## إعلان عن مناقشة أطروحة الدكتوراه الطور لثالث -ENPC

مناقشة رسالة الدكتوراه للسيد خليفي محمد نذير " قسم هندسة الطرائق"

الشعبة: هندسة الطرائق، التخصص: هندسة الطرائق

حول الموضوع:

$CO_2$ removal by amine and carbonate solvents accelerated by an enzyme using a membrane process

**تجرى المناقشة يوم الخميس 11 ديسمبر ابتداء من الساعة الرابعة بعد الزوال بقاعة المحاضرات الطابق الأول.**

**أمام لجنة الممتحنين لمكونة من:**

| الاسم واللقب | الرتبة الجامعية أو البحثية | المؤسسة الأصلية | الصفة |
|---|---|---|---|
| دربال كروم | أستاذ | المدرسة الوطنية متعددة التقنيات -مالك بن نبي -بقسنطينة | رئيسا |
| صاولي وسيل | أستاذ محاضر 'أ' | المدرسة الوطنية متعددة التقنيات -مالك بن نبي -بقسنطينة | مشرفا |
| شيخي مصطفى | أستاذ | جامعة صالح بوبنيدر - قسنطينة 3 | ممتحنا |
| كعبوش عزالدين | أستاذ | جامعة العربي بن مهيدي - أم البواقي | ممتحنا |
| جاب الله محمد العربي | أستاذ محاضر 'أ' | المدرسة الوطنية متعددة التقنيات -مالك بن نبي -بقسنطينة | ممتحنا |
| عبد الواحد لقمان | أستاذ محاضر | المعهد الوطني للعلوم التطبيقية INSA-Rouen بروان فرنسا France | مدعوا |
| Ledoux Alain | أستاذ محاضر | المعهد الوطني للعلوم التطبيقية INSA-Rouen بروان فرنسا France | مدعوا |

**الدعوة لكل شخص يهمه الموضوع.**

**Soutenance de thèse de doctorat 3ème cycle de Mr KHELIFI Mohamed Nadir**
**Le 11/12/2025 16h00**

**THEME**: $CO_2$ removal by amine and carbonate solvents accelerated by an enzyme using a membrane process.

Spécialité: Génie des procédés.
Filière: Génie des procédés.
Département : Génie des procédés.

**Abstract**:
The continuous rise of atmospheric $CO_2$ due to fossil fuel consumption is a major driver of global warming, highlighting the urgent need for efficient and sustainable capture technologies. Hollow fiber membrane contactors (HFMCs) are recognized as an efficient process intensification approach for $CO_2$ capture via gas–liquid absorption. This thesis explores $CO_2$ separation using advanced two-dimensional (2D) Multiphysics simulations that integrate different chemical solvents MDEA, $K_2CO_3$, and $Na_2CO_3$/$NaHCO_3$ with various carbonic anhydrase enzymes (hCA, bCA, SspCA, and CA-KR1) acting as biocatalysts to enhance absorption rates. Comprehensive parametric studies were conducted to evaluate the influence of gas and liquid flow rates, enzyme concentration, membrane porosity, fiber length, solvent concentration, and flow configuration (co-current vs. counter-current) on $CO_2$ capture performance. Research findings have repeatedly shown that adding enzymes to the process significantly improves the efficiency of removing $CO_2$: hCA with MDEA increased absorption by 34%, bCA increased removal by 24% up to ~70% depending on the flow conditions, SspCA improved removal by ~16% in carbonate systems, and CA-KR1 enhanced capture by up to ~28% at concentration of 10wt% of $K_2CO_3$ solvent. Increasing gas flow rates generally reduced capture efficiency, while higher liquid flow rates, larger fiber lengths and greater membrane porosity enhanced mass transfer. The studies also show that how well the enzymes work depends on the substrate available, the catalytic capacity, and the operating conditions. The enzymes work most efficiently at optimal dosages. Overall, this work demonstrates that coupling HFMC technology with enzymatic promoters provides an innovative, sustainable, and high-performance strategy for $CO_2$ capture, offering strong potential for advancing green and circular chemistry in carbon management.

***Keywords:*** Carbon dioxide ($CO_2$); $CO_2$ absorption; Hollow Fiber Membrane Montactors (HFMC); Carbonic anhydrase (CA); Enzyme biocatalyst; Bio-promoters; Carbonate solutions ($Na_2CO_3$/$NaHCO_3$, $K_2CO_3$); MDEA; Simulation; Modelling.

**Résumé**

L'augmentation continue du $CO_2$ atmosphérique due à la consommation de combustibles fossiles est un moteur majeur du réchauffement climatique, soulignant le besoin urgent de technologies de capture efficaces et durables. Les contacteurs à membrane à fibres creuses (HFMCs) représentent un processus intensifié prometteur pour la séparation du $CO_2$ par absorption gaz-liquide. La présente thèse étudie la capture du $CO_2$ en utilisant des simulations avancées bidimensionnelles (2D) et multiphysiques avec différents solvants chimiques - MDEA, $K_2CO_3$ et $Na_2CO_3/NaHCO_3$ - combinés à diverses anhydrases carboniques (hCA, bCA, SspCA et CA-KR1) comme biocatalyseurs pour accélérer l'absorption. Une série d'analyses paramétriques ont été réalisées pour évaluer les effets des débits de gaz et de liquide, de la concentration enzymatique, de la porosité de la membrane, de la longueur des fibres, de la concentration du solvant et de la configuration de flux (co-courant/contre-courant). Les résultats de recherche ont montré à plusieurs reprises que l'ajout d'enzymes au processus améliore significativement l'efficacité de l'élimination du $CO_2$ : hCA avec MDEA a augmenté l'absorption de 34 %, bCA a augmenté l'élimination de 24 % jusqu'à ~70 % selon les conditions de flux, SspCA a amélioré l'élimination de ~16 % dans les systèmes de carbonate, et CA-KR1 a amélioré la capture jusqu'à ~28 % à une concentration de 10 % en poids de solvant $K_2CO_3$. L'augmentation des débits de gaz a généralement réduit l'efficacité de capture, tandis que des débits de liquide plus élevés, des longueurs de fibres plus longues et une plus grande porosité de la membrane ont amélioré le transfert de masse. Les études montrent également que l'efficacité des enzymes dépend du substrat disponible, de la capacité catalytique et des conditions de fonctionnement. Les enzymes fonctionnent le plus efficacement à des dosages optimaux. Dans l'ensemble, ce travail démontre que le couplage de la technologie HFMC avec des promoteurs enzymatiques offre une stratégie innovante, durable et performante pour la capture du $CO_2$, offrant un fort potentiel pour faire progresser la chimie verte et circulaire dans la gestion du carbone.

***Mots-clés*:** Dioxyde de carbone ($CO_2$); Absorption de $CO_2$; Contacteurs à membrane à fibres creuses (CMFC); Anhydrase carbonique (AC); Biocatalyseur enzymatique; Bio-promoteurs; Solutions de carbonate ($Na_2CO_3/NaHCO_3$, $K_2CO_3$); MDEA; Simulation; Modélisation.

## ملخص

الارتفاع المستمر في تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي بسبب استهلاك الوقود الأحفوري هو أحد المحركات الرئيسية للاحتباس الحراري، مما يبرز الحاجة الملحة إلى تقنيات فعالة ومستدامة لالتقاط الكربون .تمثل وحدات الاتصال الغشائية للألياف المجوفة (HFMCs) عملية مكثفة واعدة لفصل ثاني أكسيد الكربون من خلال الامتصاص الغازي-السائل .تبحث الأطروحة الحالية في احتجاز ثاني أكسيد الكربون باستخدام محاكاة متقدمة ثنائية الأبعاد (2D) ومتعددة الفيزياء مع مذيبات كيميائية مختلفة , كمثال : MDEA، $K_2CO_3$، و $Na_2CO_3/NaHCO_3$ مجتمعة مع مختلف أنزيمات الأنهيدراز الكربونية ( hCA، bCA، SspCA، وCA-KR1) كعوامل حيوية لتسريع الامتصاص .تم إجراء سلسلة من التحليلات البارامترية لتقييم تأثيرات معدلات تدفق الغاز والسائل، تركيز الإنزيم، مسامية الألياف، طول الألياف، تركيز المذيب، وتكوين التدفق (تدفق متوازي مقابل تدفق مضاد) .أظهرت نتائج الأبحاث مرارًا وتكرارًا أن إضافة الإنزيمات إلى العملية تحسن بشكل كبير كفاءة إزالة ثاني أكسيد الكربون( hCA , مع MDEA) زاد الامتصاص بنسبة 34%، وزاد bCA الإزالة بنسبة 24% حتى ~70% اعتمادًا على ظروف التدفق، وحسن SspCA الإزالة بنسبة ~16% في سوائل الكربونات، وزاد CA-KR1 الالتقاط بنسبة تصل إلى ~28% عند نسبة تركيز كتلي 10% من محلول $K_2CO_3$.زيادة معدلات تدفق الغاز عمومًا تقلل من كفاءة الالتقاط، بينما تزيد معدلات الإزالة بزيادة تدفق السائل ، وأطوال الألياف ، ونفاذية الغشاء الأكبر من نقل الكتلة. تُظهر الدراسات أيضًا أن مدى فعالية الإنزيمات يعتمد على التراكيز المتاحة، والقدرة التحفيزية، وظروف التجربة .تعمل الإنزيمات بكفاءة أكبر عند الجرعات المثلى .بشكل عام، يُظهر هذا العمل أن دمج تقنية HFMC مع المحفزات الإنزيمية يوفر استراتيجية مبتكرة ومستدامة وعالية الأداء لالتقاط ثاني أكسيد الكربون، مما يقدم إمكانيات قوية لتقدم الكيمياء الخضراء والدائمة في إدارة الكربون.



***الكلمات المفتاحية:*** ثاني أكسيد الكربون($CO_2$) ؛ امتصاص ثاني أكسيد الكربون؛ ملامس أغشية الألياف المجوفة(HFMC) ؛ الكربونيك أنهيدراز(CA) ؛ المحفز البيولوجي الإنزيمي؛ المحفزات الحيوية؛ محاليل الكربونات ($NaHCO_3/Na_2CO_3$، $K_2CO_3$؛MDEA )؛ المحاكاة؛ النمذجة.