

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département : Génie Chimique

Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Chimique

Thème

**Valorisation thermochimique d'une biomasse  
lignocellulosique : Analyse des gaz et des huiles pyrolytiques**

Amel DAHMOUH

Sous la direction de : Mme Inès Esma ACHOURI

M. Nicolas ABATZOGLOU

Mme Fairouz KIES

Professeure (Udes)

Professeur (Udes)

Maître de Conférences A (ENP)

Présenté et soutenu publiquement le (15/09/2025)

**Composition du jury :**

Président	M. Rabah BOUARAB	Pr	ENP (Algérie)
Promoteurs	Mme Inès Esma ACHOURI	Pr	UdeS (Canada)
	M. Nicolas ABATZOGLOU	Pr	UdeS (Canada)
	Mme Fairouz KIES	MCA	ENP (Algérie)
Examinatrice	Mme Abir AZARA	MRB	CDER (Algérie)

ENP 2025



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département : Génie Chimique

Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Chimique

Thème

**Valorisation thermochimique d'une biomasse  
lignocellulosique : Analyse des gaz et des huiles pyrolytiques**

Amel DAHMOUH

Sous la direction de : Mme Inès Esma ACHOURI

M. Nicolas ABATZOGLOU

Mme Fairouz KIES

Professeure (Udes)

Professeur (Udes)

Maître de Conférences A (ENP)

Présenté et soutenu publiquement le (15/09/2025)

**Composition du jury :**

Président	M. Rabah BOUARAB	Pr	ENP (Algérie)
Promoteurs	Mme Inès Esma ACHOURI	Pr	UdeS (Canada)
	M. Nicolas ABATZOGLOU	Pr	UdeS (Canada)
	Mme Fairouz KIES	MCA	ENP (Algérie)
Examinatrice	Mme Abir AZARA	MRB	CDER (Algérie)

ENP 2025

**ملخص :** التثمين الحراري الكيميائي للكتلة الحيوية اللجنوسليلوزية: تحليل الغازات والزيوت الناتجة عن الانحلال الحراري.

تهدف هذه الدراسة إلى تحديد المعايير التشغيلية لتحلل الكتلة الحيوية التي تمكن من تحسين إنتاج الزيت الحيوي وتحسين جودته لاستخدامه كبديل مستدام للوقود الأحفوري. وقد نُفذت التجارب في مفاعل ذي سرير ثابت باستعمال نوعين من الكتلة الحيوية، هما رقائق الصفصاف و ثمام عصوي. جرى تحليل تأثير عدة عوامل، من بينها درجة الحرارة، وسرعة التحريك، وحجم الجسيمات، على مردود المنتجات (وخاصة الزيت الحيوي) وعلى تركيبها الكيميائي. أظهرت النتائج أن ارتفاع درجة الحرارة يزيد من مردود الزيت الحيوي، لا سيما في حالة رقائق الصفصاف الغنية باللجنين. وعند درجة حرارة 500 °م، لم يكن لحجم الجسيمات تأثير واضح على المردود، غير أن الكتلة الحيوية الخام أسهمت في إثراء الزيت الحيوي بمركبات الفوران. كما بينت النتائج أن زيادة سرعة التحريك تؤدي إلى ارتفاع نسبة مركبات الفوران. وانخفاض محتوى الفينولات في الزيت الحيوي الناتج عن الانحلال الحراري للثمام العصوي المطحون.

**كلمات دالة:** الكتلة الحيوية السلولوزية، التحلل الحراري، المفاعل ذو السرير الثابت، الزيت الحيوي، الطاقة.

### **Abstract: Thermochemical Valorization of Lignocellulosic Biomass: Analysis of Pyrolytic Gases and Oils**

This study aims to identify the operating parameters of biomass pyrolysis in order to optimise the bio-oil yield and improve its quality, with a view to using it as a sustainable alternative to fossil fuels. Experiments were conducted in a fixed-bed reactor with two types of biomass, willow chips and switchgrass. The effect of various parameters, including pyrolysis temperature, stirring speed and particle size on the yield and composition of the pyrolysis products, primarily bio-oil, was investigated. The results showed that increasing the temperature enhances the bio-oil yield, particularly for willow chips rich in lignin. At 500 °C, the biomass particle size has no significant effect on the product yield; however, raw biomass contributed to enriching bio-oil with furan compounds. Furthermore, increased stirring speeds led to enhance the fraction of furan compounds and decrease that of the phenol compounds in the bio-oil produced from the pyrolysis of ground switchgrass.

**Keywords:** Lignocellulosic biomass, pyrolysis, fixed-bed reactor, bio-oil, energy.

### **Résumé : Valorisation thermochimique d'une biomasse lignocellulosique : Analyse des gaz et des huiles pyrolytiques**

Cette étude vise à identifier les paramètres opératoires, de la pyrolyse d'une biomasse, qui permettent d'optimiser le rendement en biohuile et d'améliorer sa qualité en vue d'une utilisation comme alternative durable aux carburants fossiles. Les essais ont été réalisés dans un réacteur à lit fixe en utilisant deux biomasses, à savoir les copeaux de saule et le panic érigé. L'influence de différents paramètres, notamment la température de pyrolyse, la vitesse d'agitation et la taille des particules sur le rendement en produits pyrolytiques, principalement la biohuile, et sur leur composition a été étudiée. Les résultats montrent que l'augmentation de la température favorise le rendement en biohuile, en particulier pour les copeaux de saule riches en lignine. A 500 °C, la taille des particules de biomasse n'a pas d'effet significatif sur le rendement en produits, néanmoins, la biomasse brute a permis d'enrichir la biohuile en composés de type furanes. Enfin, une vitesse d'agitation élevée entraîne une augmentation de la fraction des furanes et une diminution des phénols dans la biohuile issue de la pyrolyse du panic érigé broyé.

**Mots clés :** La biomasse lignocellulosique, la pyrolyse, réacteur à lit fixe, biohuile, énergie.

## *Dédicaces*

*Je commence par me dédier ce travail, comme un hommage à mon effort, ma persévérance et mon sérieux. Chaque heure de travail, chaque défi surmonté, chaque moment de doute transformé en motivation fait partie de ce chemin.*

*À ma mère, qui as été ma meilleure amie avant même d'être ma mère. Tes conseils, ton écoute et ton amour inconditionnel ont été pour moi des lumières dans mes moments d'incertitude. Tu as toujours cru en moi, même lorsque moi-même je doutais, et c'est grâce à toi que j'ai trouvé la force d'avancer.*

*À mon père, qui as été toujours présent, silencieux mais solide comme un roc. Ton soutien constant, ton exemple et tes encouragements m'ont guidée tout au long de mon parcours. Tu m'as appris que le courage et la constance sont les clés de la réussite, et que chaque pas, même petit, compte.*

*À mes grands-parents, dont les paroles pleines de sagesse et le soutien moral inébranlable ont toujours été un moteur pour moi.*

*À mes cousins et cousines, pour leur présence chaleureuse et leur soutien affectueux. Même à distance, vous avez été une source de motivation et de bonheur qui m'a accompagnée tout au long de ce parcours.*

*À mes professeurs, qui ont contribué à ma formation depuis ma première année jusqu'à ce jour. Vous avez partagé votre savoir, votre passion et votre patience, et c'est grâce à vous que j'ai pu acquérir les compétences et la confiance nécessaires pour réaliser ce travail.*

*À mes amies, pour leur soutien, leurs encouragements et leur compagnie précieuse. Vous avez su rendre les moments difficiles plus légers et les réussites encore plus belles, et je vous en suis profondément reconnaissante.*

## *Remerciements*

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude envers Dieu, le tout puissant, pour m'avoir donné la chance, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail, ainsi que la force de surmonter chaque défi rencontré tout au long de ce parcours.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers ma professeure, Madame F. KIES, qui m'a accompagné depuis la quatrième année et a été à mes côtés tout au long de cette aventure académique. Son soutien indéfectible, ses encouragements constants et ses conseils avisés ont été une source précieuse de motivation et m'ont permis de progresser avec confiance. Sa bienveillance et son encadrement attentif ont grandement enrichi ce projet et contribué à ma réussite.

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance à l'Université de Sherbrooke, et plus particulièrement à la Faculté de Génie, pour m'avoir offert l'opportunité d'effectuer un stage de quatre mois au sein du Centre de mise à l'échelle P3. Je remercie chaleureusement toute l'équipe du centre pour leur accueil, leur disponibilité et leur esprit de collaboration, qui ont rendu cette expérience à la fois enrichissante et stimulante. Je suis particulièrement reconnaissante envers Madame I.E. Achouri et Monsieur N. Abatzoglou, pour leur rigueur, leurs conseils avisés et leur soutien constant ; ainsi qu'envers Monsieur T.S. Tanoh, Monsieur R. Kersaudy, Madame M. Rouabah et Monsieur Julien pour leur encadrement et leur accompagnement tout au long du stage. Enfin, je remercie mes collègues stagiaires pour leur collaboration et leur esprit d'équipe, qui ont rendu cette expérience encore plus enrichissante sur les plans humain et professionnel.

Je souhaite également exprimer ma vive gratitude envers Monsieur R. BOUARAB pour l'honneur qu'il m'accorde en présidant ce jury et Madame A. AZARA pour l'honneur qu'elle me fait en examinant ce travail.

### Table de matières

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des symboles	
Liste des abréviations	
Introduction générale.....	16
Patrie I : Synthèse bibliographique .....	19
Chapitre I : La biomasse : une ressource pour la valorisation énergétique.....	20
I.1. Introduction .....	21
I.2. Définitions de la biomasse.....	21
I.3. Types de biomasses végétales valorisables .....	23
I.3.1. Biomasse lignocellulosique .....	23
I.3.2. Biomasse Oléagineuse .....	23
I.3.3. Biomasse algale .....	23
I.4. Composition de la biomasse lignocellulosique .....	24
I.4.1. Cellulose .....	24
I.4.2. Hémicellulose .....	26
I.4.3. Lignine.....	28
I.4.4. Les extractibles .....	29
I.4.5. Les cendres .....	29
I.5. Principales propriétés de la biomasse.....	30
I.5.1. Taux d'humidité .....	30
I.5.2. Pouvoir calorifique .....	30
I.5.3. Rapport C/H/O/N.....	31
I.5.4. Granulométrie.....	32
I.5.5. La masse volumique .....	33
I.5.6. Densité énergétique .....	33
I.5.7. Taux de cendres .....	33
I.6. Disponibilité des ressources de la biomasse lignocellulosique .....	33
I.7. Valorisation de la biomasse lignocellulosique .....	35
I.7.1. Prétraitements .....	36
I.7.1.1. Prétraitement physique (mécanique) .....	36
I.7.1.2. Prétraitement biologique.....	36

## Liste des tableaux

---

I.7.1.3. Prétraitement physico-chimique .....	36
I.7.2. Voies de valorisation de la biomasse lignocellulosique .....	39
I.7.2.1. Voie biochimique .....	40
I.7.2.1. Voie thermochimique .....	40
Chapitre II : La pyrolyse une voies de valorisation thermochimique de la biomasse.....	43
II.1. Introduction .....	44
II.2. Définition de la pyrolyse .....	44
II.3. Produits de la pyrolyse .....	44
II.3.1. Biohuile .....	45
II.3.2. Biochar .....	45
II.3.3. Gaz de synthèse .....	46
II.4. Types de pyrolyse.....	46
II.5. Etapes de la pyrolyse.....	47
II.5.1. Séchage.....	47
II.6. Mécanismes de pyrolyse des constituants de la biomasse lignocellulosique.....	51
II.6.1. Pyrolyse de la cellulose .....	51
II.6.2. Pyrolyse de l'hémicellulose .....	55
II.6.3. Pyrolyse de la lignine .....	57
II.7. Paramètres influençant la pyrolyse .....	60
II.7.1. Effet de la température .....	60
II.7.2. Effet du temps de séjour.....	61
II.7.3. Effet de la taille des particules .....	62
II.7.4. Effet de la vitesse de chauffe.....	62
II.7.5. Effet du gaz inerte .....	62
II.7.6. Effet du type de biomasse .....	63
II.7.7. Effet des matières organiques .....	63
II.7.8. Effet du taux d'humidité de la biomasse.....	64
II.8 Réacteurs de pyrolyse.....	64
II.8.1. Réacteur à lit fixe .....	64
II.8.2. Réacteur à lit fluidisé.....	65
II.8.2.1. Réacteurs à lit fluidisé bouillonnant.....	65
II.8.2.2. Réacteurs à lit fluidisé circulant .....	66

## Liste des tableaux

---

II.8.3. Réacteur ablatif .....	66
II.8.3.1. Réacteur à vortex ablatif .....	67
II.8.3.2. Réacteur à disque rotatif ablatif .....	67
II.8.4. Réacteur de pyrolyse sous vide .....	67
II.8.5. Réacteur à cône rotatif.....	68
II.8.6. Réacteur à vis sans fin.....	69
II.8.7. Réacteur à plasma.....	70
II.8.8. Réacteur à micro-ondes .....	70
II.9. Les applications de la pyrolyse .....	71
II.9.1. Production de biocarburants et de produits chimiques.....	71
II.10. Conclusion.....	72
Chapitre III : La biohuile et ces méthodes d'analyse.....	73
III.1. Introduction.....	74
III.2. Principales propriétés physico-chimiques de la biohuile.....	74
III.2.1. Aspect de l'huile.....	74
III.1.2. Teneur en eau .....	75
III.1.3. Teneur en oxygène .....	75
III.1.4. Teneur en solides .....	75
III.1.5. Viscosité.....	76
III.1.6. Masse volumique .....	76
III.1.7. Caractère corrosif.....	76
III.1.8. Stabilité de l'huile pyrolytique.....	76
III.2. Méthodes de caractérisation de la biohuile .....	77
III.2.2. Analyse FTIR.....	77
III.2.3. Chromatographie en phase gazeuse (GC).....	78
III.2.4. Spectrométrie de masse (MS) .....	78
III.2.5. Spectroscopie RMN .....	79
III.3. Chromatographie gazeuse couplée avec la spectrométrie de masse (GC-MS).....	79
III.3.1. Chromatographie gazeuse (GC).....	79
III.3.1.1. Injecteur .....	80
III.3.1.2. Colonne capillaire, four et gaz vecteur .....	81
III.3.2. Spectromètre de masse.....	83

## Liste des tableaux

---

III.3.2.1. Source .....	83
III.3.2.3. Détecteur .....	87
III.3.3. Principaux modes d'analyse .....	88
III.3.3.1. Analyse en balayage ou fullscan .....	88
III.3.3.2. Analyses en « SIM » et « SIS » .....	88
III.3.3.3. Analyses en MS/MS .....	89
III.4. Conclusion .....	90
Partie II : Partie expérimentale .....	92
Chapitre IV : matériel et méthodes .....	93
IV.1. Introduction .....	94
IV.2. Biomasse .....	94
IV.2.1 Types de biomasse .....	94
IV.2.3. Prétraitement de la biomasse .....	95
IV.2.3.1. Lavage .....	95
IV.2.3.2. Séchage .....	96
IV.2.3.3. Broyage .....	96
IV.2.4. Caractérisation de la biomasse .....	97
IV.2.4.1. Teneur en matières volatiles .....	97
IV.2.4.2. Taux de cendres .....	98
IV.2.4.3. Taux de carbone fixe .....	99
IV.2.4.4. Teneur en eau .....	99
IV.3. Procédé de pyrolyse .....	100
IV.3.1. Description du dispositif expérimental .....	100
IV.3.2. Mode opératoire .....	101
IV.3.3. Nettoyage du réacteur .....	102
IV.4. Plan d'expérience .....	103
IV.5. Analyse des gaz incondensables .....	103
IV.6. Analyse de la biohuile .....	104
IV.7. Bilan massique .....	105
IV.7.1. Rendement en biohuile .....	106
IV.7.2. Rendement en char .....	106
IV.7.3. Rendement en gaz .....	106

## Liste des tableaux

---

IV.8. Calcul du pourcentage massique (w) des composés majoritaires de la biohuile .....	107
IV.9. Conclusion .....	107
Chapitre V : Résultats et discussion .....	108
V.1. Introduction .....	109
V.2. Analyse de la biomasse .....	109
V.3. Essai de pyrolyse à 500°C .....	110
V.3.1. Rendement en produits .....	110
V.3.2. Analyse des produits .....	110
V.3.2.1. Taux de cendres du char .....	111
V.3.2.2. Analyses de la biohuile .....	111
V.3.2.3. Analyses des gaz .....	115
V.4. Effet de la température sur les produits de pyrolyse .....	116
V.4.1. Rendement en produits .....	116
V.4.2. Composition du gaz de pyrolyse .....	117
V.4.3. Composition de la biohuile .....	118
V.5. Effet de la taille des particules sur les produits de pyrolyse .....	120
V.5.1. Rendement en produits .....	120
V.5.2. Composition du gaz de pyrolyse .....	121
V.5.3 Composition de la biohuile .....	121
V.6. Effet de l'agitation sur les produits de pyrolyse .....	122
V.6.1. Rendement des produits .....	122
V.6.2. Composition du gaz de pyrolyse .....	123
V.6.3. Composition de la biohuile .....	124
V.7. Conclusion .....	125
Conclusion générale .....	126
Bibliographie .....	129

**Confidentiel**