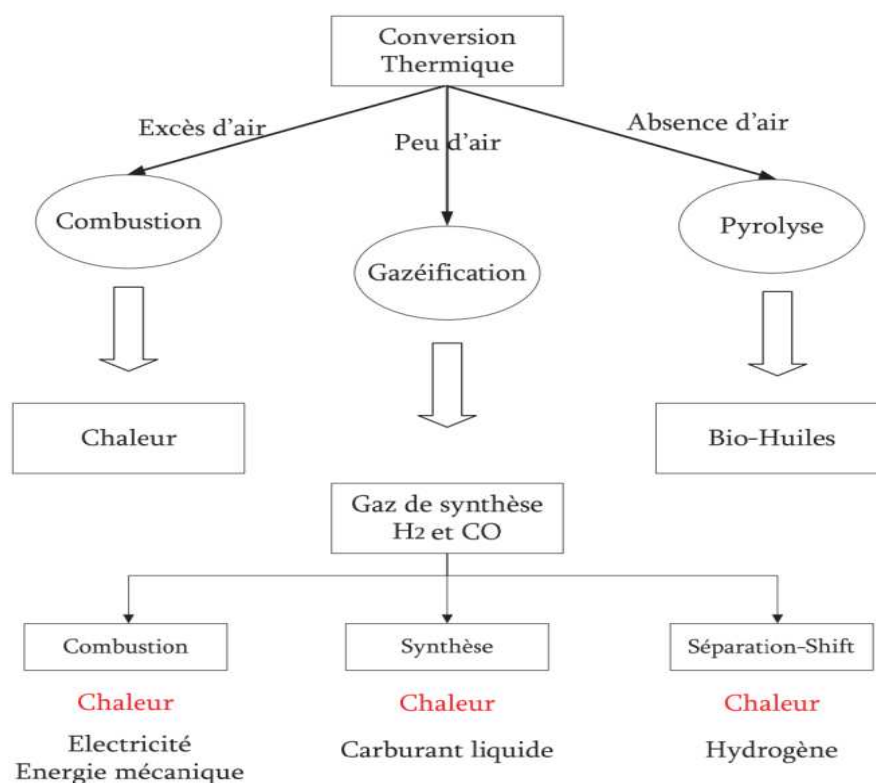
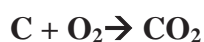


Figure II.1 : Conversion thermochimique de la biomasse (Swierczynski, 2004)

### II.7. 1.La Combustion :

Si l'atmosphère de traitement est oxydante c'est-à-dire riche en oxygène, les matières volatiles gazeuses s'enflamment, après un délai désigné par délai d'inflammation. La chaleur produite par la combustion rapide du mélange air – gaz volatils permet alors de démarrer un processus de combustion à partir de la surface du carbone résiduel

On a affaire à un processus d'oxydation globalement exothermique de type :



#### II.7.1.1.Combustion directe de la biomasse :

La combustion est la plus répandue des technologies pour la génération d'énergie à partir de la biomasse mais aussi la plus importante et la mieux développée représentant plus de 90 % de l'apport mondial en bioénergie . Selon Nussbaumer (2003), les étapes de la combustion sont : le

séchage, la dé volatilisaton, la gazéification, la combustion du charbon et l'oxydation des produits gazeux.

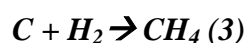
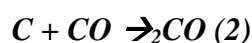
Concernant la production de chaleur, la combustion pourrait être divisée selon la capacité des fourneaux en combustion à petite échelle  $\leq 400\text{kWth}$  et en combustion à moyenne et grande échelle  $\geq 400\text{kWth}$  (Tableau 2-1), avec des systèmes d'alimentation et des technologies différentes selon les cas. En général, pour les technologies récentes, la combustion à petite échelle pourrait être considérée une technologie pleinement développée . Pour la combustion à moyenne et grande échelle, les technologies sont généralement de trois types : combustion sur lit fixe, combustion sur lit fluidisé et combustion des poussières [23]

- **Combustion sur lit fixe** : l'air primaire passe à travers un lit de combustion fixe, dans lequel le séchage, la gazéification et la combustion du charbon ont lieu. Les gaz de combustion sont brûlés à travers l'ajout d'air secondaire, généralement dans une zone séparée du lit de combustion .
- **Combustion sur lit fluidisé** : l'air primaire passe par le bas, le combustible et les gaz de combustion sont constamment mélangés et brûlent ensemble. On peut distinguer la combustion sur lit fluidisé bouillonnant et la combustion sur lit fluidisé circulant .
- **Combustion des poussières** : Le combustible et l'air primaire forment un mélange qui est injecté dans la chambre de combustion. Le combustible (particules fines  $< 2\text{mm}$ ) brûle étant encore en suspension et les gaz de combustion sont brûlés à travers l'ajout d'air secondaire .

\_ Les pertes dans une chaudière peuvent être importantes, en fonction de son design, de la biomasse utilisée et du ratio air/biomasse, toutes choses qui déterminent le rendement de la combustion. Comme conséquence du 2ème principe de la thermodynamique, les moteurs et turbines pour génération électrique jusqu'à 1 MW de puissance ont un rendement  $< 22\%$ . Toutefois, si cette énergie pouvait être utilisée pour une autre application (séchage, eau chaude), le rendement total serait différent. [24]

### II.8. Lagazéification :

Si on chauffe le déchet, lorsque l'atmosphère de traitement est en défaut d'air et enrichie en vapeur d'eau et dioxyde de carbone (agents réactionnels), les matières volatiles émises ne subiront pas de processus de combustion. Le carbone fixe se mettra à réagir avec la vapeur d'eau et le  $\text{CO}_2$ , à des températures de  $850\text{-}900^\circ\text{C}$ , dans des réactions endothermiques de transformation thermochimiques, dites de gazéification, de type :



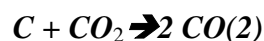
Les deux premières réactions sont favorisées à haute température (850-900°C) et basse pression (~ 1 bar), tandis que la dernière est favorisée à basse température (700°C) et haute pression (10-20 bars).

### II.8.1. Les réactions chimiques de la gazéification :

\_ La gazéification consiste en une transformation thermique d'un solide combustible (charbon, tourbe, bois...) en présence d'un composé gazeux (O<sub>2</sub>, air, CO<sub>2</sub>, vapeur d'eau...). Le but de cette transformation est généralement de convertir le solide en vue de l'obtention d'un mélange gazeux combustible. Elle se distingue donc de la pyrolyse, opération thermique s'effectuant en l'absence de gaz réagissant avec le solide suite d'une oxydation partielle des produits de pyrolyse en présence d'oxygène ou d'air à une température de 600 à 1000°C.

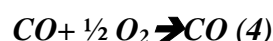
\_ Nous obtenons un gaz contenant du CO, CO<sub>2</sub>, et du H<sub>2</sub>, ..., ainsi que des cendres. Le gaz généré est un combustible qui peut alors être utilisé dans des chaudières ou bien épuré et utilisé dans des turbines à chambre de combustion. Cette transformation met en jeu un ensemble de mécanismes thermochimiques, **pyrolyse, oxydation et réduction**, fortement couplés, qui conditionnent le fonctionnement d'un procédé de gazéification et dont l'optimisation impose des contraintes technologiques dont certaines ne sont que partiellement levées à ce jour.

\_ La gazéification, d'un point de vue purement scientifique, se décrit comme une réaction hétérogène. C'est à dire une réaction de surface entre le carbone (C) contenu dans le solide et un gaz réactant qui peut être de la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O) ou du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Ces deux réactions, (1) et (2), se produisent au niveau de la surface réactive de la particule, surface qui varie entre la surface extérieure de la particule et la surface totale des pores de la particule (surface spécifique) en fonction des propriétés de diffusion au coeur du solide et des cinétiques chimiques.



Ces réactions sont lentes, comparées à l'oxydation (avec oxygène) lors de la combustion. Elle est environ 50 fois plus lente pour une gazéification à la vapeur d'eau et 100 à 150 fois plus lente si l'on considère le dioxyde de carbone comme gaz réactant. [25]

Lorsque l'air ou l'oxygène est utilisé pour la gazéification, les réactions d'oxydation (3) ou d'oxydation partielle (4) qui ont lieu, fournissent l'énergie nécessaire aux réactions suivantes.



Le taux de conversion du carbone solide en gaz et la composition de ces derniers sont déterminés par:

les constantes d'équilibre des diverses réactions mises en œuvre (une dizaine)

- les vitesses de ces réactions

-la composition du mélange oxygène/vapeur des réactions

\_ Sur le plan industriel, lorsque nous parlons de gazéification, l'objectif est donc de favoriser ces deux réactions (1) et (2), qui vont produire le gaz combustible. Pour ce faire, il faudra préalablement ou simultanément générer les éléments nécessaires à ces deux réactions, à savoir :

**le charbon très concentré en carbone, les réactants CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O ainsi qu'une quantité importante d'énergie le plus souvent par oxydation d'une fraction du carbone.**

- Dans les procédés ces trois composantes sont produites par les réactions de pyrolyse qui permettent la production, très rapidement, de composés hydrocarbonés gazeux, dès l'échauffement du combustible dans le réacteur.
- les réactions d'oxydation, homogène (phase gaz) et hétérogène (phase solide) plus ou moins complète et qui interviennent en présence d'oxygène comme classiquement en combustion.

#### **II.8.1.1. Les réactions principales :**

**Lapyrolyse**, réaction légèrement endothermique, produit des gaz et une matrice solide résiduelle, concentrée en carbone, appelé charbon. La cinétique de pyrolyse, la répartition gaz/solide formée ainsi que les compositions chimiques des produits résultants dépendant de nombreux paramètres, mais la température, la vitesse de montée en température la granulométrie et la nature du combustible sont toutefois les grandeurs les plus influantes .

- Cette décomposition joue un rôle particulièrement important dans les procédés car elle conditionne :

Le charbon, sa concentration en carbone, sa surface spécifique et plus généralement sa réactivité en particulier vis à vis de la gazéification ultérieure avec H<sub>2</sub>O ou CO<sub>2</sub> - Les gaz (ou matières volatiles), qui selon le combustible initial peuvent représenter de 0 à 80 % de la masse totale.

Il est possible de les décomposer en deux types :

- ✓ **Les gaz non-condensables** : composés majoritairement d'un mélange de gaz combustibles (CO et hydrocarbures) et de dioxyde de carbone.
- ✓ **Les goudrons (matières volatiles condensables)** : composés de masses moléculaires plus ou moins élevées et à caractères aromatiques, ils sont liquides jusqu'à des températures relativement élevées (400-500 oC) Ces goudrons, formés pendant cette étape de pyrolyse, nécessitent une attention particulière puisqu'ils sont généralement non complètement oxydés et qu'une partie d'entre eux après des recombinaisons plus ou moins importantes se retrouvent dans les gaz et perturbent leur utilisation.

**II.8.1.2.1. L'oxydation homogène :**

Entre les matières volatiles et l'oxygène de l'air va permettre de produire de l'énergie d'une part, et la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone nécessaire à la gazéification d'autre part. Il convient également de préciser que la vapeur d'eau provient aussi de l'humidité initiale de la biomasse brute. Les cinétiques d'oxydation homogène pour les hydrocarbures. L'hydrogène et le monoxyde de carbone sont très rapides (quelques dixièmes de secondes) et bien connues.

**II.8.1.2. L'oxydation hétérogène :**

Du charbon permet d'apporter un complément énergétique aux procédés, dans les cas où la part due aux oxydations homogènes s'avèreraient insuffisantes.

Cette réaction doit toutefois être réduite au minimum, dans la mesure où elle consomme du charbon qui n'est par conséquent, plus disponible pour la réaction de gazéification. De plus, la problématique des cendres décrite plus haut apparaît ici aussi comme une contrainte forte liée à cette réaction. [26]

**II .8. Le principe et le produit :**

La gazéification est une forme de pyrolyse conduite à de hautes températures (900-1050°C) en vue d'optimiser la production de gaz dont les étapes sont : séchage, pyrolyse, oxydation et réduction. Le gaz obtenu est un mélange de CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> et N<sub>2</sub> [14, 43].

Cette technologie est la plus récente des méthodes de transformations thermo-chimiques et est utilisée pour optimiser le rendement électrique, tout en limitant les coûts. Il est en effet possible d'obtenir un rendement de 50%, en utilisant un cycle combiné de turbines à gaz, dans lequel les gazes de la première servent à la production de vapeur pour la deuxième .

Les systèmes de gazéification conventionnels utilisent l'air ou l'oxygène dans le procédé, ce qui conduit à une efficacité thermique et un faible pouvoir calorifique du gaz produit, *le gaz de producteur*, à cause de l'énergie consommée pour évaporer l'humidité de la biomasse et l'oxydation d'une partie de la biomasse pour produire cette énergie. Les nouvelles technologies utilisent de la vapeur à haute température pour les réactions, ce qui conduit à un gaz « propre », *le syngas* (gaz synthétique), composé d'un ratio 2 : 1 d'H<sub>2</sub> et de CO, et qui pourrait être utilisé pour la production d'hydrocarbures par le procédé de Fischer-Tropsch [27].

Parmi les diverses variantes, nous pouvons citer : la gazéification au Plasma qui combine de très hautes températures dans une zone hautement réactive (avec une grande proportion d'électrons, ions, et molécules diverses excitées) et une quantité très limitée d'oxygène ; la technologie sur lit fluidisé d'Energkem, qui implique l'usage de gaz réactants et le mélange de la biomasse à l'aide de matériaux inertes (silice, mullite ou sable d'olivine) chauffés à 1000°C en présence d'air ou d'oxygène enrichi; et la variante Fischer-Tropsch, qui combine une pyrolyse, suivie



par une synthèse de Fischer-Tropsch[28].

### II .8.1. Les utilisations :

La gazéification a un meilleur rendement que la combustion et la pyrolyse et le gaz de produit est en général utilisable dans les chaudières sans problème, et du fait de la quasi absence de goudrons, il pourrait être utilisé dans les moteurs pour cogénération après un « nettoyage » du gaz.[29]

Le syngas et l'hydrogène sont des sources d'énergies vertes, et le syngas pourrait être converti en produits tels : le méthanol, le diméthylether, et le diesel synthétique, mais beaucoup de travail reste à faire pour augmenter l'efficacité énergétique de la gazéification et limiter la formation de goudron et charbon. Pour ce, le craquage catalytique est reconnu comme une des méthodes les plus efficaces pour réduire la formation de goudron, et ce même à de basses températures (600-900°C) [24]. En général, majeure est la température, majeure la formation de crasse dans les équipements, mais cela pourrait être contourné en augmentant plutôt la pression .

### II .8.2. Elimination des goudrons: [29]

Il est essentiel d'éliminer les goudrons car la viabilité du procédé de gazéification en dépend. A l'heure actuelle il existe deux méthodes d'élimination des goudrons :  
Les méthodes primaires agissant directement sur l'étape de gazéification en adoptant des conditions optimales de production de bioSNG.

Par ailleurs, l'élimination des goudrons peut être classée en deux types :

- l'élimination chimique, qui comprend le craquage thermique, le reformage à la vapeur d'eau ainsi que catalytique
- l'élimination physique.

### II .8.3. Avantages de la gazéification : [29]

La technologie de gazéification offre l'opportunité d'utiliser les équipements modernes de production d'électricité tels que les turbines à gaz pour la cogénération de chaleur et d'électricité infiniment plus performantes que les solutions traditionnelles peu efficaces issue des cycles à vapeur. Ses principaux avantages peuvent être résumés ainsi •

- Rendement électrique élevé avec les turbines à gaz et les moteurs, même sur de petites puissances Cette amélioration des rendements permet une augmentation de tailles des installations biomasse sans accroître le rayon d'approvisionnement ce qui à un impact significatif sur les coûts d'investissements et d'approvisionnement.
- diminution significative des coûts de réduction des émissions du fait des faibles volumes de gaz mis en jeu par rapport à la combustion. La gazéification est une technique d'autant plus intéressante que l'on attache un grand intérêt aux problèmes de pollution et d'environnement.



En effet, au delà de l'aspect substitution, avec ces procédés il est possible de mieux contrôler les émissions

## **II .9. Les conversions biochimiques de la biomasse :[29]**

La conversion biochimique de la biomasse est un processus de décomposition par action des bactéries. Elle peut être contrôlée de façon à obtenir un combustible facilement exploitable. Trois filières de conversion biochimique de la biomasse sont particulièrement intéressantes. Deux grandes filières sont destinées à la production de biocarburants de première génération (le bioéthanol pour les véhicules à essence et les huiles végétales ou biodiesel pour les véhicules diesel), et une voie pour le biogaz.

### **II .9.1. La fermentation :[29]**

L'éthanol produit par la biomasse est un carburant de grande qualité. Il peut également être transformé, par vapo-reformage, en hydrogène pour une utilisation en pile à combustible. Le procédé de production du bioéthanol dépend de la nature de la biomasse : les sucres (provenant de la canne à sucre ou des betteraves) sont fermentés. Pour l'amidon et la cellulose, il faut d'abord casser les longues chaînes des molécules de polysaccharides par une hydrolyse acide ou enzymatique avant que les sucres résiduels puissent fermenter et donner de l'éthanol. La fermentation alcoolique se définit, comme la transformation du glucose en éthanol. Cette voie métabolique suit l'enchaînement des réactions de la glycolyse, le pyruvate étant ensuite transformé en éthanol via l'acétaldéhyde. Le bioéthanol peut être employé directement, pur ou en mélange dans les essences, ou après transformation en ETBE (éthyl tertio butyl éther). [27]

### **II .9.2. La transestérification :**

Le biodiesel est obtenu par extraction des huiles de plantes oléagineuses riches en lipides comme le colza ou le tournesol. Des esters de glycérol et de méthyle sont obtenus à l'aide d'un procédé connu sous le nom de transestérification. En général, le procédé en question suppose l'incorporation d'hydroxyde de sodium et de méthanol à l'huile de source afin d'extraire l'ester méthylique d'huile végétale (EMHV). Le biodiesel est utilisé en mélange dans le gazole pour les moteurs diesel.[27]

### **II .9.3.La digestion anaérobie (ou bio méthanisation) :**

La digestion anaérobie est un procédé qui intervient naturellement et où le produit de la biomasse est décomposé, ou digéré, par les bactéries dans un milieu sans air. Les bactéries anaérobies entraînent la production de biogaz riche en méthane (et en gaz carbonique) contenant environ 20 à 40% de la valeur énergétique de la biomasse de départ. C'est une technologie éprouvée et largement utilisée pour le traitement des déchets organiques humides (80 à 90% d'humidité). Le biogaz est utilisé directement dans les moteurs ou les turbines à gaz. Sa qualité

peut être améliorée en éliminant le CO<sub>2</sub>. Si le gaz est utilisé dans un moteur pour produire uniquement de l'électricité, le rendement global de la transformation biomasse - électricité est compris entre 10 et 16%.

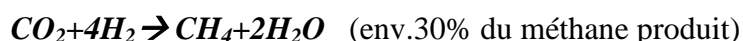
Par conséquent et en raison de la concurrence entre le développement des biocarburants et les agricultures vivrières, d'autres ressources existent, sous la forme de biomasse lignocellulosique; il s'agit essentiellement de résidus d'origine agricole (pailles, tiges de maïs), de résidus forestiers et de sous-produits de la transformation du bois. Les déchets organiques des industries papetières et agroalimentaires représentent d'importants gisements et offrent aussi un fort potentiel d'élargissement de l'éventail des matières carbonées transformables en biocarburants (biocarburants de seconde génération).[32]

### II .9.3.1.Etapes microbiologiques et biochimiques de la méthanisation :

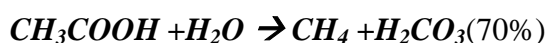
L'ensemble des réactions, multiples et complexes, se déroulant dans un digesteur peut se diviser en quatre étapes principales caractéristiques de l'action de différents groupes de micro-organismes: hydrolyse, fermentation acidogène (acidogénèse), acétogénèse et méthanogénèse

- **L'Hydrolyse** : par laquelle les macromolécules qui constituent la matière organique se décomposent en petites molécules solubles, à l'origine du jus de fermentation : par exemple, la cellulose est transformée en sucres solubles tels que le glucose ou le cellobiose.
- **L'ACIDOGENESE** : les molécules simples (monomères) sont transformées sous l'effet des bactéries en acides de faible poids moléculaire (acide lactique et acides gras volatils) et des alcools tels l'éthanol. Du bicarbonate et de l'hydrogène moléculaire sont produits.
- **L'ACETOGENESE** : C'est ici qu'interviennent des bactéries réductrices acétogènes et des bactéries sulfato-réductrices pour transformer certains produits issus des phases précédentes (acides gras volatils et alcools) en H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> et acétate. En présence de sulfate, de l'hydrogène sulfuré (H<sub>2</sub>S) est aussi généré lors de cette étape de transformation
- **La METHANOGENESE**: dernière phase au cours de laquelle l'acétate (CH<sub>3</sub>COO<sup>-</sup>), l'hydrogène et le bicarbonate (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) sont convertis en méthane par des microorganismes méthanigènes. Enfin les bactéries méthanogènes utilisent dans cette étape les précurseurs suscités pour produire du méthane Les réactions sont les suivantes :

Réduction du CO<sub>2</sub> :



Décarboxylation de l'acide acétique :



Ces étapes biochimiques et microbiologiques se déroulent simultanément ou séparément et à différentes vitesses suivant le procédé anaérobie utilisé.

En effet, l'hydrolyse des composés lignocellulosiques limite l'ensemble des réactions. Par contre, la phase acidogène est la plus rapide et, selon la quantité du substrat, il peut se produire une accumulation d'acides gras volatils.

La stabilité de la fermentation dépend de l'équilibre de ces phases et de l'activité des différentes flores.

Les bactéries réductrices du CO<sub>2</sub> et les sulfatoréductrices, en compétition avec les méthanogènes, assurent le maintien de la pression partielle en H<sub>2</sub> dont l'accumulation serait toxique. De la même façon, les bactéries acétoclastes préviennent l'accumulation des acides. Ainsi, suivant le substrat considéré, l'étape limitante sera différente. Dans le cas de produit lignocellulosiques, il y a peu de risques d'intoxication par accumulation d'acides, ce qui n'est pas le cas pour des effluents liquides à forte teneur en matière organique dissoute.[30]

### **II.9.3.2. Les paramètres et les conditions de la méthanisation :**

La détermination des conditions de fermentations permet d'assurer une production optimale du biogaz. En effet, la quantité de biogaz produite rapportée à la quantité de matière brute introduite.

### **II.9.3.2. Les paramètres physico-chimiques de la fermentation :**

#### ✓ **La température**

✓ La fermentation méthanique anaérobie peut se dérouler dans trois gammes de températures, selon les préférences d'écologie de température de la flore :

✓ -Psychrophiles : 15-25 °C

✓ -Mésophiles : 25-45 °C

✓ -Thermophiles : 55-65 °C

Toute fois, l'intensité de l'activité des micro-organismes, dont dépend la production de méthane, est fonction de la température du milieu. Dans la zone de 32°C - 40°C, on considère généralement que la production du biogaz augmente de 5% lorsque la température croît de 1°C[36]. C'est pourquoi, la plupart des réacteurs fonctionnent en mésophilie (35°C). Les installations de grande taille, fonctionnent très souvent, en thermophilie (50°C).

Le potentiel méthanogène d'un substrat étant déterminé par sa composition, une température plus élevée permet de produire le même volume de gaz dans un temps beaucoup plus court. L'effet de la température est particulièrement sensible sur la phase d'hydrolyse.

L'hydrolyse de la cellulose en thermophilie est 5 à 6 fois supérieure à celle observée en mésophilie. Donc l'activité enzymatique des bactéries dépend étroitement de température. vers 10

°C, cette activité es faible ,au dessus de 65 °C les enzymes sont détruits par le chaleur. cette activité, visualisée par la production du biogaz. [30]

### **II .9.3.3. Les enjeux de la méthanisation :**

Les enjeux de la méthanisation sont multiples et concernent plusieurs acteurs selon leurs points de vue. Les collectivités locales et autres sociétés de services, les industriels et même les agriculteurs voient la méthanisation comme un moyen de traiter leurs déchets à faible coût mais sont peu réceptifs à la valorisation énergétique pour différentes raisons (coût, problèmes d'exploitation, manque d'information). La méthanisation semble être, par contre, un enjeu important et de long terme pour l'ensemble de la société en ce qui concerne le bilan énergétique global et les problèmes écologiques dus à l'effet de serre résultant de l'utilisation des énergies fossiles. La méthanisation est dire une technologie propre. Nous pouvons néanmoins considérer que les enjeux sont de deux types : les enjeux environnementaux et les enjeux économiques. [30]

### **II .9.3.4. Biogaz : [30]**

Le biogaz est un gaz combustible résultant d'une fermentation de la biomasse humide. Il est un mélange de méthane et de gaz carbonique.

Le biogaz se caractérise par sa composition chimique et les caractéristiques physiques qui en découlent. La quantité et la composition chimique du biogaz produit en fermenteur dépendent du substrat, de sa DCO, du débit d'alimentation du digesteur s'il s'agit d'une alimentation en continu, de la qualité de l'agitation, du temps de séjour dans le réacteur, de la température de fermentation, etc.

Le gaz brut, de composition moyenne, a un pouvoir calorifique de l'ordre de 5500 Kilocalories ce qui avoisine 6 à 6.5 KW/nm<sup>3</sup>.

Cette valeur équivalent à :

- 0.4 litre de gaz de butane brute
- 0.6 litre de mazout
- 2 kilogrammes de charbon
- 5 kilogrammes de bois.

## *Chapitre III*

*Etudes interprète des résultats passés.*

### III.1. Production d'hydrogène par gazéification du bois et du charbon de bois par Dr. Kamel Hélouâni : [33] [34]

\_ Un grand nombre de travaux de recherche portant sur la conversion thermochimique de la biomasse par pyrolyse, carbonisation et gazéification ont été réalisés.

Ces travaux ont traité les problèmes associés à la réalisation et l'optimisation de ces procédés.

Une autre étude qui a été faite par un doctorant chercheur tunisien MR. **KAMEL HELOUANI** SUR LA PRODUCTION D'HYDROGENE PAR GAZEIFICATION THERMOCHIMIQUE DU BOIS ET DE CHARBON DE BOIS, ce dernier a proposé une synthèse sur l'étude des mécanismes réactionnels de la gazéification du bois et du charbon de bois.

D'après Mr. KAMEL HALOUANI La récupération de l'hydrogène s'obtient à partir de transformations thermochimiques de la biomasse. Ces transformations peuvent se dérouler en une seule étape ou en deux étapes successives indépendantes. Et pour atteindre un bon rendement il faut baser fondamentalement sur un combustible propre et renouvelable.

\_ Dans ce travail, MR. KAMEL A PROPOSER d'étudier les mécanismes réactionnels de **la carbo-gazéification** du bois et de **l'hydro-gazéification** du **charbon de bois** en se basant sur les réactions principales et les bilans de matière et d'énergie.

#### III.1.1. Gazéification du bois par une seule étape :

C'est un procédé qui se réalise sous une température très haute ( très élevée ) sur lequel notre biomasse végétale sera gazéifiée par une réaction de carbo-gazéification à la vapeur d'eau .

#### III.1.2. Résultats :

L'obtention en fin de la réaction un gaz qui est riche en hydrogène, mais il contient encore de méthane et des goudrons. Donc c'est pour cela faut pas utiliser le mélange directement a cause de la présence de goudrons.

**Pour le bois sec  $CH_{1,44}O_{0,66}$  par tonne de bois sec :** la quantité maximale d'hydrogène produite est de l'ordre de 1920 Nm<sup>3</sup> .

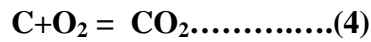
#### III.1.3. Discussion :

C'est vrai que cette quantité est importante par rapport au procédé en 02 étape mais le problème c'est que cette gazéification nécessite une grande énergie à une température élevée (800-900°C), c'est parce que l'hydro gazéification est une réaction endothermique .

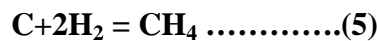
La gazéification à l'air du bois de formule brute  $CH_{1,44}O_{0,66}$  à h(%) d'humidité relative s'écrit :



Les réactions de la gazéification, en présence d'une quantité d'air calibrée sont théoriquement de deux ordres :

**Réactions principales :****Réactions secondaires :**

Ces réactions nécessitent une température très élevée ( de 800 à 1000° C ) , en plus ce sont des réaction très rapides , et puis elle sont accompagnées avec une autre réaction de formation de méthane par réduction d'hydrogène .



Ces mécanismes sont relativement bien connus et elle atteint facilement l'état d'équilibre à haute température.

**III.2. Gazéification du bois par deux étapes indépendantes :****III.2.1. La pyrolyse (carbonisation) :**

La pyrolyse c'est une première étape ( carbonisation) elle se passe en absence de l'oxygène en fonction de la température .

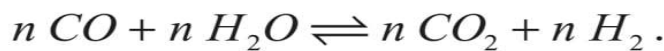
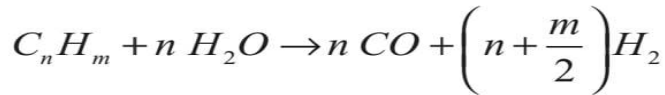
**III.2.2. Résultats :**

- Pour le bois, parmi les transformations qui ont été remarquées durant cette réaction on cite :
- Pour une température qui est inférieure à 120°C faut éliminé l'eau qui se trouve en bois ,ca veut dire il faut un séchage du bois .
  - Pour un écart de température qui se situe entre 120 et 250°C, y avait une dégradation totale des hémicelluloses avec formation d'acides (formique, acétique) et de mono-alcools.
  - Pour les températures comprises entre 250 et 500°C, une dégradation qui s'est crée de la cellulose et de lignine, avec une formation de produits légers (CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, ...) et de produits plus lourds appelés les goudrons (molécules poly aromatiques),
  - Pour les températures supérieures à 500°C, une dégradation partielle des goudrons s'est crée avec la formation d'un résidu solide riche en carbone qui n'est rien d'autre que le charbon de bois. En définitive, la pyrolyse conduit à :
    - un gaz non condensable (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, ...)
    - un gaz condensable de produits hydrosolubles (acides, alcools, ...)
    - un résidu solide riche en carbone (charbon de bois)

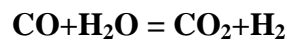
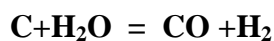
**III.2.3. L'hydro-gazéification :**

La transformation de la phase gazeuse est un hydro reformage en présence ou non de catalyseurs .

Les réactions mises en jeu dans cette seconde étape sont du type :



Cette transformation a posé plusieurs problèmes a cause de la complexité du mélange ,



Le peu d'hydrogène dans le charbon permet d'éviter la formation d'hydrocarbures et le mélange réactionnel gazeux est essentiellement composé des quatre constituants de la réaction de Shif

Dans le cas du bois, la pyrolyse lente permet d'obtenir 30 % de charbon. Par suite la production maximale d'hydrogène par tonne de bois sec est de l'ordre de 1120 Nm<sup>3</sup> avec un apport d'énergie extérieur pratiquement nul en dehors des mises en route des unités .

**III.3.Conclusion :**

Pour conclure, plusieurs résultats ont été obtenus après cette étude, on cite :

- ✓ Les proportions en gaz, goudrons et charbon dépendent de deux paramètres : le niveau de température et le temps d'atteinte de la température.
- ✓ Le temps d'atteinte de la température est dépendant du rapport surface/volume des éléments pyrolyses de la biomasse.
- ✓ Pour favoriser la production d'hydrogène, la gazéification de la biomasse devra être précédée par une pyrolyse permettant de concentrer les éléments polluants, soit dans la phase gazeuse, soit dans le solide résidu
- ✓ Si la température de pyrolyse est inférieure à 500°C, la production d'hydrogène se fera par gazéification du résidu solide
- ✓ la production d'hydrogène se fera par conversion des gaz de pyrolyse.
- ✓ La voie qui permet de produire une quantité importante d'hydrogène est celle mettant en œuvre les deux étapes malgré quelle nécessite un investissement initial.



### III.4. La pyrolyse : [34]

Ce procédé consiste à chauffer la biomasse sous une température variant entre 923 C° et 1073 C° et une pression de 0.1 à 0.5 Mpa et en absence d'air, là où la biomasse se transforme en huiles liquides et composés de résidus solides de charbon de bois et de composant gazeux.

On peut dire que la pyrolyse se trouve sous deux formes :

La pyrolyse lente : là où la production d'hydrogène est trop faible

La pyrolyse rapide : cette pyrolyse se fait sous une haute température et elle permet de produire une quantité importante d'hydrogène.

Parmi les produits de la pyrolyse, on cite :

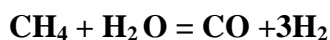
**Les produits gazeux** : H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub> et autres gaz, dépendamment du type de la biomasse;

**Les produits liquides** : les goudrons et les huiles qui restent sous une forme liquide à température ambiante ainsi que l'acétone, l'acide acétique, etc.;

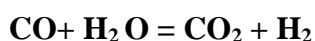
Lorsque le temps de résidence et la température sont adéquats, l'hydrogène se produit directement après une pyrolyse rapide :



Il y a la transformation de méthane et d'autres hydrocarbures en hydrogène dans la 1<sup>ère</sup> réaction par le vaporeformage :



Il y a aussi la conversion eau gaz pour transformer le CO en CO<sub>2</sub> et pour produire aussi l'hydrogène :



### III.5. Gazéification conventionnelle :

Un autre procédé qui s'appelle la gazéification conventionnelle qui consiste à convertir la biomasse sous des températures très élevées (vers 1200 C°), cette conversion s'exprime comme suit :

**Biomasse + chaleur + vapeur d'eau → H<sub>2</sub> + CO + CO<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub> + autres hydrocarbures + résidus carbonisés.**

Ce type de gazéification se passe en présence d'oxygène contrairement à la pyrolyse, et là on peut optimiser la production d'hydrogène avec le méthane CH<sub>4</sub> par vaporeformage et la conversion gaz eau en utilisant le CO.

Des chercheurs ont confirmé que le type de la biomasse qui est utilisé dans ce procédé est la biomasse qui contient un taux d'humidité inférieur à 35 %.

**III.6.Problèmes rencontrés :**

Parmi les problèmes posés dans ce procédé on cite :

Le carbone liquéfié, qui se forme sur les parois de réacteur , va se refroidir , après il se solidifie ce qui va former ce qu'on appelle GOUDRON qui est très difficile à enlever .ce goudron peut perturber la réaction .

**III.6.1.Solution :**

Pour éviter ce genre de problème il faut modifier la conception de notre réacteur d'une manière qui évite la formation de ces produits goudronnés qui gênent la marche de notre processus et pour régler ce problème on doit appliquer un traitement antiadhésif sur les parois interne de notre réacteur pour empêcher la formation de carbone et faciliter le nettoyage.

Conversion de la biomasse en milieu supercritique :

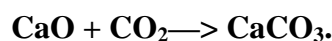
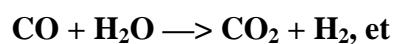
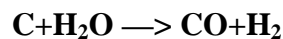
Une nouvelle méthode de gazéification a été utilisée et elle est nommée Hydrogen Production by Réaction IntegratedNovelGasification.

**III.7. Conversion de la biomasse dans un milieu supercritique :**

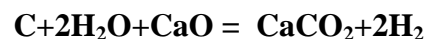
Le principe de cette gazéification est l'intégration de la réaction des hydrocarbures avec l'eau de-là réaction eau gaz et de l'absorption de CO et d'autres polluant dans le même réacteur.

La production d'hydrogène dans ce cas est étudiée dans une température qui se trouve entre 1146 et 1246 °C (873-973 K) en utilisant un autoclave et une pression entre 12 et 105 MPa.

On y retrouve les réactions suivantes:



La réaction qui résume ce processus :



Les avantages :

La biomasse traitée dans ce procédé là, peut contenir un taux d'humidité supérieur à 35% , contrairement a la gazéification conventionnelle .

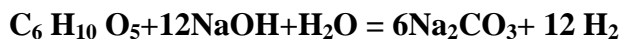
**III.8.Conversion thermochimique en milieu alcalin :**

Cette méthode est considérée comme la meilleure méthode de conversion car elle empêche la formation de gaz a effet de serre CO2 ou bien le CO , cela veut dire qu'elle permet de produire un hydrogène pur .

### III.8.1.Principe de procédé :

faisant réagir de la biomasse cellulosique, un oxyde de métal alcalin hydraté (NaOH), ainsi que de la vapeur d'eau à des températures relativement basses (200 oC - 400 OC) et à pression atmosphérique.

La réaction générale :



Ce type de conversion nécessite l'utilisation des catalyseurs : **nickel (Ni)**, **cobalt(Co)**, **rhodium (Rh)** ou **ruthénium (Ru)** supportés sur une céramique telle que l'oxyde d'aluminium (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) , ces catalyseur participent à l'amélioration de la production d'hydrogène .

### III.8.2.Les avantages :

La production d'**h<sub>2</sub>** d'une haute pureté en évitant la formation de gaz à effet de serre qui est le **CO<sub>2</sub>** et le **CO**.

Ce procédé se fait en discontinu.

### III.9.Analyse 01 : ( la gazéification par le procédé BFR )

Des analyses séparées de gazéification ont été fait par le procédé BFR sur de la cellulose (en poudre, d'une grosseur de 20 microns provenant de chez Sigma), l'hémicellulose (du xylane, un composé principal de l'hémicellulose provenant de chez Sigma) et la lignine (de l'organosolve de chez Aldrich) .

La température : 340 °C.

#### III.9.1.Résultats :

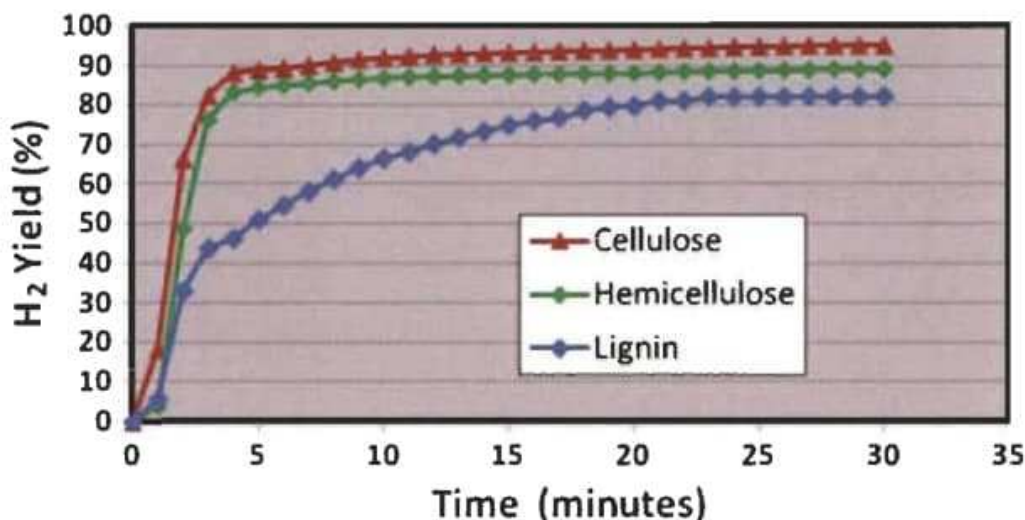


Figure III-1 : Conversion des différents composants de la biomasse par le procédé BFR à une température de 340 °C

### III.9.2. Discussion et interprétation

D'après le graphe :

#### \_ Pour la lignine :

Le rendement en hydrogène augmente lentement au cours du temps jusqu'à sa valeur maximal 80%.

#### \_ Pour la hémicellulose et la cellulose :

On remarque que le rendement en hydrogène augmente très rapidement par rapport à la lignine au cours de temps jusqu'à sa valeur maximale 100%.

On peut déduire que, la quantité d'hydrogène produit ici est comprise entre 80 et 100%

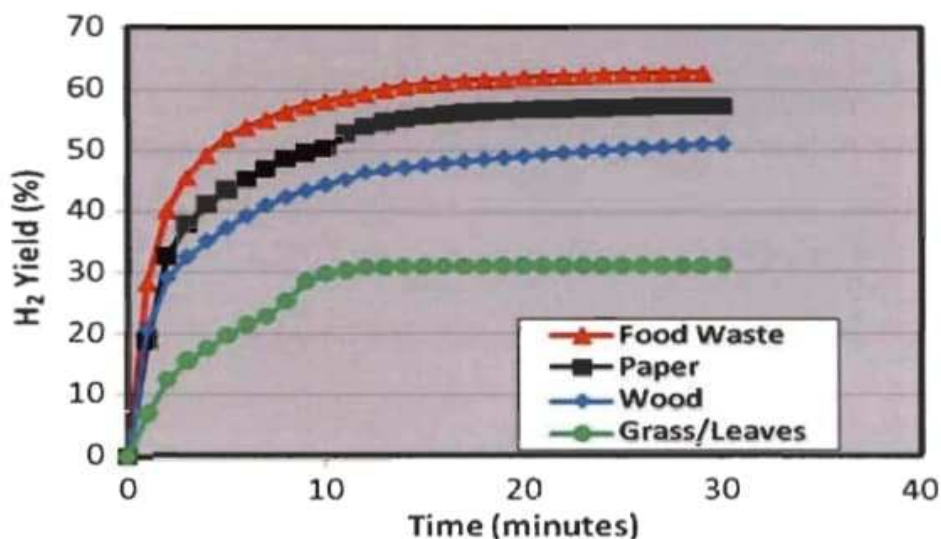
Le temps de résidence est compris entre 5 minutes et 20 minutes .

### III.10. Analyse 02:

\_ des tests sur différentes matières premières, des restants de tables, du papier, du bois et de l'herbe et des feuilles. Tous ces entrants sont convertis pour produire de l'H<sub>2</sub> .

Température : 260° C.

#### III.10.1. Présentation graphique des résultats et interprétation :



**Figure III-2 : Rendement de la conversion de différentes substances pour produire de l'H<sub>2</sub> à une température de 260 °C dans un seul réacteur.**

\_ Ici ils ont essayé de diminuer la température de la réaction surtout le temps de rétention pour réduire le coût du procédé , pour le catalyseur ils ont utilisé un catalyseur plus adéquat pour la réaction ciblée, ce qui diminuerait la température et le temps de rétention.

\_ On remarque que la quantité d'hydrogène produit est comprise entre 30% et 60%.

\_ La quantité d'hydrogène produit quand on utilise ( grass/leaves ) augmente doucement dans les 10 premières minutes puis elle se stabilise sur la valeur 30% ( sa valeur maximal )

\_ pour ces types de biomasse ( wood + paper+foodwaste ) : la quantité d'hydrogène augmente rapidement au cours du temps jusqu'à les valeurs maximales qui sont : 50% , 55% ,60%

### III.10.2. Stœchiométrie de la réaction :

la matière cellulosique est mise en présence de soude et d'eau pour ensuite chauffer le mélange en absence ou en présence de catalyseurs. La réaction chimique sans catalyseur est la suivante:



Les quantités des réactifs sont:

C<sub>6</sub> H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>: 15.0 g

NaOH: 44.4 g

Ni/Al-Si: 6.0 g

H<sub>2</sub>O: 113.0 ml

le mélange introduit dans le réacteur scellé, il est purgé avec de l'argon afin de retirer l'air et obtenir une atmosphère inerte. Cette purge est répétée de 3 à 4 fois.

### III.10.3.Résultat :

Selon les calculs théoriques, les quantités d'H<sub>2</sub> et de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> qui seraient obtenues sont les suivantes:

H<sub>2</sub> : 2.24 g

Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>: 58.83 g

### III.11.Analyse 03 :

#### III.11.1.Les réactifs et les produits :

##### Cellulose :

La cellulose avait la forme de feuille de pâtes communément appelée «feuille de buvard» dans laquelle la cellulose est présente à 99 %. Le 1 % restant contient des impuretés et des traces de lignine. Afin d'augmenter l'efficacité de la réaction, la feuille est broyée dans un déchiqueteur

#### III.11.2.Catalyseur :

Les catalyseurs peuvent être à base de métaux précieux (Rh, Ru, Pt ou Pd) ou des métaux de transition (Ni, Co, Fe ou Cu) supporté par du Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

#### III.11.3.Résultats :

\_D'après notre interprétation on peut déduire que :

le meilleur catalyseur qui assure la formation d'une quantité importante d'hydrogène est le Ni/AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

La température la plus convenable et la plus adéquate à notre réaction se trouve dans l'intervalle [500°C\_550°C].

La température la plus adéquate a la réaction et qui assure la production d'une grande quantité de CH<sub>4</sub> est de 120° à 150°C en présence d'un catalyseur bien sur.

#### III.11.4.Présentation graphique et interprétation :

\_D'après les graphes on voit que :

En présence de plusieurs catalyseurs, la quantité de CH<sub>4</sub> formée est inférieure que la quantité produite en absence du catalyseur.

#### III.12. Etude sur la conception d'un réacteur à biomasse pour la production d'hydrogène : [34]

##### III.12.1.Montage :

Le réacteur est un cylindre en acier inoxydable avec un diamètre extérieur de 10.16 cm et d'une épaisseur de 0.57 cm . À une extrémité, le cylindre est fermé par un bouchon soudé d'une épaisseur d'environ 0.64 cm , ce qui représente le fond du réacteur.

pour contrer les problèmes de résidus goudronnés il s'agit d'appliquer Un traitement antiadhésif d'électro-polissage est appliqué aux parois internes du réacteur , pour appliqué ce traitement , il faut tremper le réacteur dans une solution qui contient l'acide sulfurique (H<sub>2</sub>S<sub>0</sub>4), d'acide phosphorique (H<sub>3</sub>P<sub>0</sub>4) et d'eau sur une certaine période de temps.

Ensuite, faire une électrolyse en se servant du réacteur comme une électrode, on obtient une surface anticorrosif avec aucune concentration de contrainte par polissage électrolytique.



Figure III-3 : Premier réacteur.

**III.12.2. Le but de travail :**

L'objectif de cette partie expérimentale est :

- 1) Étudier le comportement de la réaction en milieu facilitée, avec un catalyseur adéquat, pour produire l'hydrogène à une température inférieure à 300 °C .
- 2) Concevoir un réacteur et réaliser un banc d'essai de conversion thermochimique et mesurer les paramètres physiques (pressions, températures, temps de résidence) pour établir des relations avec la quantité d'hydrogène produite.

**III.12.3. Le principe de travail :**

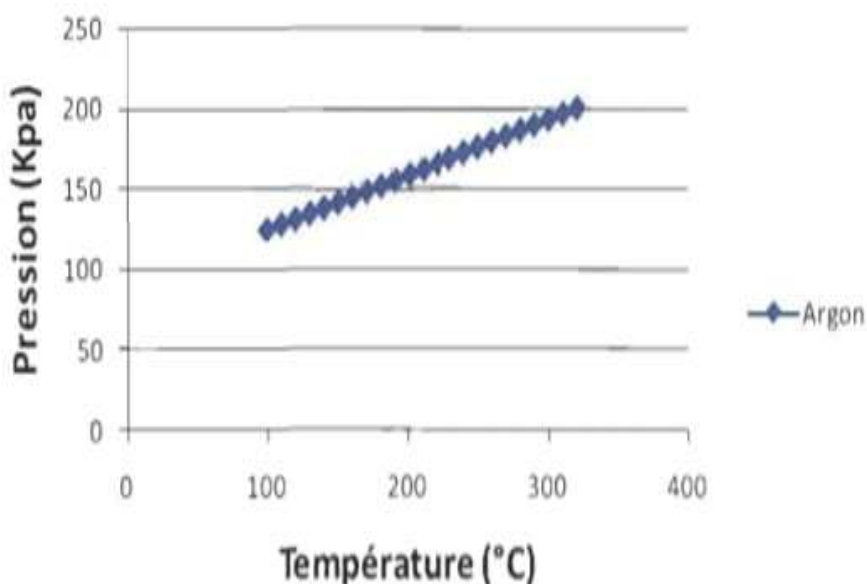
Pour connaître la pression appliquée par l'hydrogène sur le réacteur faut d'abord connaître la pression appliquée par l'argon sur le réacteur, et pour connaître la pression de l'argon il faut la calculer à partir de la loi de gaz parfait :

Il faut connaître le nombre de moles initial d'argon dans le réacteur à une température et pression ambiante

On a :  $P.V=n.R.T$  avec :  $P = 101.3 \text{ KPa}$

$$T = 25 \text{ °C}$$

DONC après les calculs on obtient :  $n = 0.060 \text{ mol}$ , c'est là où on peut déterminer la pression de l'argon en fonction de la température avec l'équation de VIRIEL, et à partir de cette pression on peut déduire celle de l'hydrogène.



**Figure III-4 : Graphique de la pression exercée par l'argon présent dans le réacteur en fonction de la température.**

### III.12.4. Résultats et présentation graphique :

D'après le graphe, on remarque que la pression de l'argon commence à augmenter petit à petit à partir de 125 Kpascals (100°C) vers sa valeur maximale 200 Kpascals (300°C) dans un écart de température de 200 °C.

**NB . Cette courbe-témoin permet de donner un support visuel au début de la production d'H<sub>2</sub> .elle est présente dans les graphes suivants qui montrent l'évolution de la pression de notre système H<sub>2</sub>+ARGON en fonction de la température.**

### III.13. Etude graphique sur la variation de pourcentage d'hydrogène en fonction de temps de résidence :

#### III.13.1. Manipulation 1 :

La première manipulation a été réalisée sur un écart de température qui varie entre 225 °C et 253 °C.

#### III.13.2. Résultats et présentation graphique :

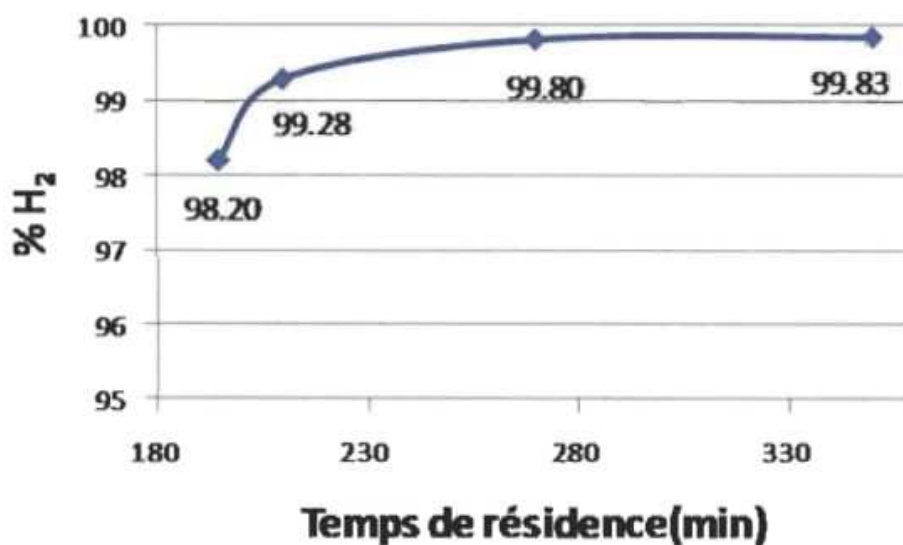


Figure III-5 : Pourcentage d'H<sub>2</sub> produit en fonction du temps pour la Manipulation 01 (T= 225-253 °C).

#### III.13.3. Interprétation graphique :

D'après le graphe on remarque que :

Le pourcentage d'hydrogène commence à augmenter doucement à partir de sa valeur initiale 98.20 % dans la minute 195 vers la valeur 99.28 % dans la minute 210.



### III.14.Étude graphique sur la variation de pourcentage d'hydrogène produit en fonction de la température :

#### III.14.1.Manipulation 02 :

Dans cette manipulation et la suivante un contrôleur de type PID qui a été placé sur le banc d'essai pour maintenir la température, 300° C , l'objectif est de déterminer la pression finale exercée.

Donc, c'est pour ce là une deuxième expérience a été fait sous des conditions opératoires similaires pour valider les résultats obtenus.

\_ Voici le tableau suivant qui contient les conditions opératoires et les résultats obtenus :

**Tableau III-1 : Conditions opératoires de la Manipulation 02**

Conditions opératoires	Valeurs
Durée de la production H <sub>2</sub> (h)	1.50
Température d'opération maximale (°C)	300
Coefficient B de Viriel (cm <sup>3</sup> /mol)	36.64
Coefficient C de Viriel (cm <sup>3</sup> /mol)	1.13×10 <sup>-2</sup>

#### III.14.2.Résultats et interprétation graphique :

\_ voici le tableau suivant qui contient les résultats obtenus après notre manipulation 02 :

**Tableau III-2 : Résultats de la manipulation 02**

Paramètres produit	Résultats
Quantité H <sub>2</sub> produit (g)	<b>1.71</b>
Présence d'hydrogène dans le mélange gazeux (%)	<b>99.46</b>
Pression finale exercée par l'hydrogène (KPa)	<b>2701.47</b>

\_D'après les tableau, on peut dire que cette expérience a été fait sous une température de 300°C , elle a pris 1 heure et 50 minutes pour atteindre sa fin , avec une production de 99.46% d'hydrogène qui a une pression de 2701.47 Kpas .

D'après le tableau on voit que l'hydrogène est présent dans le mélange gazeux avec 99.46% ( 1.71 grammes ) .

**III.14.Manipulation 03 :**

Ici, la température a diminué de 2°C par rapport à la manipulation 02, le but de cette manipulation est la production d'hydrogène à une température plus basse.

Voici les 02 tableaux qui contiennent-les conditions opératoires et les résultats obtenus.

Tableau : Conditions opératoires de la Manipulation 03.

**III.14.1. Conditions opératoires de la manipulation 03 :**

Voici le tableau suivant qui contient les conditions opératoires de cette manipulation :

**Tableau III-3 : les conditions opératoires de la manipulation 03.**

Conditions opératoires	Valeurs
Durée de la production H <sub>2</sub> (h)	1.25
Température maximale d'opération (°C)	298
Coefficient B de Viriel (cm <sup>3</sup> /mol)	36.17
Coefficient C de Viriel (cm <sup>6</sup> /mol <sup>2</sup> )	1.15×10 <sup>-2</sup>

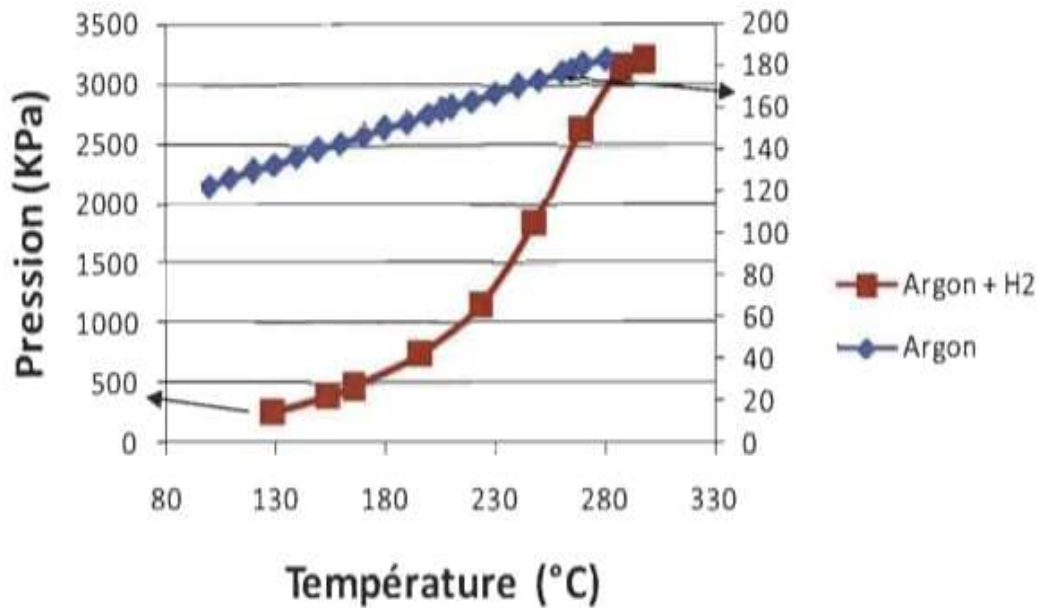
**III.14.2. Résultats et interprétation :**

Voici le tableau qui contient les résultats de la manipulation 03 :

**Tableau III-4 : les résultats obtenus de la manipulation 03.**

Paramètres	Résultats
Quantité d'hydrogène produit (g)	1.92
Présence d'hydrogène dans le mélange gazeux	99.63
Pression finale exercée par l'H <sub>2</sub> (KPa)	3014.29

D'après les résultats dans le tableau, cette réaction a pris 1heure et 23 minutes, sous une température de 298°C , pour une production de 99.63 % d'hydrogène avec une pression de 3014.29 Kpas.



**Figure III-6 : la variation de la pression du système ( Argon+ H<sub>2</sub>) en fonction de la température**

#### Interprétation graphique :

Le graphe suivant nous montre la variation de la pression d'argon et de système (argon+H<sub>2</sub>) en fonction de la température

On remarque qu'entre 230 °C et 280 °C la pression augmente rapidement, donc en pleine production d'H<sub>2</sub>.

#### III.15.Manipulation 04 : (la Gazéification de copeaux de bois)

\_ Les exploitants de secteur forestier ont de la difficulté à se départir de certains résidus comme par exemple les résidus de parterre de coupe ou de transformation du bois , alors , il est nécessaire de tirer des produits de ces résidus .

\_ La production d'hydrogène à partir de résidus forestiers est envisageable, les copeaux de bois contiennent la cellulose, et la hémicellulose et la lignine.

la cellulose présente dans les copeaux de bois peut réagir en milieu alcalin pour produire de l'H<sub>2</sub>

Pour cette expérience, il n'y a pas eu de contrôleur de température.

#### Composition de mélange :

##### Copaux de bois :

cellulose (38-48 %),

hémicellulose (22-44 %)

lignine (15-25 % )

NaOH

Eau

catalyseur

\_ Voici le tableau suivant qui contient les conditions opératoires de la manipulation 04 pour la gazéification des copeaux de bois :

**Tableau III-5 : les conditions opératoires de la manipulation 04.**

Conditions opératoires	Valeurs
Durée de la production H <sub>2</sub> (h)	2.75
Température d'opération (°C)	296-508
Coefficient B de Viriel (cm <sup>3</sup> /mol)	ND
Coefficient C de Viriel (cm <sup>6</sup> /mol <sup>2</sup> )	ND

### III.15.1. Résultats et interprétation :

Voici le tableau qui contient les résultats de cette manipulation :

**Tableau III-6 : les résultats de la gazéification des copeaux de bois .**

Paramètres	Résultats
Quantité H <sub>2</sub> produit (g)	ND
Présence H <sub>2</sub> dans le mélange gazeux (%)	<b>100</b>
Pression finale exercée par l'H <sub>2</sub> (KPa)	3213.52

\_D'après les résultats on voit que la pourcentage d'hydrogène produit en fin de la réaction est à 100%

\_ La production d'hydrogène dans cette manipulation a été réalisée sous une température qui varie entre 296 °C et 508 °C, elle a pris 3 heures et 15 minutes, elle est un peu lente par rapport aux manipulations précédentes,

\_ Dans cette manipulation. Le mélange des copeaux de bois avec le NaOH, l'eau ainsi que le catalyseur a été effectué 10 h avant la conversion, ce qui correspond au temps d'imprégnation.

### III.16. Manipulation 05 : (la gazéification des boues de désencrage )

\_ Les boues de désencrage sont des résidus du procédé de désencrage dans les usines des pâtes et papier. Ces boues sont constituées de charges minérales, comme du calcium, de kaolin, Pour ce qui est de l'encre, elle est faite à base d'huile végétale comme le soya ou le canola.

Les fibres représentent environ 20 % de la composition de ces boues alors que plus de 50 % des boues sont des matières inertes.

Dans ce cas particulier, l'avantage d'utiliser une conversion thermochimique en milieu alcalin est qu'il n'est pas nécessaire de sécher ces boues avant traitement.

\_L'apport exogène d'eau est aussi réduit car les boues en contiennent (37-45 % de siccité). Outre la cellulose résiduelle des boues qui peut contenir de l'hydrogène, il y a aussi les huiles végétales des encres qui en contiennent .il est donc intéressant de voir l'effet des réactifs et de la conversion sur certaines composantes de ces boue.

Voici le tableau qui contient les conditions opératoires de la gazéification des boues de désencrage :

**Tableau III-7 : les conditions opératoires de la manipulation 05.**

Conditions opératoires	Valeurs
Durée de la production H <sub>2</sub> (h)	2.25
Température d'opération(°C)	255-464
Coefficient B de Viriel (cm <sup>3</sup> /mol)	ND
Coefficient Cde Viriel (cm <sup>6</sup> /mol <sup>2</sup> )	ND

### III.16.1.Résultats et interprétations :

\_ Voici le tableau qui contient les résultats de la gazéification des boues de désencrage :

**Tableau III-8 : les résultats de la manipulation 05 .**

Paramètres	Résultats
Quantité H <sub>2</sub> produit (g)	ND
Présence H <sub>2</sub> dans le mélange gazeux (%)	99.68
Pression finale exercée par l'H <sub>2</sub> (KPa)	2787.50

\_ La production d'H<sub>2</sub> a été réalisée dans un écart de températures allant de 255 °C à 464 °C.

Cette manipulation a permet de produire 99.68% d'hydrogène , ce qui montre la production d'autres produits qui représentent 0.32% restante .

\_ Les produits qui se trouvent a la fin de la réaction sont visqueux ce qui permet de nettoyer le réacteur .



**Figure III-7 : Résidus solides présent dans le réacteur à la fin de la réaction de la Manipulation 05**

### III.17. Discussion et interprétation générale :

\_ Après chaque manipulations faut calculer la quantité d'H<sub>2</sub> dégagé (taux de conversion) a partir de cette loie :

**% efficacité de conversion = [quantité d'hydrogène dans la cellulose / quantité d'hydrogène produite] .100**

Généralement, la quantité d'hydrogène produite est de 2.24 grammes pour toutes les manipulations.

\_ Voici le tableau qui englobe les résultats obtenus précédemment :

**Tableau III-9 : Compilation des résultats des manipulations et pourcentage d'efficacité de conversion**

manipulation	01	02	03	Copaux des bois	Boues de désencrage
Temps de réaction ( hr)	5.83	1.5	1.25	2.75	2.25
Température ( C° )	225_253	300	298	296_508	255_464
Quantité H <sub>2</sub> (g)	-	1.71	1.92	ND	ND
% H <sub>2</sub>	99.83	99.46	99.63	100	99.68
% Efficacité	-	76.30	85.7	100	99

D'après les résultats obtenus on peut déduire que :

\_ La meilleure efficacité de conversion entre les 03 premières manipulation a été obtenu dans la manipulation 03 avec 85.7 % ( une production de 99.63 % d'hydrogène )

\_ pour la deuxième manipulation y'avait une fuite qui s'est créer en fin de l'expérience ce qui a causé une perte de gaz produit.

\_ pour les 02 cas dernières :

après la gazéification des 02 résidus ( copeaux de bois et les boues de désencrage ) et d'après les résultats on voit que :

\_ Le meilleur résultat a été obtenu avec les copeaux de bois (100 % H<sub>2</sub>) en raison de son l'homogénéité.

\_ On peut justifier ce résultat par la composition des copeaux de bois, ces derniers ne contiennent pas des matières inertes par rapport aux boues de désencrage, L'absence de ces contaminants permet d'obtenir une conversion totale.

\_ Enfin , je trouve moi et mon binôme que ce travail est un travail très intéressant et riche , car on a pu découvrir beaucoup de choses qui concernent la gazéification de la biomasse, et parmi ce qu'on a pu déduire , on cite :

\_ **la température a une influence sur :**

✓ le temps de rétention

✓ La quantité de produit de sorte que : lorsque on diminue la température, le nombre de mole d'hydrogène produit diminue aussi .

✓ les produits solides en fin de l'expérience : à une température de 298°C le solide formé a la fin de la réaction est un mélange de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> et le catalyseur utilisé, par contre, si on diminue la température, il se forme un autre produit (carbonate de sodium tri hydraté Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-3H<sub>2</sub>O )qui vient d'une réaction entre l'eau et le Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.

\_ ce travail démontre qu'il est possible de produire de l'H<sub>2</sub> avec la configuration du réacteur testé et les réactifs utilisés à partir de différents types de résidus cellulosique ( boues de désencrage, copeaux de bois ...ect ).

\_ la composition et le type de la biomasse utilisée a une influence (un effet ) sur le taux de la production ainsi que la diversité des produits obtenu en fin de la réaction .

\_ La conception de réacteur a une influence aussi sur :

➤ la quantité d'hydrogène produit, c'est parce que une petite fuite peut causer une grande perte de gaz ce qui permet au gaz de s'échapper du réacteur, À cause de ces fuites, la pression finale est erronée ainsi que le nombre de mole d'H<sub>2</sub> produit.

\_ Pour le traitement antiadhésif qui a été appliqué aux parois internes de réacteur n'était pas efficace, c'est parce que ce traitement n'a pas pu résister la haute température, donc à haute température, il était nécessaire de dissoudre le produit solide, constitué de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  et de Ni, dans de l'eau mélangé avec de l'acide chlorhydrique pour faciliter le nettoyage. A basse température, lorsqu'il y avait présence de carbonate de sodium tri hydraté ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), les résidus solides se retiraient sans aucun problème du réacteur et le réacteur lui-même se lavait facilement.

### III.17.1. la variation de nombre de mole d' $\text{H}_2$ produit en fonction de la température et la pression :

Présentation graphique de la variation de nombre de mole d' $\text{H}_2$  produit en fonction de la température et la pression :

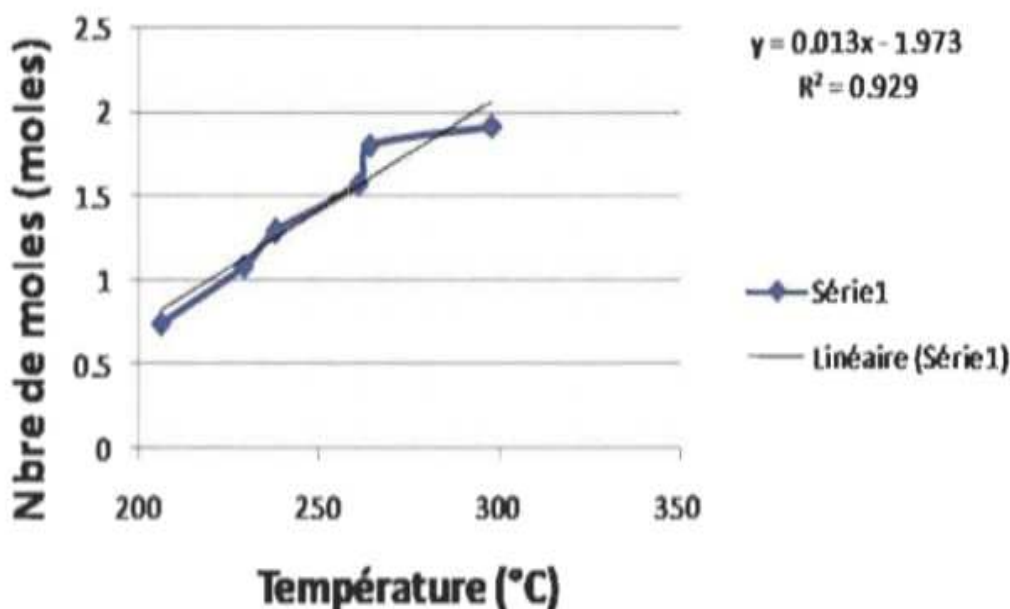


Figure III-8 : Compilation des résultats des manipulations du nombre de moles d' $\text{H}_2$  produit en fonction de la température.

### III.17.2. La variation de nombre de moles des d'hydrogène en fonction de la température :

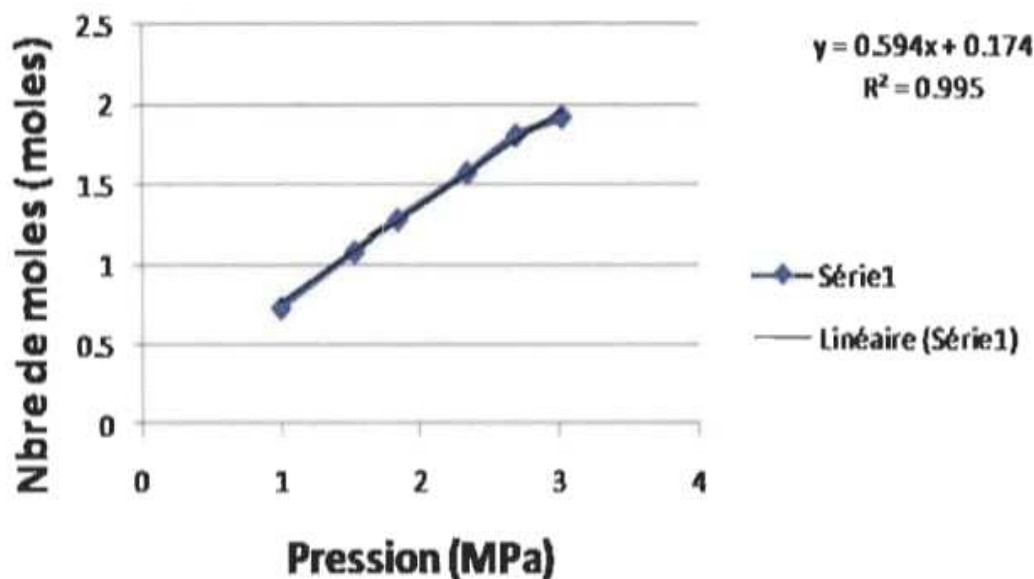
\_ Lorsque la température augmente le nombre de moles d'hydrogène augmente aussi

La température  $260^\circ\text{C}$  est la température la plus adéquate à notre expérience, sur laquelle la production d'hydrogène est maximale

A une température Plus que  $260^\circ\text{C}$  la production d'hydrogène sera plafonnée.

Donc, d'après ces remarques on dit que la variation de nombre de moles d' $\text{H}_2$  est proportionnelle à la température maximale de la manipulation





**Figure III-9 : Compilation des résultats des manipulations du nombre de moles d'H<sub>2</sub> produit en fonction de la pression.**

### III.17.3. La variation de nombre de moles des d'hydrogène en fonction de la température

\_ On remarque que le nombre de moles d'H<sub>2</sub> augmente lorsque la pression augmente .

le nombre de mole atteint son maximum ( 02 moles ) quand la pression est égale = 3Mpas.

Donc, d'après ces résultats on peut dire que la variation de nombre de moles dépend de la pression aussi .

D'après l'interprétation de premier graphe et deuxième graphe ( 01 et 02 )on peut déduire que la température est un bon influenceur dominant qui permet d'avoir une très bonne efficacité de conversion et un temps de résidence très court.

### III.18. Conclusion :

\_ Ce travail a permet de concevoir un réacteur à biomasse pour produire de H<sub>2</sub> et réaliser une conversion thermochimique innovatrice qui permet de produire le gaz d'hydrogène et d'autres produit qui sont prêts à être utilisables à partir des résidus cellulosiques.

On a pu déduire que cette conversion se fait à une température inférieure à 300°C en présence d'un catalyseur à base de nickel supporté par du AL-SI et le NaOH .

Ce qui est important dans ce procédé de conversion thermochimique est la réduction de CO<sub>2</sub>.

Plusieurs résultats ont été obtenus à des températures variant entre 206 et 300 °C et dans tous les cas, des gaz avec une forte proportion d'H<sub>2</sub>a été obtenu alors que le résidu de la réaction était du Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>(valorisable) et le catalyseur (recyclable).

Les meilleurs résultats ont été obtenus dans les manipulations 04 et 03 et 05.

Il est possible de conclure qu'à haute température, la réaction s'effectue complètement alors qu'il n'y a pas de vapeur d'eau générée. Tandis qu'à basse température, il y a génération de vapeur d'eau.

\_ Enfin, pour conclure, Cette technologie permet de diversifier les produits et coproduits de résidus forestiers, décentraliser les ressources et accroître l'économie régionale. Cette conversion thermochimique facilitée en milieu alcalin génère de l' $H_2$  pure sans recourir à une étape de nettoyage et permet d'obtenir un coproduit ( $Na_2CO_3$ ) qui est non toxique et réutilisable

*Chapitre IV*  
*Partie pratique*

## IV. Etude sur la conversion thermochimique de la biomasse dans un milieu alcalin

### IV.1. Introduction :

C'est vrai que la biomasse est une source d'énergie, mais malgré ça il faut vérifier le type de procédé de conversion qu'on va appliquer. Plusieurs procédés aujourd'hui nécessitent une température très haute qui dépasse les 1000 C°.

Avec cette température on est obligé de comparé l'énergie produite avec l'énergie utilisé par le procédé. Cela veut dire que d'un coté la réaction doit se dérouler sous une température très basse, d'un autre coté, beaucoup de recherches qui ont été faites dans ce sujet ont prouvé qu'une basse température de l'opération se trouve sous les 500 C° alors qu'une haute température de l'opération se trouve au dessus de 500 C°.

Dans cette étude nous nous sommes intéressé à la synthèse de l'hydrogène par le procédé thermochimique notamment la conversion thermochimique.

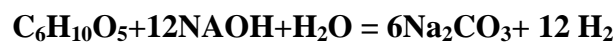
### IV.2. La conversion thermochimique de la biomasse en milieu alcalin :

Cette méthode est considérée comme la meilleure méthode de conversion car elle empêche la formation de gaz a effet de serre CO<sub>2</sub> et CO et permet de produire de l'hydrogène pur.

#### IV.2.1. Principe de procédé :

Faisant réagir de la biomasse cellulosique, un oxyde de métal alcalin hydraté (NaOH), ainsi que de la vapeur d'eau a des températures relativement basses (200°C – 400°C) et à pression atmosphérique.

La réaction générale :



**Ce type de conversion nécessite l'utilisation de catalyseurs :** nickel (Ni), cobalt (Co), rhodium (Rh) ou ruthénium (Ru) supportés sur une céramique telle que l'oxyde d'aluminium (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), ces catalyseur participent a l'amélioration de la production d'hydrogène.

\_ Ce chapitre est consacré a une étude sur la conversion thermochimique de 02 types de la biomasse (copaux de bois et les palmiers) en présence de NaOH.

Le but de ce travail est de présenter une revue des procédés actuels et futurs de production de combustibles gazeux et liquides à partir de 02 types de la biomasse par voie thermochimique : pyrolyse, gazéification.

On va aussi déterminer le volume de gaz dégagé, connaître le type des produits obtenus à la fin de la réaction, et voir l'influence de NaOH sur le taux de production.

#### IV.2.2. Le montage :

Le pilote de production d'Hydrogène a été fait en suivant les montages d'études passées dans ce domaine. Vu le manque de moyens pour faire un tels montage, on a décidé de créer une

installation la plus simple possible, on peut dire qu'elle est classique mais en même temps professionnel, car , malgré sa simplicité on a pu atteindre notre objectif et avoir des résultats qui sont presque analogues aux résultats qui ont été obtenus par d'autres recherches sur le ce même thème.

Notre montage est composé par :

\_ Le réacteur : Qui est un cylindre en acier inoxydable d'une longueur de 22 cm , un diamètre extérieur de 10 cm et d'une épaisseur de 0.40 cm. À son extrémité supérieure, le cylindre est fermé par un bouchon soudé d'une épaisseur d'environ 0.50 cm.



**Figure IV-1 : photo du réacteur de gazéification – Réacteur 01**

\_ Ballon tricol à fond rond 250 ml très haute résistance chimique et mécanique système à clip, rodage 24/29.



**Figure IV-2 : ballon tricol**

\_ Cocotte authentique inox SEB (Modèle traditionnel)



**Figure IV-3 : cocote modèle traditionnel – Réacteur 02**

\_ Bécher à bec forme basse Simax 800 ml .( en verre )



**Figure IV-4 : photo d'un bécher de 800 ml**

\_ Un Pot en plastic



**Figure IV-5 : Un pot en plastic avec un robinet pour le contrôler le gaz**

\_04 Tuyaux de laboratoire (02 tuyaux avec un diamètre de 0.5 cm , 02 tuyaux avec un diamètre de 01 cm ) .

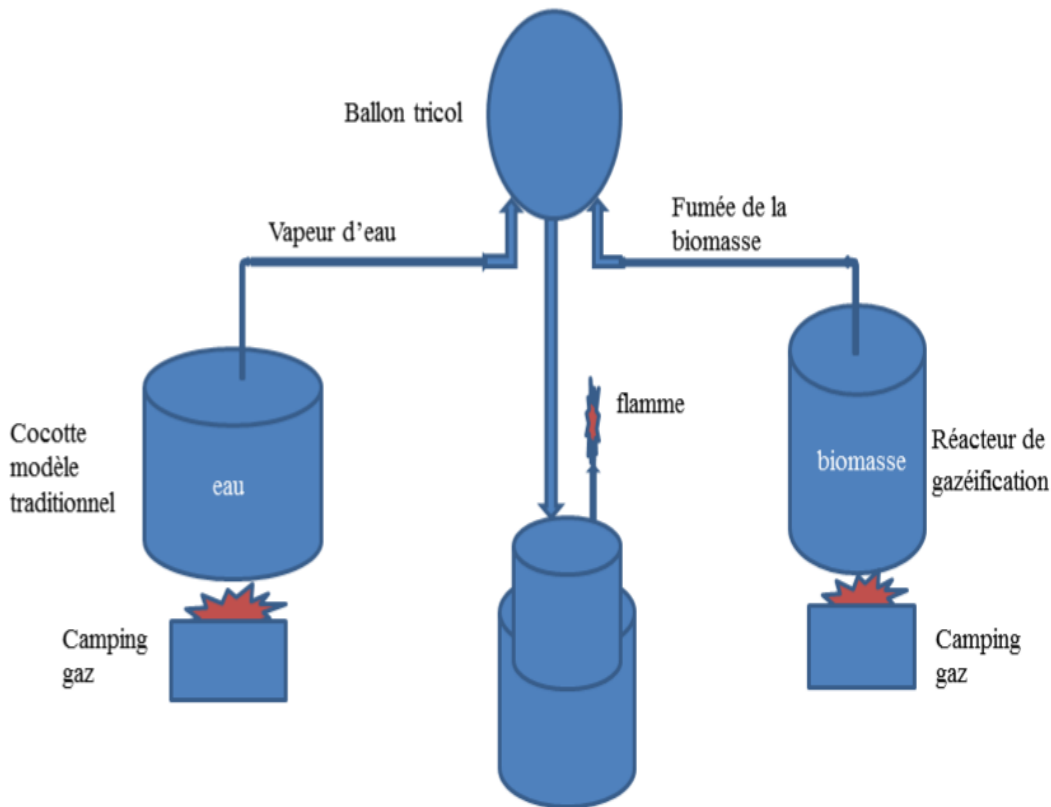
\_ Voici une photo sur le montage de notre expérience :



**Figure IV-6 : le montage expérimentale**



\_ Schéma de procédé de conversion thermochimique de la biomasse :



**Figure IV-7 : schéma de la conversion thermochimique de la biomasse**

#### **IV.2.3.La composition de la Biomasse :**

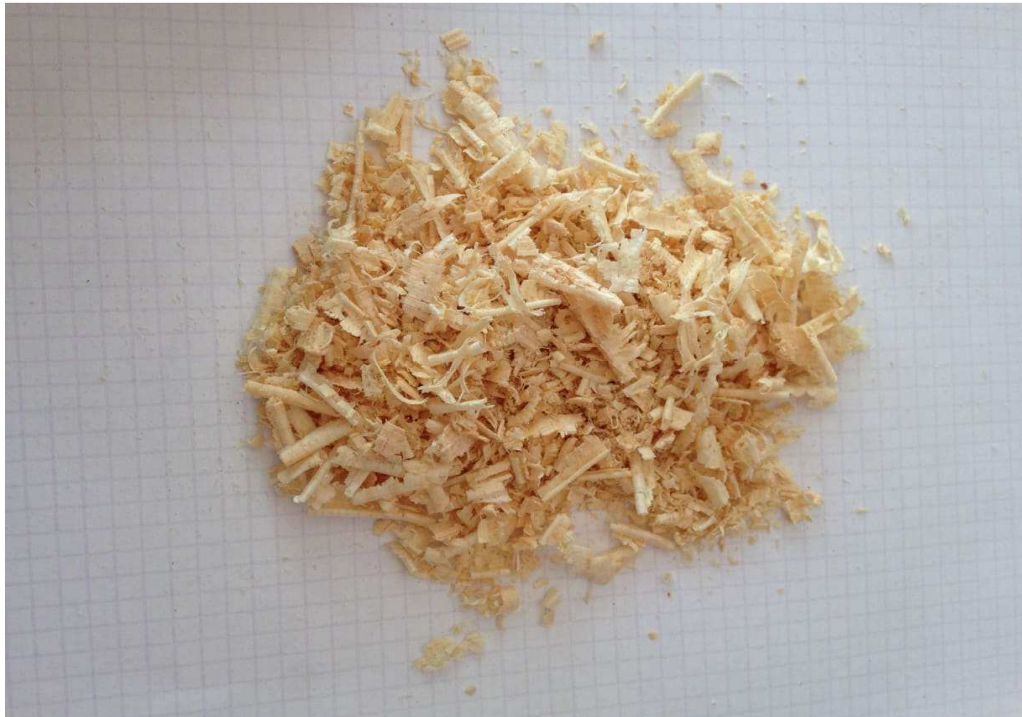
Dans ce travail , on a utilisé 02 types de biomasse , pour pouvoir faire à la fin une petite étude comparative entre le rendement en hydrogène produit pour chaque type de biomasse .

Dans un premier essai la biomasse utilisée était composée de 50% de copeaux de bois et 50% de reste de tronc de palmiers.

##### **IV.2.3.1..Les copeaux de bois :**

Les **copeaux** de bois sont les restes d'usinage du bois. Cette matière est généralement jetée et ne trouve pas d'utilisation bien précise. Les copeaux de bois ont été collecté chez les menuisiers de la région.





**Figure IV-8 : les coupeaux de bois**

#### **IV.2.3.2. Composition chimique du bois : [35]**

Pour comprendre et essayer d'interpréter les réactions mises en jeu dans les procédés thermiques de valorisation énergétique du bois, il est nécessaire d'avoir une idée de sa composition et de sa structure chimique. On distingue dans le bois trois catégories de constituants : les extraits, les composés des parois des cellules du bois (bois vivant), les cendres.

— Les composés des parois de cellules du bois (masse du bois) sont principalement la lignine et l'holocellulose (fraction totale en carbohydrate : cellulose et hémicelluloses) . Le taux de lignine varie de 18 à 25 % pour les feuillus et 25 à 35 % pour les résineux par rapport au bois total, en fonction des essences et le taux d'holocellulose de 40 à 60 %.

— Les extraits présents en quantité variables de 4 à 15 % sont des produits issus de la cellule vivante ou morte à savoir : terpènes, résines, acides gras, tannins et pigments.

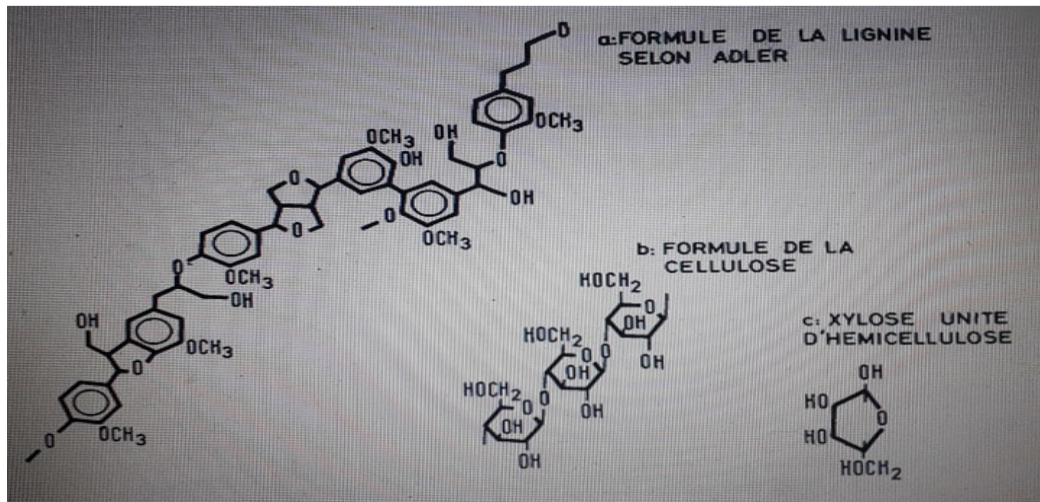


Figure IV-9 : les différents constituants principaux du bois

#### IV.2.3.3. Les palmiers dattiers : [36]

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 n'est pas un arbre à proprement parler) 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.



Figure IV-10 : les écorces de palmiers dattiers

#### IV.2.3.4. L'Hydroxyde de sodium NaOH :

Le rôle de l'hydroxyde de sodium (NaOH) en tant que promoteur dans la production d'H<sub>2</sub> dans une gazéification hydro-thermique

Sans l'hydroxyde de sodium, la décomposition du glucose produit principalement du CO<sub>2</sub>, de l'eau et des résidus goudronnés. Le NaOH est l'un des composés importants utilisés dans notre travail et joue le rôle d'un catalyseur en augmentant le rendement de production d'hydrogène.



Figure IV-11 : l'hydroxyde de sodium

#### IV.2.3.5. L'eau : H<sub>2</sub>O

Dans notre manipulation l'eau est utilisée pour produire de la vapeur, elle joue un rôle très important pour minimiser la production du monoxyde de carbone et favoriser la production de l'hydrogène, suivant la réaction :



### IV.3. Manipulations :

#### IV.3.1. Principe de travail :

Avant d'utiliser la biomasse il faut qu'elle soit bien sèche, après on met le tout dans le réacteur 01, en même temps on verse 3200 ml d'eau dans le réacteur 02.

On prend le bécher de 800ml et on le remplit d'eau, on fait plonger le Pot en plastique à l'envers, et puis on commence à compter le temps écoulé jusqu'à la fin de l'expérience. Le démarrage de l'expérience commence après avoir allumé le feu sous le réacteur 01 qui contient le mélange réactionnel et sous le réacteur 02 qui contient l'eau.

Pour pouvoir calculer le volume de gaz dégagé, on doit le déterminer expérimentalement en même temps mathématiquement.

La forme du pot qui se trouve à l'intérieur du bécher est cylindrique. Quand le gaz commence à se produire la pression dans le bécher augmente, et quand la pression augmente le Pot monte vers le haut petit à petit.

A chaque fois que le pot monte vers le haut on ouvre le robinet et on laisse évacuer une quantité du gaz formé, en ce moment on allume le feu pour confirmer que le gaz s'est dégagé.

On refait cette expérience jusqu'à ce qu'il n'y ait plus formation de gaz. On mentionne le nombre de fois la quantité de gaz dégagé et le temps pendant lequel l'expérience a duré.

\_ Enfin, On calcule le volume de gaz dégagé et essayer d'identifier les produits qui se sont formés aussi en fin de l'expérience. ( en présence et en absence de NaOH ).

#### **IV.3.2. La gazéification des copeaux de bois en présence de NaOH :**

Dans cette manipulation , on a utilisé, 19.01 grammes de copeaux de bois , avec 19.02 grammes de NaOH .

Eau = 3200 ml

##### **IV.3.2.1. Résultats :**

###### **➤ Théoriquement :**

Le volume de gaz dégagé = le volume de notre bécher qui est plein d'eau × le nombre d'essai

Avec : le volume de bécher = le volume du pot

Le calcul du volume  $V$  d'un cylindre de diamètre  $d$  et de hauteur  $h$  est effectué à partir de la formule suivante :

$$V = \pi/4 \times d^2 \times h$$

Donc on dit que :

###### **➤ Mathématiquement :**

**Le volume de bécher =  $\pi/4 \times d^2 \times h$**

Avec :

$$d = 9 \text{ cm}$$

$$h = 10 \text{ cm}$$

$$\pi = 3.14$$

$$\text{Alors : volume de bécher} = 3.14/4 \times 81 \times 10 = 635,85 \text{ cm}^3$$

On va convertir la valeur en mètre cube :

$$635,85 \text{ cm}^3 = 0.00063585 \text{ m}^3$$

On a 11 essais donc :

$$\text{Le volume de gaz dégagé} = 11 \times 0.00063585 = 0.006994 \text{ m}^3$$

$$\mathbf{V \text{ gaz} = 0.006994 \text{ m}^3}$$

\_ Pour pouvoir tracer la courbe **V gaz = F (temps)** :

On doit connaitre la quantité d'eau restée dans le réacteur 02

**Quantité de vapeur d'eau utilisée = quantité initial d'eau - quantité d'eau restée dans la cocote**

Quantité de vapeur d'eau utilisée = 216 ml

La réaction a pris 8 minutes = 480 secondes

Alors, Pour produire 0.006994 m<sup>3</sup> de gaz on a utilisé 216 ml de vapeur d'eau en t = 8 minutes = 480 secondes

On écrit :

T = 480 secondes → 216 ml de vapeur d'eau a été utilisée

T = 80 secondes → X

Donc :  $X = 216 \times 80 / 480$

X = 36 ml de vapeur d'eau

On continue les calculs pour chaque 80 secondes passées, et puis on trace la courbe de la variation de la quantité d'eau utilisée en fonction de temps.

Pour calculer le volume de gaz dégagé chaque 80 secondes, on doit faire la même chose, on applique la même méthode :

T = 480 secondes → 0.006994 m<sup>3</sup> de gaz

T = 80 secondes → Y

Donc  $Y = 0.006994 \times 80 / 480$

Y = 0.00116 m<sup>3</sup> de gaz

V gaz = 0.00116 m<sup>3</sup>

On continue nos calculs pour chaque 80 secondes passées, et puis on trace la courbe de l'évolution de volume de gaz dégagé en fonction de temps.

**Tableau IV-1 : Résultat de la manipulation : copeaux de bois + NaOH**

Temps (s)	0	40	80	120	160	200	240	280	320	360	400	440	480
Vapeur d'eau (ml)	0	18	36	54	72	90	108	126	144	162	180	198	216
V gaz (m <sup>3</sup> )	0	0.0005	0.0011	0.0017	0.0023	0.0029	0.0034	0.0040	0.0046	0.0052	0.0058	0.0064	0.0069

#### IV.3.2.2. Présentation graphique des résultats et discussion :

- Présentation graphique de la variation de quantité de vapeur d'eau utilisée et le volume de gaz dégagé en fonction de temps :

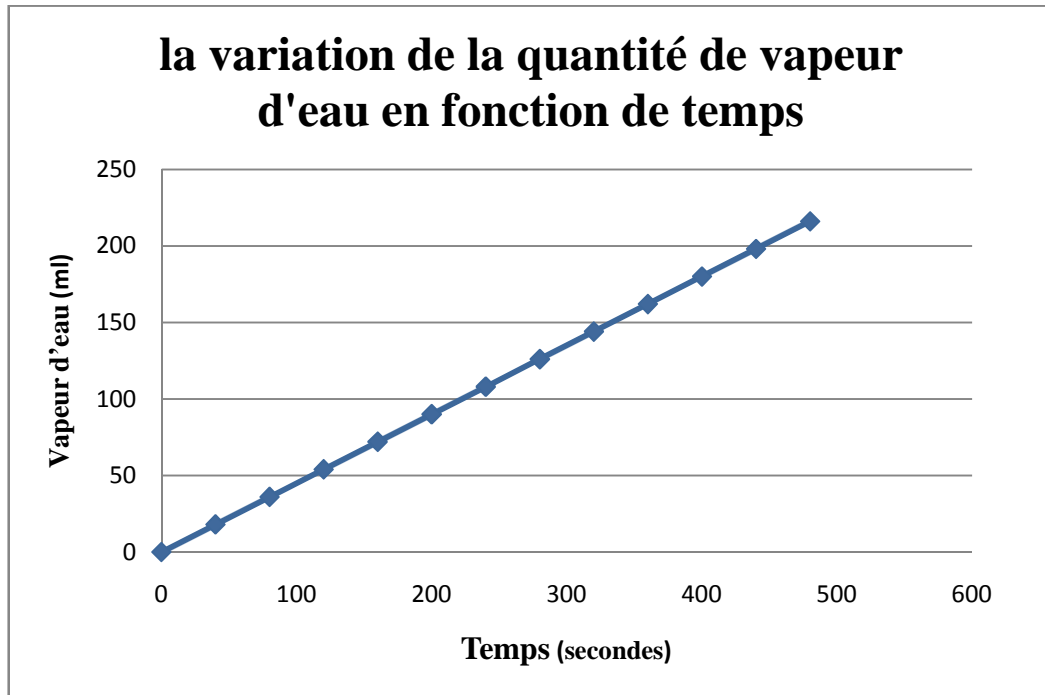


Figure IV-12: graphe de variation de la quantité de vapeur d'eau utilisée en fonction de temps en présence de NaOH et les copeaux de bois

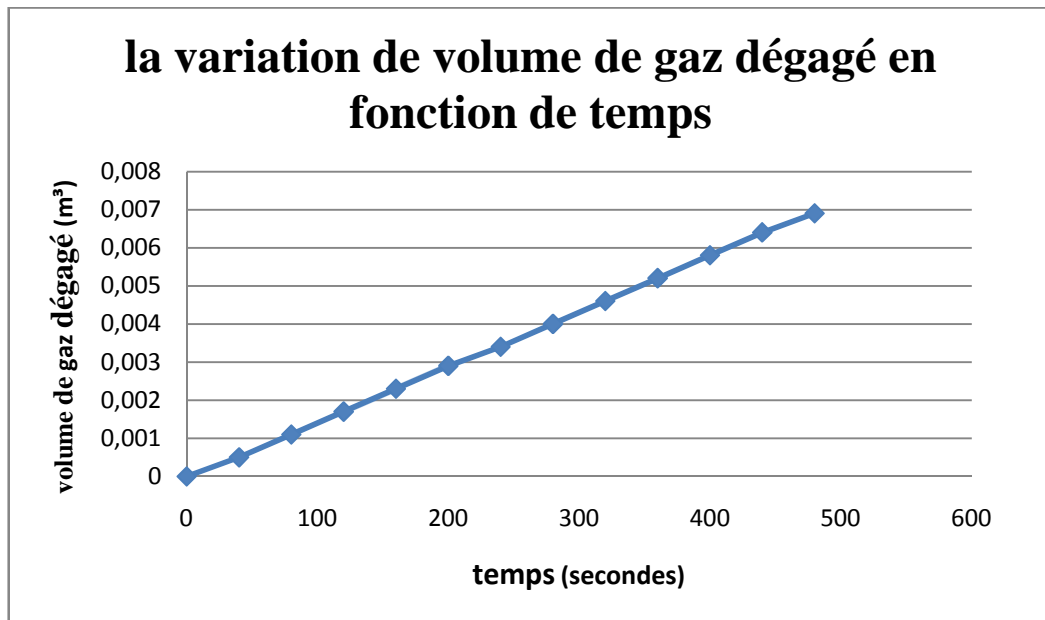


Figure IV-13 : graphe de variation de volume de gaz dégagé en fonction de temps en présence de NaOH+copeaux de bois

\_ D'après les graphes on remarque que la quantité de vapeur d'eau utilisée augmente avec 18 ml chaque 40 secondes, et que le volume de gaz augmente avec 0,0005 m<sup>3</sup> chaque 40 secondes ce qui montre qu'il y a une production de gaz très importante par rapport à la quantité de biomasse utilisée.

La variation de volume de gaz en fonction de temps a formé une droite, ce qui confirme qu'il y a une relation proportionnelle entre le volume de gaz dégagé et le temps .

Dans cette expérience on a pu produire 0.0069 m<sup>3</sup> de gaz à partir de 19.01 grammes de biomasse en présence de catalyseur .

➤ **En absence de NaOH :**

En appliquant les mêmes méthodes pour calculer le volume de gaz dégagé et la quantité de vapeur d'eau utilisé dans l'expérience, sauf , que ici le nombre d'essais = 13 fois

**Alors : volume de bécher =  $3.14/4 \times 81 \times 10 = 635,85 \text{ cm}^3$**

On va convertir la valeur en mètre cube :

$$635,85 \text{ cm}^3 = 0.00063585 \text{ m}^3$$

On a 9 essai donc :

$$\text{Le volume de gaz dégagé} = 9 \times 0.00063585 = 0.005722 \text{ m}^3$$

La vapeur d'eau utilisée : 639 ml

Le temps de la réaction : 20 minutes = 1200 secondes

Le tableau suivant contient nos résultats :

**Tableau IV-2 : Résultats de la manipulation (gazéification des copeaux de bois en absence de NaOH**

Temps (s)	0	120	240	360	480	600	720	840	960	1080	1200
Vapeur d'eau ( ml )	0	63.9	127.8	191.7	255.6	319.5	383.4	447.3	511.2	575.1	639
Volume de gaz dégagé ( m <sup>3</sup> )	0	0.0005	0.0011	0.0017	0.002	0.0028	0.0034	0.0040	0.0045	0.00514	0.005722

**IV.3.2.3.Présentation graphique des résultats et discussion :**

D'après le 1 er graphe on remarque que la quantité de vapeur d'eau utilisée augmente chaque 120 secondes

Et dans le deuxième graphe on remarque que le volume de gaz dégagé augmente avec 0.006 m<sup>3</sup> chaque 120 secondes donc on peut dire que la production d'hydrogène a commencé.



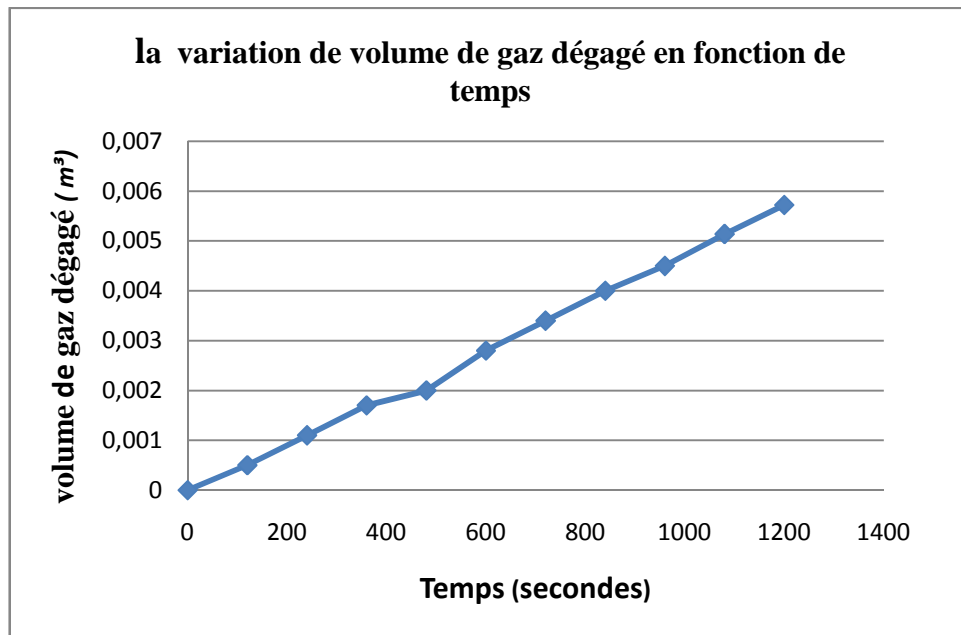


Figure IV-14 : la variation de volume de gaz en fonction de temps

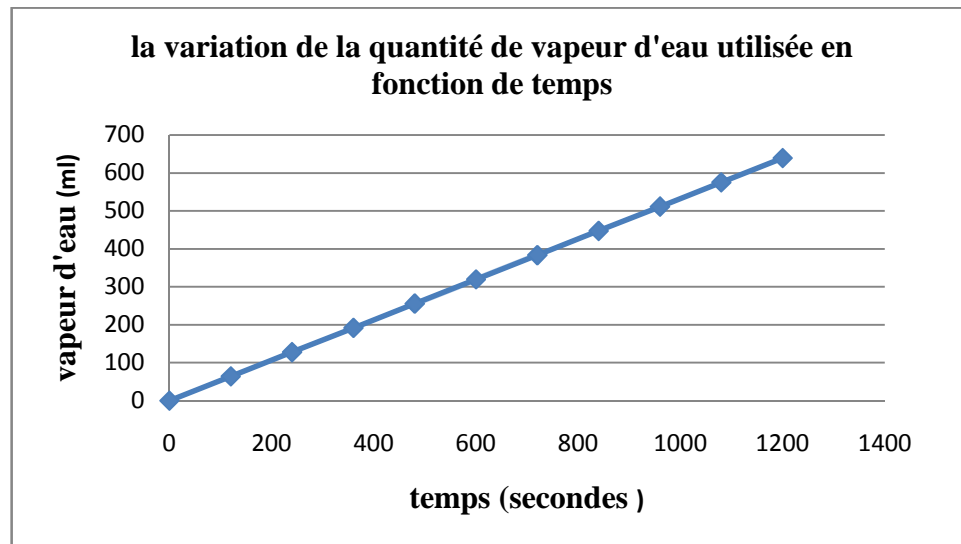


Figure IV-15 : la variation de variation de la quantité de vapeur d'eau utilisée en fonction de temps

#### IV.3.3.Manipulation 02 : La gazéification des palmiers dattiers en présence de NaOH :

Dans cette manipulation , on a utilisé, 16.01 grammes de palmiers dattiers, avec 22.17 grammes de NaOH .

Eau = 3200 ml

Nombre d'essais : 14 fois

En appliquant les mêmes méthodes pour calculer le volume de gaz dégagé et la quantité de vapeur d'eau utilisé dans l'expérience, sauf, que ici le nombre d'essais = 14 fois

Alors : volume de bécher =  $3.14/4 \times 81 \times 10 = 635,85 \text{ cm}^3$



On va convertir la valeur en mètre cube :

$$635,85 \text{ cm}^3 = 0.00063585 \text{ m}^3$$

Le volume de gaz dégagé =  $14 \times 0.00063585 = 0.0089019 \text{ m}^3$  de gaz.

On a utilisé 400 ml de vapeur d'eau (quantité d'eau vaporisée).

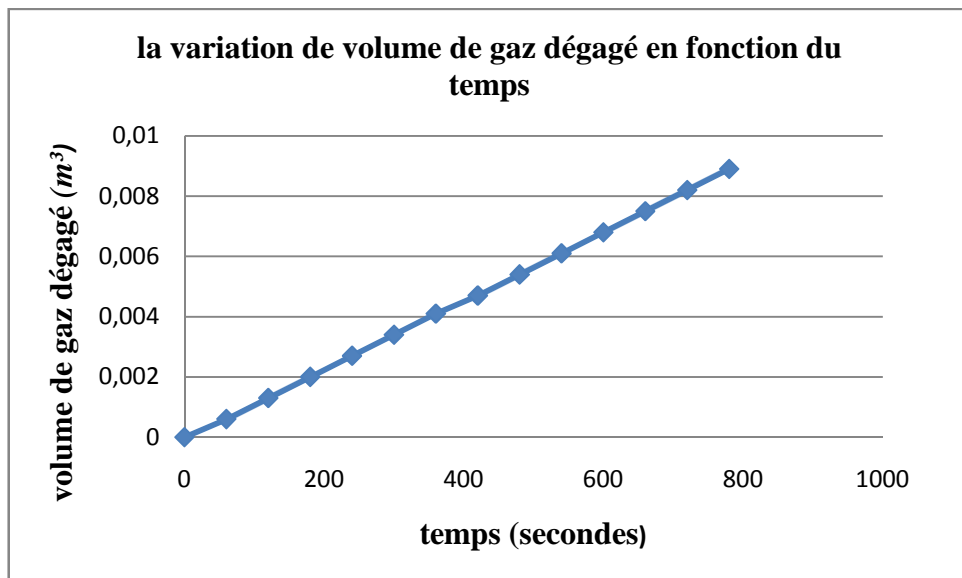
Temps de l'expérience : 13 minutes = 780 secondes

**IV.3.3.1. Résultats :**

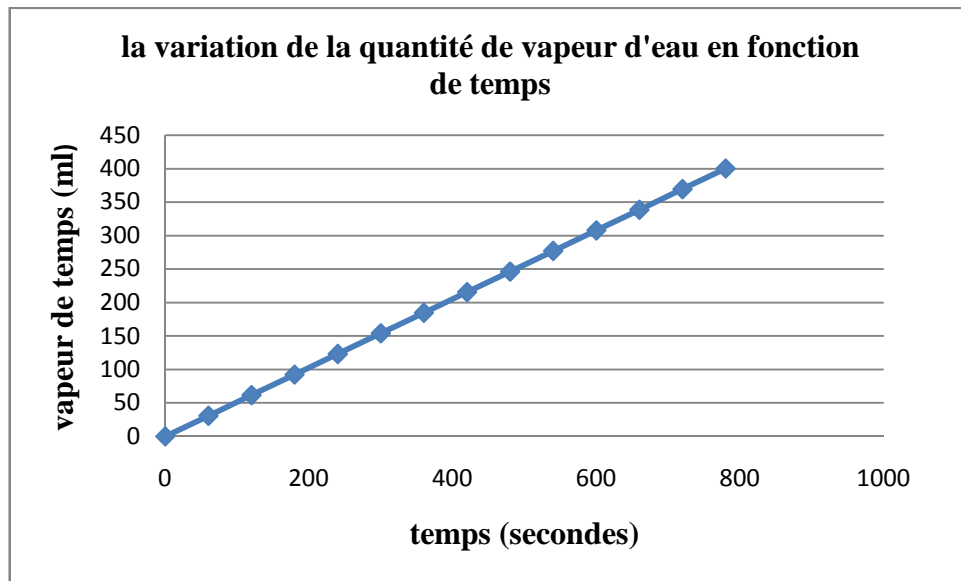
**Tableau IV-3 : Résultat de la manipulation ( gazéification des palmiers dattiers en présence de NaOH .**

Temps(s)	0	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600	660	720	780
Vapeur d'eau (ml)	0	30.76	61.53	92.30	123.07	153.84	184.61	215.38	246.15	276.92	307.69	338.46	369.23	400
Volume de gaz dégagé (m <sup>3</sup> )	0	0.0006	0.0013	0.0020	0.0027	0.0034	0.0041	0.0047	0.0054	0.0061	0.0068	0.0075	0.0082	0.008901

**IV.3.3.2. Présentation graphique et interprétations :**



**Figure IV-16 : graphe de la variation de volume de gaz dégagé en fonction de temps**



**Figure IV-17 : graphe de variation de la quantité de vapeur d'eau en fonction de temps**

\_ D'après le premier graphe on remarque que le volume de gaz augmente avec  $0.0005 \text{ m}^3$  chaque 60 secondes, ce qui montre une production importante de gaz par rapport à la quantité de la biomasse utilisée.

pour la quantité de vapeur d'eau utilisée dans le deuxième graphe on voit qu'elle augmente avec  $30.77 \text{ ml}$  chaque 60 secondes.

Cette manipulation a permis de produire  $0.00890 \text{ m}^3$  de gaz à partir de  $16.01$  grammes de biomasse en présence de  $\text{NaOH}$ .

➤ **En absence de  $\text{NaOH}$  :**

On a utilisé  $600 \text{ ml}$  de vapeur d'eau

Temps de la réaction :  $18 \text{ minutes} = 1080 \text{ secondes}$

Nombre d'essai : 11

Le volume de gaz dégagé =  $11 \times 0.00063585 = 0.006994 \text{ m}^3$  de gaz.

**$V_{\text{gaz}} = 0.006994 \text{ m}^3$**

Tableau IV-4 : Résultat de la gazéification des palmiers dattiers en absence de NaOH

Temps (s)	0	90	180	270	360	450	540	630	720	810	900	990	1080
Vapeur d'eau (ml)	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
Volume de gaz dégagé (m <sup>3</sup> )	0	0.0005	0.0011	0.0017	0.0023	0.0029	0.0034	0.0040	0.0046	0.0052	0.0058	0.0064	0.0069

IV.3.3.3. Présentation graphique des résultats et interprétation :

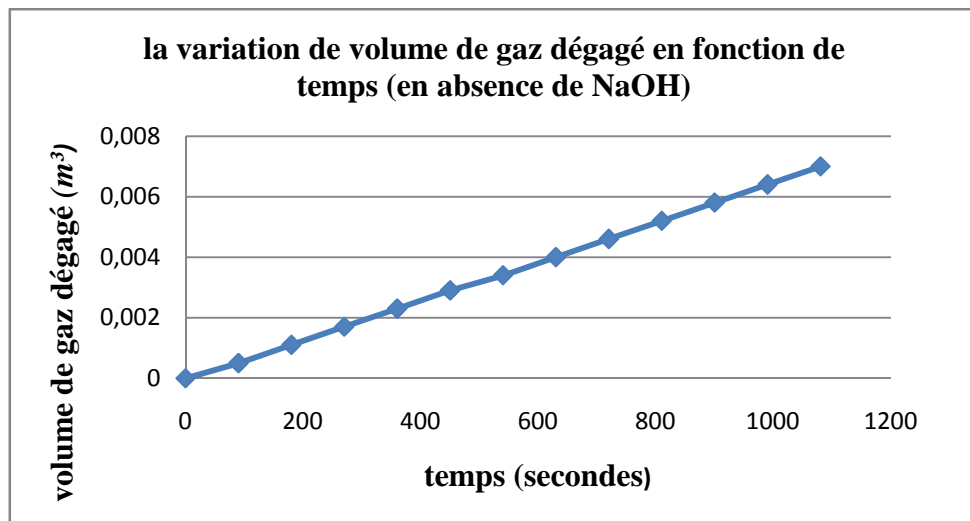
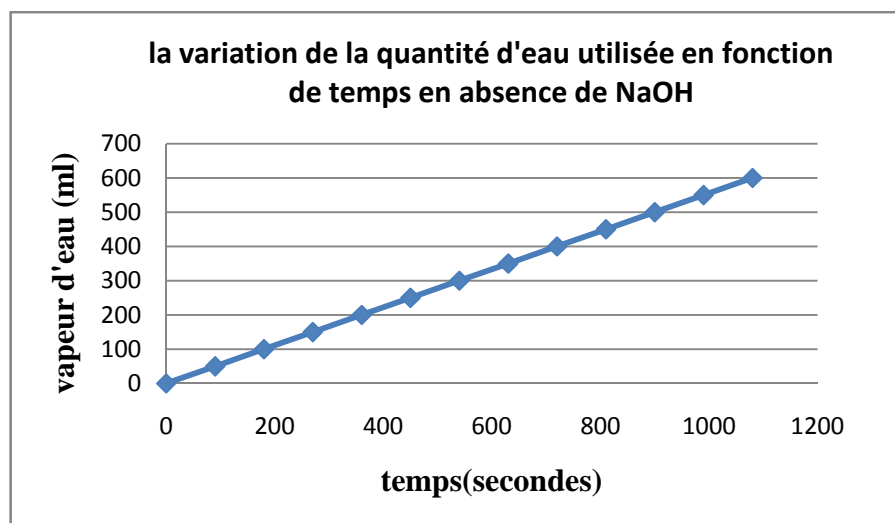


Figure IV-18 : graphe de la variation de volume de gaz en fonction de temps (en absence de NaOH)



**Figure IV-19: graphe de la variation vapeur d'eau utilisée en fonction de temps (en absence de NaOH)**

#### IV.4. Discussion générale :

En faite, en fin de l'expérience on a pu remarquer que :

- \_ La présence de NaOH a joué un grand rôle dans la réaction car c'est un bon accélérateur, d'ailleurs, quand on a ajouté le NaOH on a remarqué que la réaction était très rapide, par contre , en absence de NaOH la réaction était lente , donc on peut dire que le NaOH est un catalyseur qui est adéquat à cette réaction .
- \_ le volume de gaz dégagé en présence de NaOH est plus grande que celle en absence de NaOH.
- \_ La couleur de feu en présence de NaOH est plus clair que celle en absence de NaOH ce qui confirme la production d' $H_2$  avec un bon rendement.
- \_ la conversion thermochimique des copeaux de bois permet de produire :
  - \_ plusieurs gazs (hydrogène, nitrogène , méthane , oxygène ....etc. )



**Figure IV-20 : la production de gaz à partir des copeaux de bois**

#### IV.4.1. Les Produits secondaire obtenus :

- ✓ le charbon produit a partir de la biomasse.



Figure IV-21 : charbon noir

✓ le goudron



Figure IV-22 : goudron noir très visqueux

- \_ la quantité de vapeur d'eau utilisé après l'ajout de NaOH au mélange est un peu plus grande que la quantité utilisé sans ajout de NaOH.
- \_ la couleur du feu clair obtenue, est preuve qu'il n ya pas que production d'hydrogène, mais aussi d'autres gaz avec des quantités très petites .
- \_ quand on diminue la température la réaction prend beaucoup de temps pour se déclencher, par contre , quand on augmente la température on remarque que la réaction se déroule d'une façon rapide.
- \_ la formation d'un produit solide sur les parois du réacteur 01, un produit qui est très difficile à enlever même après plusieurs lavages.



Figure IV-23 : l'état du réacteur 01 après l'expérience

- \_ lavolume de gaz dégagé après la conversion thermochimiques des coupeau de bois est plus grande que celle après la conversion des rejets des palmiers dattiers.

- \_ la conversion thermo chimique des rejets des palmiers dattiers a pris beaucoup de temps par port à la conversion des coupeaux de bois.
- \_ la conversion thermo chimique des rejets des palmiers de bois nécessite une température plus élevée que celle des coupeaux de bois.
- \_ le volume de gaz dégagé pour les deux types de la biomasse est presque le même, sauf que celui du bois est plus grand que les palmiers et cela revient peut être a la composition chimique de chaque type de biomasse.
- \_ la conversion thermo chimique des rejets des palmiers dattiers a permis de produire plusieurs gaz et une quantité de charbon.



**Figure IV-24 : charbon noir produit après la gazéification des palmiers dattiers**

- \_ la couleur de feu est en orange foncé quand on fait la conversion thermo chimique des palmiers dattiers par contre celle des coupeaux de bois elle est très clair, l'orange foncé confirme la production d'autres gaz à par l'hydrogène comme le méthane , nitrogène , oxygène qui peut resté dans le réacteur ...ect .



**Figure IV-25 : la production de gaz a partir des palmiers dattiers**

**IV.5.Conclusion :**

Cette étude nous a donnée une bonne idée sur la production de gaz à partir de la biomasse par le procédé thermochimique. notre travail était parfait, malgré la simplicité de notre montage expérimentale qui a été fait par moi et mon binôme on a pu atteindre notre objectif qui est la production d'un gaz à partir de la biomasse , même on a pu déterminer le volume de gaz dégagé et identifier les autres produits qui peuvent être formés .

On a pu déduire que :

\_ La conversion thermochimique des copeaux de bois en présence de NaOH permet de produire une quantité d'hydrogène plus grande que celle de la conversion thermochimiques des palmiers dattiers en présence de NaOH ,

\_ La quantité de gaz produit est dépendante de type de la biomasse utilisée (composition chimique ), ainsi que , la température de la réaction .

\_ Le NaOH est un bon catalyseur, il a une grande influence sur la production d'hydrogène .

\_ la quantité de vapeur d'eau utilisée quand on n'ajoute pas le **NaOH** dans le milieu réactionnel est plus grande que la quantité de vapeur d'eau utilisée quand on ajoute le NaOH.

\_ le temps écoulé pour qu'on puisse atteindre la fin de la réaction en présence de NaOH est plus petit que le le temps écoulé quand le NaOH n'est pas présent dans le milieu réactionnel .

\_ La conversion thermochimique de la biomasse dégage une chaleur .

\_ Ce procédé permet de produire d'autres produits qui sont utilisables comme le goudron et le charbon.

\_ La conversion thermochimique des copeaux de bois est plus performante que celle des palmiers dattiers et ça revient à la composition chimique de chaque type de biomasse .

\_ Pour la différence entre le volume de gaz dégagé on peut la justifier par les pertes qui peuvent se passer dans n'importe quel procédé.

\_ Le NaOH favorise la production de gaz à partir de la biomasse , et les volumes de gaz obtenu pour les deux types de biomasse utilisée sont presque analogues ( identiques ) .

Enfin , avec un montage classique on a pu obtenir des résultats qu'on peut pas dire qu'ils sont 100% exactes car l'incertitude est toujours présente dans chaque travail même si avec un montage très développé mais au moins on a essayé d'appliquer ce procédé d'une façon classique en même temps professionnelle .



# *Conclusion générale*



### **Conclusion générale :**

\_ Bien que d'une potentialité importante, la production d'hydrogène à partir de la biomasse n'a, jusqu'à ce jour, pratiquement pas été exploitée ici en algérie. Il est vrai que la technologie chimique ou biochimique à mettre en œuvre est relativement complexe et exige des investissements énormes et une exploitation coûteuse. Néanmoins, la tendance actuelle de vouloir valoriser la biomasse et en particulier celle contenue dans les déchets aussi bien que l'intérêt que présente le vecteur énergie hydrogène, vont inmanquablement conduire au développement de cette filière.

L'objectif assigné à ce travail consiste à étudier la production d'hydrogène à partir des copeaux de bois et des rejets des palmiers dattiers avec un montage expérimental ( un montage classique ) et trouver des solutions pour favoriser la production d'hydrogène .

D'après nos résultats on a pu déduire que :

- ✓ Par un montage classique la température la plus adéquate qui permet de produire une quantité importante de gaz se trouve près de 1000°C.
- ✓ L'ajout de NaOH accélère la réaction chimique et augmente le taux de production de gaz.
- ✓ Le volume de gaz dégagé dépend de la quantité de type et de la composition chimique de la biomasse utilisée.
- ✓ La composition chimique des copeaux de bois permet de produire une grande quantité de gaz.

\_ La conversion thermochimique de la biomasse est un procédé écologique économique qui permet de produire pas seulement des gaz ( méthane ,nitrogène , oxygène , hydrogène ) mais aussi des produits on peut les utiliser après une amélioration comme le goudron et le charbon., mais le plus important c'est un procédé qui empêche la formation de gaz à effet de serre ( CO, CO2...) et c'est très important pour la protection de notre environnement .

Après une petite comparaison entre nos résultats et les résultats qui ont été obtenus par d'autres études des recherches sur notre thème on a pu distinguer que nos résultats sont à peu près identiques à leurs résultats, sauf que nous n'avons pas fait des analyses car on a trouvé une difficulté pour le stockage de gaz , d'ailleurs jusqu'à présent personne en algérie n'a déjà fait cette expérience , on peut dire qu'on est les premiers et ça revient à l'absence de matériels .

\_ Enfin , d'après nos résultats, pour avoir une bonne production de gaz on doit bien choisir le type de la biomasse utilisée , et vaut mieux d'ajouter l'hydroxyde de sodium NaOH même si on n'ajoute pas un catalyseur , car il a un rôle très lourd sur l'efficacité de la production .

# *Bibliographie*

### **Bibliographie :**

- [1] Salihi A, Acosta K ,Snoussi N ,étude sur la consommation des différentes énergies et leurs conséquences sur l'environnement ,article scientifique sur l'impact de la consommation d'énergie sur l'environnement ,2011/2012 .
- [2] Guy L , les impacts des énergies fossiles sur l'environnement ,document d'atelier préparé pour les entretiens de la villette 5 , paris , 1994 .
- [3]<https://www.geo.fr/environnement/energies-renouvelables-40381>
- [4]Megret O, Hubert I, CalbryM , rapport scientifique final sur la production d'hydrogène à partir de déchets (état de l'art et potentiel d'émergence),setec environnement , 2015, 226 p, n°13-0239/1A .
- [5] Laurent P, Rois J, Wertz J-L ,Richel A, Paquot M, article scientifique sur le bioraffinage , une alternative prometteuse à la pétrochimie ,
- [6] P Laurent , J Rois , J-L Wertz ,A Richel, M Paquot, article scientifique sur le bioraffinage , une alternative prometteuse à la pétrochimie ,université de liège , Belgique , 2011 .  
<https://popups.uliege.be/1780-4507/index.php?id=8007>
- [7] la filière de bio raffinage , une chimie verte , ressources naturelles et faunes , Québec ,2008 .  
<https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/comprendre/fiche-bioraffinage.pdf>
- [8]<https://www.imbe.fr/la-bioraffinerie-une-opportunit.html>
- [9] Jean-Luc Wertz , une étude sur Le bioraffinage ou valorisation optimale de la biomasse , ValBiom ,Belgique ,2010 .
- [10]Derbali M-A , étude sur la conception d'une bio raffinerie de seconde génération, mémoire de fin d'études en vue de l'obtention un master 02 en raffinage et technologie des hydrocarbures , université de kasdimerbah , ouargla ,2012 .
- [12]Oualid .M , étude sur la production d'hydrogène à partir des énergies renouvelables ,mémoire de fin d'études pour l'obtention d'un magister en école doctoral énergies renouvelables ,université aboubakrbelkaid de Tlemcen ,2009 .  
[http://tpe-biocarburants-09.over-blog.fr/pages/1\\_Les\\_biocarburants\\_gazeux-1159749.html](http://tpe-biocarburants-09.over-blog.fr/pages/1_Les_biocarburants_gazeux-1159749.html)
- [13] A. Damien ,la biomasse énergie , Ed Dunod, Paris, 2008, 2013 ISBN 978-2-10-058539-7 , 293 pages .  
<https://www.dunod.com/sites/default/files/atoms/files/9782100585397/Feuilletage.pdf>
- [14] O. Biganska ,étude physico-chimique des solutions de cellulose dans la N-methylmorpholine-N-oxyde, thèse pour obtenir le grade de docteur de l'école des mines de paris en sciences et génie des matériaux , école des mines de paris ,2002 .

- [15] M. lepage, une publication sur web « la biomasse : les déchets transformés en énergie », 2014  
<https://www.killmybill.be/fr/biomasse/>
- [16] Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), 2007. Les émissions atmosphériques de la combustion de biomasse. Paris (France). 10 p. [En ligne.] [http://www.ofme.org/bois-energie/documents/Environnement/etude\\_ademe\\_emission\\_atmo6\\_07\\_2007.pdf](http://www.ofme.org/bois-energie/documents/Environnement/etude_ademe_emission_atmo6_07_2007.pdf).
- [17] Van Loo, S., and J. Koppejan, 2008. The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing. Sterling (Virginia, United States). 442 p.
- [18] M. Sahli, étude de la production d'hydrogène par électrolyse et pile à combustible, mémoire présenté pour l'obtention d'un magister en physique, université de mentouri de constantine, 2010.
- [19] L. Bodineau, G. Winné, guide d'information sur les risques et les mesures de sécurité liées à la production décentralisée d'hydrogène, Ineris&Enea, 2015, 48 pages.
- [20] <file:///E:/ACCIDENTOLOGIE%20DE%20L%E2%80%99HYDROGENE.pdf>
- [21] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydrogene-energie>
- [22] D. Kherbouch, étude sur la contribution à la valorisation énergétique de la biomasse, une thèse pour l'obtention du diplôme de doctorat en physique énergétique et matériaux, université d'aboubakrbelkaid, tlemcen, 2011.
- [23] Van Loo, S.; Koppejan, J., The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing. London; Sterling, VA, 2008; p 442
- [24] Digman, B.; Joo, H. S.; Kim, D. S., Recent progress in gasification/ pyrolysis technologies for biomass conversion to energy. Environmental Progress and Sustainable Energy **2009**, 28, (1), 47-51
- [25] Prasad, S. B., Biomass-fired steam power cogeneration system: A theoretical study. Energy Conversion and Management **1995**, 36, (1), 65-77
- [26] Stöcker, M., Biofuels and biomass-to-liquid fuels in the biorefinery: Catalytic conversion of lignocellulosic biomass using porous materials. Angewandte Chemie - International Edition **2008**, 47, (48), 9200-9211
- [27] Bidini, G.; Manuali, A.; Saetta, S., Reciprocating steam engine power plants fed by wood waste. International Journal of Energy Research **1998**, 22, (3), 237-248
- [28] Bergeron, L.; Langlais, G.; Lebel, F.; Vézina, A. La production de biocarburants dans les milieux ruraux du Québec; Ministère des Affaires Municipales et des Régions (MAMR): Québec, 2007; p 146

- [29] Sheth, P. N.; Babu, B. V., Experimental studies on producer gas generation from wood waste in a downdraft biomass gasifier. *Bioresource Technology* **2009**, 100, (12), 3127-3133
- [30] Kherbouche, D. (2011). Contribution à la valorisation énergétique de la biomasse (Doctoral dissertation).
- [31] (Yoshinori et al., 1984).
- [32] Khelfa, A. (2009). Etude des étapes primaires de la dégradation thermique de la biomasse lignocellulosique (Doctoral dissertation, Université Paul Verlaine-Metz).
- [33] Hélouâni .K, étude sur la production d'hydrogène par gazéification du bois et du charbon de bois .Tunisie , 2008 .
- [34] Jean-philippe, J , étude sur la conception d'un réacteur à biomasse pour la production d'hydrogène, thèse de doctorat , université du Québec à trois-rivières ,canada,2011.
- [35] Déglise. X , les conversions thermo-chimiques de bois , Laboratoire de Recherches de Photochimie appliquée , université de nancy 01 , France , 1989 ,270 pages .
- [36] Aziz, E. H. M. (2002). Modélisation de l'architecture du palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) et application à la simulation du bilan radiatif en oasis (Doctoral dissertation, Université Cadi Ayyad).