

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE CONSTANTINE 3



FACULTE DE GENIE DES PROCÉDES
DEPARTEMENT DE GENIES CHIMIQUE

N° D'ORDRE :

SERIE :

Mémoire de Master

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Génie chimique

**MODELISATION ET OPTIMISATION DE LA CONVERSION
D'UNE BIOMASSE ALGALE ET DE LA CELLULOSE PAR
PROCÉDÉ DE LIQUEFACTION HYDROTHERMALE**

Dirigé par :

Dr. HOUCINAT Ibtissem

Grade : Maitre de conférence classe B

Présenté par :

REMRAM Abderrahmene

AHFAIDH Madjda

RAHAB Samy

Année universitaire : 2024/2025

Session : Juin

TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX	III
LISTE DES FIGURES.....	IV
LISTE DES ABREVIATIONS.....	VII
INTRODUCTION GENERALE.....	1

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction.....	3
I.2. La biomasse	3
I.3. Procédés de traitement de la biomasse.....	7
I.4. Historique du procédé de liquéfaction hydrothermale (HTL)	10
I.5. Réactions principales impliquées dans la HTL.....	11
I.6. Importance des produits issus de la liquéfaction	13
I.7. Propriétés de l'eau sous critique	13

CHAPITRE II : EFFET DES CONDITIONS OPERATOIRES SUR LE PROCEDE DE
LIQUEFACTION HYDROTHERMALE

II.1. Introduction	16
II.2. Types de réacteurs chimiques utilisés en HTL	16
II.3. Effet des conditions opératoires.....	18
II.3.1. Effet de la température.....	18
II.3.2. Effet du temps de réaction	20
II.3.3. Densité de l'eau et pression de réaction	21
II.3.4. Effet de la concentration initiale.....	21
II.3.5. Effet des catalyseurs	22
II.3.6. Optimisation des conditions opératoires.....	22

CHAPITRE III : METHODOLOGIE

III.1. Introduction	24
III.2. Présentation de la biomasse étudiée	24
III.3. Définition et domaine d'application des plans d'expériences.....	25
III.3.1. Type de plans d'expériences.....	27
a) Modèle cinétique de la liquéfaction hydrothermale des algues	29
b) Plan de surface de réponse utilisé	31
c) Modèle cinétique de la liquéfaction hydrothermale de la cellulose	33
d) Plan de surface de réponse utilisé pour la liquéfaction hydrothermale de la cellulose..	35

CHAPITRE IV :RESULTATS ET DISCUSSION

VI.11. Introduction	39
VI.2. Modélisation du procédé de liquéfaction hydrothermale.....	39
VI.3. Modélisation de la cinétique du procédé.....	40
VI.4. Validation du model cinétique.....	41
VI.4.a. La microalgae chlorella protothecoide	41
VI.4.b. Cellulose.....	42
IV.5. Analyse statistique des produits de la HTL par le plan Box-Behnken	44
VI.5.a. La Biohuile	48
VI.5.b. Phase Aqueuse.....	50
VI.5.c. Gaz produit	52
VI.6. Optimisation des réponses par plan central Box–Behnken.....	54
IV.7. Modélisation d'un réacteur discontinu pour la liquéfaction hydrothermale.....	56
IV.8. Modélisation d'un réacteur continu de type serpentin pour la liquéfaction hydrothermale.....	59
VI.9. Conclusion.....	63
CONCLUSION GENERALE	65
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	67

الملخص

تُعد عملية التحليل الحراري الهيدروثيرمالي (HTL) من التقنيات الثرموكيميائية المبتكرة التي تتيح تحويل الكتل الحيوية الرطبة مثل السليلوز والطحالب الدقيقة (*Chlorella protothecoides*) إلى زيت حيوي، دون الحاجة إلى مرحلة تجفيف مسبقة. يجمع هذا العمل بين دراسة تجريبية على السليلوز ونمذجة متعددة الفيزياء باستخدام برنامج **COMSOL Multiphysics**، تشمل النموذج الحركي التفاعلي، انتقال الحرارة وانتقال المادة. تم تنفيذ عملية تحسين أداء العملية باستخدام خطة تجارب من نوع **Box-Behnken**، بالاعتماد على أربعة عوامل تشغيلية رئيسية: درجة الحرارة، زمن المكوث، الضغط، وتركيز الكتلة الحيوية. تم التحقق من صحة نتائج المحاكاة العددية باستخدام بيانات تجريبية، مما سمح بتوقع المردود من الزيت الحيوي، والطور المائي، والغازات الناتجة. وقد تبين أن درجة الحرارة هي العامل الأكثر تأثيراً، يليها التفاعل بين باقي العوامل. تؤكد النتائج أهمية اعتماد مقارنة متكاملة تجمع بين التجربة والنمذجة متعددة الفيزياء بهدف تحسين أداء عملية HTL وتعزيز تئمين الكتلة الحيوية في سياق التحول الطاقوي المستدام.

الكلمات المفتاحية

التحليل الحراري الهيدروثيرمالي، السليلوز، الطحالب الدقيقة، الزيت الحيوي، كومسول، النمذجة متعددة الفيزياء، النمذجة الحركية، انتقال الحرارة، انتقال المادة، خطة التجارب، التحسين.

Résumé

La liquéfaction hydrothermale (HTL) est un procédé thermochimique innovant permettant de valoriser des biomasses humides telles que la cellulose et les microalgues (*Chlorella protothecoides*) en bio-huile, sans étape de séchage préalable. Ce mémoire combine une étude expérimentale sur la cellulose et une modélisation multiphysique sous COMSOL Multiphysics, intégrant la cinétique réactionnelle, le transfert de chaleur et le transfert de matière. L'optimisation du procédé a été réalisée à l'aide d'un plan d'expériences de type Box-Behnken, basé sur quatre facteurs opératoires : la température, le temps de séjour, la pression, et la concentration en biomasse. Les simulations numériques ont été validées par des données expérimentales et ont permis de prédire les rendements en bio-huile, phase aqueuse et gaz. La température a été identifiée comme le paramètre le plus influent, suivi par les effets d'interaction entre les autres facteurs. Les résultats obtenus confirment l'intérêt d'une approche intégrée combinant expérimentation et modélisation multiphysique pour optimiser les performances du procédé HTL et améliorer la valorisation de la biomasse dans un contexte de transition énergétique.

Mots clés

Liquéfaction hydrothermale, cellulose, microalgues, bio-huile, COMSOL, modélisation multiphysique, cinétique, transfert de chaleur, transfert de matière, plan d'expériences, optimisation.

Abstract

Hydrothermal liquefaction (HTL) is an innovative thermochemical process that enables the conversion of wet biomass, such as **cellulose** and **microalgae** (*Chlorella protothecoides*), into bio-oil without the need for a prior drying step. This thesis combines an **experimental study** on cellulose with a **multiphysics modeling approach** using **COMSOL Multiphysics**, incorporating **reaction kinetics**, **heat transfer**, and **mass transfer**. Process optimization was performed using a **Box-Behnken design of experiments**, based on four key operational parameters: **temperature**, **residence time**, **pressure**, and **biomass concentration**. The numerical simulations were validated with experimental data and allowed for the prediction of yields in bio-oil, aqueous phase, and gas. Temperature was identified as the most influential factor, followed by significant interactions among the other variables. The results highlight the relevance of an **integrated approach** combining experimentation and multiphysics modeling to optimize HTL performance and enhance biomass valorization in the context of sustainable energy transition.

Keywords

Hydrothermal liquefaction, cellulose, microalgae, bio-oil, COMSOL, multiphysics modeling, kinetics, heat transfer, mass transfer, design of experiments, optimization.