

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique

Département Génie Chimique



Laboratoire Réactions et Génie des Procédés

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Chimique

Thème

Procédé de capture du CO₂ dans l'eau utilisant des contacteurs membranaires à fibres creuses : modélisation, simulation et étude paramétrique.

Réalisé par :
Fares SI TAYEB

Sous la direction de : Mme. Sabine RODE Professeur ENSIC
Mme. Fairouz KIES MCA ENP

Présenté et soutenu publiquement le 02/07/2025

Composition du jury

Président	M. Rabah BOUARAB	Professeur	ENP
Promotrices	Mme. Sabine RODE	Professeur	ENSIC
	Mme. Fairouz KIES	MCA	ENP
Examinatrice	Mme. Amina AMRI	MCA	ENP

ENP 2025

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique

Département Génie Chimique



Laboratoire Réactions et Génie des Procédés

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Chimique

Thème

Procédé de capture du CO₂ dans l'eau utilisant des contacteurs membranaires à fibres creuses : modélisation, simulation et étude paramétrique.

Réalisé par :
Fares SI TAYEB

Sous la direction de : Mme. Sabine RODE Professeur ENSIC
Mme. Fairouz KIES MCA ENP

Présenté et soutenu publiquement le 02/07/2025

Composition du jury

Président	M. Rabah BOUARAB	Professeur	ENP
Promotrices	Mme. Sabine RODE	Professeur	ENSIC
	Mme. Fairouz KIES	MCA	ENP
Examinatrice	Mme. Amina AMRI	MCA	ENP

ENP 2025

ملخص: عملية التقاط ثاني أكسيد الكربون في الماء باستخدام ملامسات غشائية ليفية مجوفة: النمذجة والمحاكاة ودراسة المعايير.

في سياق التحول في مجال الطاقة ومكافحة الاحتباس الحراري، يظل الحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (CO_2) من احتراق الوقود الأحفوري مسألة ذات أولوية. وتعد هذه الأطروحة جزءًا من هذه القضية وتركز على نمذجة عملية التقاط ثاني أكسيد الكربون في مرحلة ما بعد الاحتراق، والتي تعمل تحت الضغط الجوي. ويتمثل الهدف الرئيسي في تقييم أداء حلقة امتصاص كاملة باستخدام ملامسات غشائية ليفية مجوفة، مع استخدام الماء كمذيب فيزيائي.

وتتكون العملية المقترحة من وحدة امتصاص واحدة ووحدتي امتصاص على التوالي، في تكوين مبتكر مصمم لتحسين نقل الكتلة مع الحد من متطلبات المساحة. تم نمذجة العملية باستخدام برنامج MATLAB وإجراء دراسة حساسية لتحديد معايير التشغيل التي تؤثر على أداء وحدة امتصاص، ولا سيما معدل الاسترداد، وتركيب الغاز، ونسبة الاستخراج، والتوزيع الداخلي للمقاطع العرضية للموصلات. وأخيرًا، تمت مقارنة العديد من تكوينات التجريد لتحديد التكوينات التي تقدم أفضل حل وسط بين كفاءة الامتصاص واستهلاك الطاقة.

الكلمات المفتاحية: التقاط ثاني أكسيد الكربون، ما بعد الاحتراق، الامتصاص الفيزيائي، الملامسات الغشائية، Liqui-Cel، النمذجة، المحاكاة، MATLAB.

Abstract: Process for capturing CO_2 in water using hollow fiber membrane contactors: modeling, simulation and parametric study.

In the context of the energy transition and climate change mitigation, reducing carbon dioxide (CO_2) emissions from fossil fuel combustion remains a critical challenge. This thesis addresses this issue by modelling a post-combustion CO_2 capture process operating under atmospheric pressure. The main aim is to evaluate the performance of a full absorption system using hollow fibre membrane contactors with water as the physical solvent.

The innovative process design features a single absorber coupled with two desorption units in series to enhance mass transfer efficiency and minimize equipment footprint. The simulation was carried out using MATLAB. A sensitivity analysis was conducted to determine the key operating parameters affecting absorber performance, including recovery rate, gas composition, extraction ratio and the internal distribution of the membrane sections. Lastly, several stripping configurations were evaluated to identify the optimal balance between desorption efficiency and energy consumption.

Keywords: CO_2 capture, post-combustion, physical absorption, membrane contactors, Liqui-Cel, process modelling, simulation, MATLAB.

Résumé : Procédé de capture du CO_2 dans l'eau utilisant des contacteurs membranaires à fibres creuses : modélisation, simulation et étude paramétrique.

Dans un contexte de transition énergétique et de lutte contre le réchauffement climatique, la réduction des émissions de dioxyde de carbone (CO_2) issues de la combustion d'énergies fossiles reste un enjeu prioritaire. Ce mémoire s'inscrit dans cette problématique et porte sur la modélisation d'un procédé de captage du CO_2 en postcombustion, fonctionnant à pression atmosphérique. L'objectif principal est d'évaluer la performance d'une boucle complète d'absorption utilisant des contacteurs membranaires à fibres creuses, avec de l'eau comme solvant physique.

Le procédé proposé est composé d'un absorbeur unique et de deux unités de désorption en série, dans une configuration innovante visant à optimiser le transfert de masse tout en limitant l'encombrement. La modélisation du procédé a été réalisée sous MATLAB. Une étude de sensibilité a permis d'identifier les paramètres opératoires influençant les performances de

l'absorbeur, notamment le taux de récupération, la composition du gaz, le rapport d'extraction et la répartition interne des sections du contacteur. Enfin, plusieurs configurations de stripage ont été comparées pour déterminer celle offrant le meilleur compromis entre efficacité de désorption et consommation énergétique.

Mots clés : Captage du CO₂, postcombustion, absorption physique, contacteurs membranaires, Liqui-Cel, modélisation, simulation, MATLAB.

Remerciements

Ce Projet de Fin d'Études a été réalisé au sein du Laboratoire Réactions et Génie des Procédés (LRGP) à Nancy, sous la direction de Mme Sabine Rode. Je lui adresse mes plus sincères remerciements pour la confiance qu'elle m'a témoignée, pour sa disponibilité constante, ses conseils avisés, son encadrement rigoureux et sa bienveillance. Travailler sous sa supervision a été un immense privilège, et c'est en grande partie grâce à son accompagnement que j'ai pu faire mes premiers pas dans le domaine de la recherche scientifique. Qu'elle trouve ici l'expression de mon profond respect et de ma sincère reconnaissance.

Je remercie également chaleureusement M. Rabah BOUARAB, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de soutenance. Mes remerciements vont également à Mme Amina AMRI, pour avoir accepté d'évaluer mon travail.

J'adresse mes plus vifs remerciements à M. Y. Laidani, doctorant au LRGP, pour son aide précieuse, sa disponibilité et ses conseils techniques, qui m'ont été d'un grand soutien tout au long de ce projet.

Je souhaite exprimer une reconnaissance toute particulière à l'ensemble de l'équipe du LRGP. Leur accueil chaleureux, leur disponibilité et leur esprit collaboratif ont grandement facilité mon intégration. Je les remercie sincèrement de m'avoir considéré comme l'un des leurs tout au long de cette expérience. Sans leur soutien humain et scientifique, ce travail n'aurait jamais pu être mené à bien.

Enfin, j'exprime toute ma reconnaissance à mes parents, véritables piliers de mon parcours, pour leur soutien inconditionnel, leurs sacrifices et leur présence constante. Leur confiance et leur amour ont été essentiels pour me permettre d'évoluer dans les meilleures conditions.

À toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce projet, j'adresse mes remerciements les plus sincères.

Dédicaces

Ce travail est dédié à toutes les personnes qui ont été à mes côtés durant ce parcours. Leur soutien, leurs encouragements et leur amour ont été des sources inestimables de motivation et d'inspiration.

À mes parents, pour leur soutien indéfectible et leur amour inconditionnel.

À ma famille, pour leur soutien tout au long de mon projet de fin d'étude.

À tous mes amis et à tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin afin de réaliser ce modeste travail.

À mes professeurs, pour leur enseignement et leurs conseils précieux.

Fares SI TAYEB

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Nomenclature

Abréviations

<i>Introduction Générale</i>	15
<i>Chapitre 1</i>	18
<i>Le dioxyde de carbone : contexte et enjeux</i>	18
1.1. CO ₂ comme gaz à effet de serre	19
1.2. Origines et sources du CO ₂	22
1.3. Cadres réglementaires et engagements internationaux	25
1.3.1. Protocole de Kyoto.....	25
1.3.2. Accords de Paris.....	26
1.3.3. Neutralité Carbone	26
1.4. Place du captage du CO ₂ dans la transition énergétique.....	27
1.4.1. Procédé de captage post-combustion.....	28
1.4.2. Procédé de captage précombustion.....	29
1.4.3. Procédé de captage par oxycombustion.....	30
<i>Chapitre 2</i>	32
<i>Vers une réduction des émissions : le captage du CO₂ en post combustion</i>	32
2.1. Caractéristiques des fumées en Post combustion.....	33
2.2. Captage du CO ₂ par absorption chimique.....	34
2.2.1. Absorption du CO ₂ dans une colonne.....	34
2.2.2. Absorption du CO ₂ dans un contacteur membranaire	37
2.3. Modélisation du transfert de matière dans un contacteur membranaire ...	45
2.4. Influence des paramètres opératoires.....	48

<i>Chapitre 3</i>	54
<i>Étude et modélisation d'un procédé de captage du CO₂ par contacteur à fibres creuses</i>	54
3.1. Contacteur Liqui-Cel et processus de transfert de matière	55
3.1.1. Structure, fonctionnement et applications industrielles	55
3.1.2. Mécanisme de transfert de matière	57
3.1.3. Résistances au transfert	57
3.2. Procédé de captage du CO ₂	60
3.3. Modélisation de la section absorption.....	62
3.3.1. Approche par modèle RP – Cascade de RPA	62
3.3.2. Matrices de concentrations (gaz et liquide)	63
3.3.3. Bilans de matière pour des solutions diluées	64
3.3.4. Bilans de matière pour des solutions concentrées	66
3.4. Modélisation de la section de stripage	68
3.4.1. Calcul des pressions et concentrations en sortie	68
3.4.2. Calcul de l'énergie spécifique consommée	70
 <i>Chapitre 4</i>	 72
<i>Simulation et étude paramétrique du procédé : absorption et stripage</i>	72
4.1. Section Absorption.....	73
4.1.1. Nombre optimal de cellules pour la modélisation du procédé	74
4.1.2. Influence de l'efficacité de chaque section de l'absorbeur.....	76
4.1.3. Influence de la composition de la phase gazeuse à traiter x_{AG0}	78
4.1.4. Influence du taux de récupération TR.....	79
4.1.5. Influence de la composition de la phase liquide à l'entrée de la section d'absorption C_{AL3}^*	80
4.1.6. Influence du rapport d'extraction λ	82
4.1.7. Synthèse des résultats pour la section absorption.....	83
4.2. Section Stripage	83
4.2.1. Simulations en présence d'un unique stripeur	84
4.2.2. Simulations en présence de deux stripeurs	85
4.2.3. Simulations en présence de trois stripeurs	88

4.2.4. Synthèse des résultats pour la section de stripage	89
Conclusion générale	91
Bibliographie	95

Confidentiel