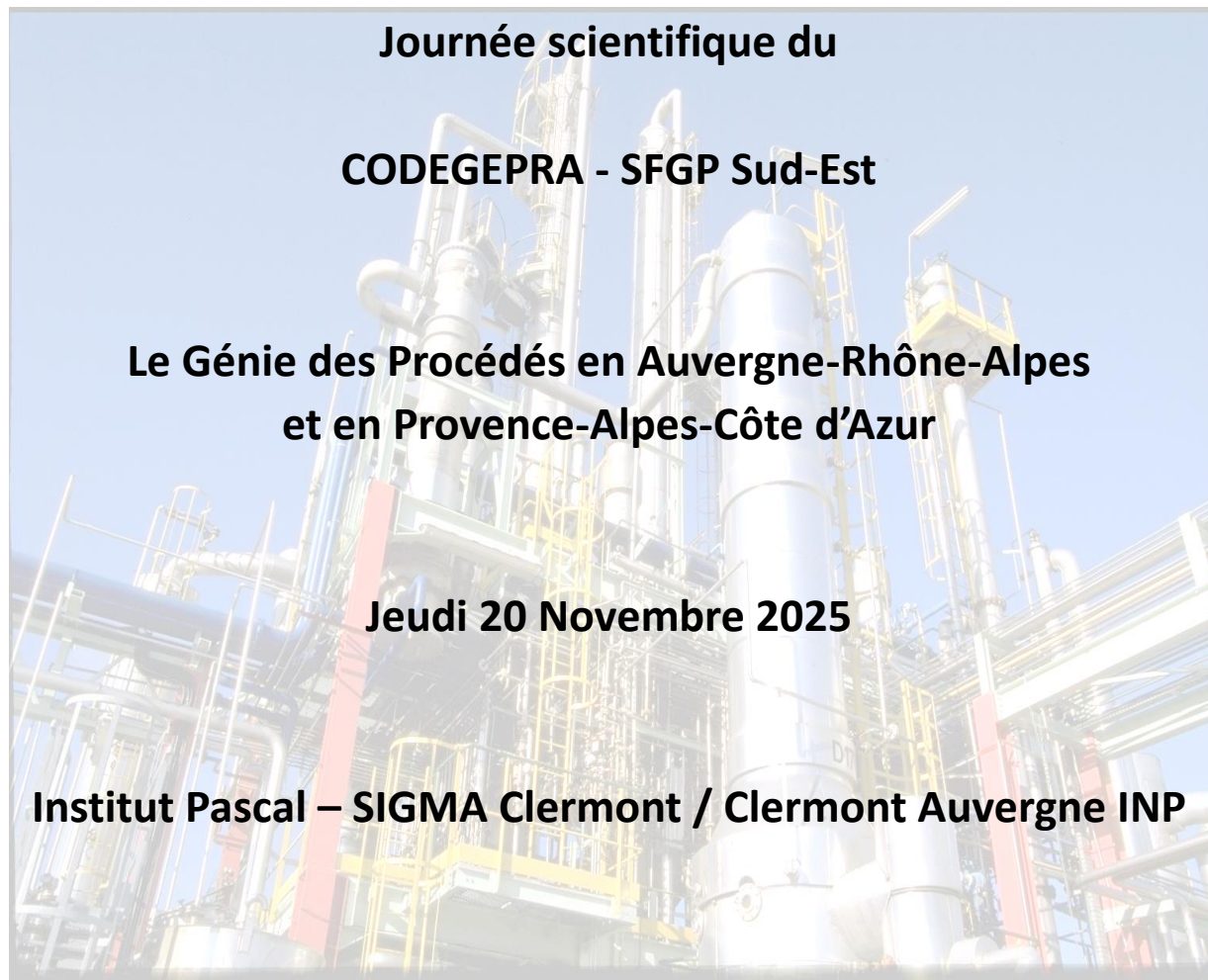




Organisé avec le soutien de :



[illegible]

Avant-Propos / Remerciements

Chers adhérents, chers participants,

L'année 2025 marque une nouvelle étape dans la vie de notre association. Et c'est à Clermont-Ferrand au cœur de l'Auvergne, dans les locaux de SIGMA Clermont, que notre communauté se retrouve pour une journée riche en partages et en découvertes.

Nous avons le plaisir de vous proposer deux conférences plénières "régionales" particulièrement intéressantes : La première, animée par M. Lionel Flesinski (Michelin) qui nous plongera dans les enjeux de la maîtrise des réacteurs de polymérisation appliqués à la fabrication de matériaux composites complexes, au service de performances industrielles accrues. La seconde, assurée par Lucie Poulet (Institut Pascal), nous transportera au-delà de notre planète avec son travail sur les systèmes de support-vie dans l'espace, démontrant combien le génie des procédés peut être un acteur central dans les défis spatiaux de demain.

L'édition 2025 met également à l'honneur les travaux de nos jeunes chercheurs avec la remise du prix de thèse CODEGEPR-SFGP Sud Est 2025 ; il a été attribué à Emilien Freville pour sa thèse intitulée "Utilisation de l'extrusion bi-vis pour des emballages cellulotiques innovants obtenus par injection et thermocompression" et effectuée au LGP2.

Comme chaque année, une attention particulière a été portée à nos chercheurs non permanents. Leurs travaux, présentés lors des sessions orales et posters, témoignent de la richesse des projets portés dans notre région et de la qualité de l'encadrement dont ils bénéficient.

Cette édition clermontoise n'est pas une simple parenthèse scientifique : elle marque aussi une étape dans la dynamique collective en vue de l'organisation du congrès national de la SFGP, qui se tiendra en 2026 à Clermont-Ferrand. Le CODEGEPR, la section régionale Sud Est de la SFGP et les laboratoires de la région seront pleinement engagés dans la réussite de cet événement d'envergure, vitrine nationale de nos savoir-faire et de notre capacité à porter ensemble une vision renouvelée du génie des procédés.

Nous vous remercions chaleureusement pour votre participation active et votre contribution à la vitalité de notre communauté scientifique. Nous espérons que cette journée, riche en échanges, vous apporte pleine satisfaction.

Fabrice GROS
Président du CODEGEPR

Table des matières

Avant-Propos / Remerciements	1
Programme prévisionnel	3
Conférences plénières	4
Evolution des phénomènes physiques en interaction avec la chimie. Maitrise du réacteur de polymérisation : un système aux couplages complexes.....	4
Vivre dans l'espace : le génie des procédés au cœur des systèmes support-vie	5
Prix de thèse CODEGEPR 2025	6
Communications des chercheurs non permanents	7
P1 - Enrichissement de microalgues en carbohydrates par recyclage de phase aqueuse hydrothermale	8
P2 - Caractérisation et modélisation d'un réacteur multiphasique à lit élastique	9
P3 - Gestion des Données issues des Systèmes de Culture Contrôlée pour l'Espace	10
P4 - Détection non-intrusive d'encrassement par dissipation thermique : modélisation CFD et régression symbolique de résistance thermique	11
P5 - Étude de la coprécipitation des précurseurs d'hydroxydes de NMC de l'échelle laboratoire à l'échelle pilote	12
P6 - Étude d'un procédé de fermentation sombre pour la production de biohydrogène à partir de résidus des industries laitières	13
P7 - Catalytic depolymerization of xylan to sugars over WO _x /TiO ₂ catalyst	14
P8 - Valorisation du LDPE par pyrolyse catalytique sur des mousses fonctionnalisées de zéolithe	15
P9 - Understanding and modelling the mechanisms of lithium chloride extraction using LiAl-LDH	16
P10 - Etude expérimentale et numérique de l'efficacité de l'émulsification double dans des mousses métalliques à cellules ouvertes	17
P11 - Visualisation quantitative du transfert de matière d'hydrogène en phase aqueuse	18
P12 - Hydrodynamique multi-échelle des bulles dans les liquides organiques : mesures locales dans une colonne à bulles et étude de la coalescence et de la rupture des bulles	19
P13 - Analyse d'un écoulement diphasique dans une colonne à bulles à contre-courant en fonction des paramètres opératoires : étude expérimentale des vitesses	20

Programme prévisionnel

9h00 : Mot d'accueil

9h05 : 1^{ère} conférence plénière animée par Lionel Flesinski (Michelin) ***Evolution des phénomènes physiques en interaction avec la chimie. Maitrise du réacteur de polymérisation : un système aux couplages complexes.***

9h35 : Communications orales des non permanents

11h00 : Pause-café - poster

11h30 : 2^{ème} conférence plénière, Lucie Poulet (Institut Pascal) ***Vivre dans l'espace : le génie des procédés au cœur des systèmes support-vie***

12h00 : Buffet et séance posters

13h30 : Remise du prix de thèse 2024 à Emilien Freville (LGP2) ***Utilisation de l'extrusion bi-vis pour des emballages cellulosiques innovants obtenus par injection et thermocompression***

14h00 : Assemblée générale du CODEGEPR

14h30 : Remise des prix poster/communication orale

14h45 : Fin de la journée

Conférences plénières

Evolution des phénomènes physiques en interaction avec la chimie. Maîtrise du réacteur de polymérisation : un système aux couplages complexes

FLESINSKI Lionel, SCHWEITZER Jean-Marc

Compagnie Générale des Etablissements Michelin, 63000 Clermont-Ferrand

Dans le cadre de la conception d'un objet composite performant, on distingue plusieurs étapes qui vont de l'assemblage de matériaux composites à la polymérisation de monomères dans un réacteur de polymérisation. La maîtrise de l'étape de polymérisation est clé à plus d'un titre. En plus d'avoir un impact direct sur la performance finale de l'objet composite, cette étape doit répondre à des enjeux de performance industrielle et d'efficacité de conception.

Afin de répondre à ces enjeux, il est nécessaire de pouvoir appréhender au bon niveau les différents phénomènes mis en jeu dans le réacteur de polymérisation. On peut citer l'hydrodynamique, la cinétique chimique, la thermodynamique, les phénomènes de transferts ou encore la rhéologie comme des aspects permettant de décrire les phénomènes physiques à l'œuvre dans un réacteur de polymérisation. Le haut niveau de couplage de ces phénomènes est une difficulté significative à surpasser pour pouvoir modéliser le réacteur de polymérisation de la manière la plus représentative possible.

Pour ce faire, des outils de modélisation plus ou moins complexes permettent d'atteindre un niveau de compréhension adapté pour décrire le réacteur de polymérisation et plus particulièrement les liens entre le procédé et le produit. Ces outils mobilisent des niveaux de précision variables et mettent en jeu des compétences multidisciplinaires étendues.

Références

Labík, Libor; Petricíček, Radim; Moucha, Tomáš; Brucato, Alberto; Caputo, Giuseppe; Grisafi, Franco; Scargiali, Francesca (2018) Scale-up and viscosity effects on gas–liquid mass transfer rates in unbaffled stirred tanks. In : Chemical Engineering Research and Design, vol. 132, p. 584–592

Zhang, Simon X.; Ray, W. Harmon (1997) Modeling of imperfect mixing and its effects on polymer properties. In : AIChE Journal, vol. 43, n° 5, p. 1265–1277.

Vivre dans l'espace : le génie des procédés au cœur des systèmes support-vie

POULET Lucie

Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS, Institut Pascal, F-63000 Clermont–Ferrand

La survie humaine dans l'espace n'est pas triviale et jusqu'à présent, en orbite basse, celle-ci a été assurée par des systèmes de support de vie physico-chimiques semi-ouverts. Pour des missions longue durée, sur la Lune ou sur Mars, il sera nécessaire de développer des boucles de recyclage robustes et fiables, intégrant des processus biotiques, nécessaires pour la production alimentaire. L'intégration d'organismes biologiques et de processus abiotiques permet le développement d'écosystèmes artificiels clos.

Cette présentation détaillera le programme MELISSA (Micro-Ecological Life Support System Alternative), mené par l'Agence spatiale européenne, comme exemple de système de support de vie biorégénératif à grande échelle. Une approche de génie des procédés est suivie sur les différentes phases et ceci est primordial pour assurer la caractérisation et l'intégration des différents processus biologiques, chimiques et physiques.

Prix de thèse CODEGEPR 2025

Utilisation de l'extrusion bi-vis pour des emballages cellulosiques innovants obtenus par injection et thermocompression

FREVILLE Emilien

Docteur de l'Université Grenoble Alpes

Ces travaux de thèse visent à proposer une solution biosourcée, biodégradable et recyclable, dans la filière papier/carton, pour remplacer certains emballages en plastique à usage unique. La stratégie adoptée consiste à utiliser des fibres de cellulose issues de pâtes à papier pour obtenir des produits fonctionnels en trois dimensions, par des procédés traditionnellement utilisés dans la plasturgie, tels que l'extrusion, l'injection et la thermocompression, facilitant ainsi le transfert industriel de la technologie développée. Pour atteindre cet objectif, il a été nécessaire de rendre injectables des suspensions fibreuses à haute concentration afin d'obtenir des matériaux aux propriétés d'usage ciblées (dont les propriétés barrières), en s'appuyant sur une approche multi-échelle et à l'interface de la physico-chimie des suspensions et du génie des procédés. L'association d'un prétraitement mécanique et enzymatique des fibres et d'un traitement mécanique sévère en extrudeuse bi-vis a permis de produire une « pâte » de microfibrilles de cellulose (MFC) concentrée (~ 20 % en matière sèche) aux propriétés optimisées et que l'on peut comparer à celles des suspensions de MFC traditionnelles (~3%). Cette pâte de MFC a ensuite été injectée à la surface d'un objet cellulosique préformé (cellulose moulée), lui conférant des propriétés barrières à l'oxygène et à l'huile. Malgré sa bonne injectabilité due à ses propriétés rhéologiques et les résultats prometteurs obtenus lors de son application en surface, cette pâte de MFC s'est toutefois avérée moins adaptée à la fabrication d'objets 3D massifs. En effet, la quantité d'eau à éliminer lors du séchage était encore trop grande, entraînant d'importants phénomènes de retrait lors du séchage. Le taux de matière sèche de la pâte de MFC a donc été augmenté jusqu'à 50% grâce à une élévation de température lors du traitement en extrudeuse bi-vis. Les propriétés rhéologiques du matériau obtenu, semblable à celles d'une poudre, ont été ajustées par l'addition ultérieure d'un polymère en faible quantité (inférieure à 10 %) ce qui a permis d'atteindre une bonne injectabilité. Après thermopressage, un matériau lisse présentant également des propriétés de barrière à l'huile est obtenu. Cependant, le retrait au séchage restait limitant pour des formes complexes. Pour surmonter cette difficulté, une stratégie disruptive a été adoptée. Les fibres cellulosiques vierges (exclues de prétraitements mécanique ou enzymatique) ont été mélangées simultanément à un polymère aux propriétés lubrifiantes (quantité inférieure à 10%) dans une extrudeuse. Le matériau obtenu après extrusion a pu être injecté dans un moule et séché pour obtenir des objets cellulosiques aux formes tridimensionnelles prometteuses, avec un retrait limité.

[illegible]

P1 - Enrichissement de microalgues en carbohydrates par recyclage de phase aqueuse hydrothermale

LECOEUCHE Victor^{a*}, SIX Alexandre^b, DIMITRIADES Alexandra^a, SASSI Jean-François^a et DELRUE Florian^a

^aPlateforme MicroAlgues – CEA, CEA Tech Région Sud, F-13108 Saint Paul lez Durance, France

^bAix-Marseille University, CEA, CNRS, Institute of Biosciences and Biotechnologies, 13108 Saint Paul lez Durance, France

Les microalgues constituent une source de biocarburants prometteuse, mais encore limitée par les coûts de production. L'utilisation de fertilisants, et le séchage de la biomasse sont parmi les principaux facteurs de coûts (Gurreri et al., 2024). La carbonisation hydrothermale (HTC) permet de convertir la biomasse humide en hydrochar, un carburant solide, tout en générant un effluent, la phase aqueuse (AP). L'AP peut être recyclée comme fertilisant à la condition qu'elle soit diluée pour atténuer l'effet toxique associé à certains composés (Das et al., 2020). Puisque la présence de carbohydrates favorise le rendement de l'HTC (Li et al., 2020), cette étude cible la réutilisation de phase aqueuse hydrothermale pour produire des microalgues enrichies en carbohydrates. Trois souches du genre *Chlorellaceae* disposées à accumuler des carbohydrates en carence d'azote ont été cultivées 380 heures. Deux milieux de culture ont été testés, un milieu contrôle, riche en nutriments, et un milieu similaire contenant 1% d'AP et une quantité réduite de nutriments pour compenser l'apport de l'AP.

Table 1. Suivi de l'accumulation de microalgues et de carbohydrates au long de l'épuisement d'azote puis en condition de carence

		PK 251		CV 924		PK 2152	
		Contrôle	1% AP	Contrôle	1% AP	Contrôle	1% AP
Ti = 0 h	Masse sèche	0,1 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,1 ± 0,0
	% Carbohydrates	4,0 ± 1,7	9,7 ± 5,2	9,0 ± 1,1	27 ± 2,0	2,2 ± 0,9	14 ± 0,9
T* = 200 h	Masse sèche	3,2 ± 0,1	3,5 ± 0,2	3,7 ± 0,1	2,9 ± 0,2	3,5 ± 0,1	2,2 ± 0,2
	% Carbohydrates	9,4 ± 2,4	29 ± 3,2	17 ± 5,3	18 ± 0,9	17 ± 2,1	8,2 ± 0,9
Tf = 382 h	Masse sèche	8,3 ± 0,2	7,3 ± 0,2	7,5 ± 0,0	7,4 ± 0,2	5,8 ± 0,0	2,5 ± 0,1
	% Carbohydrates	39 ± 0,6	54 ± 1,6	39 ± 2,5	54 ± 1,6	33 ± 1,6	3,3 ± 1,1

T* correspond à l'épuisement de l'azote. PK : *Parachlorella kessleri*. CV : *Chlorella vulgaris*

Parachlorella kessleri 2152 a vu sa croissance fortement inhibée par l'AP. Cela pourrait s'expliquer par son plus petit diamètre impliquant une plus grande sensibilité aux polluants (Duan et al., 2017). *Parachlorella kessleri* 251 et *Chlorella vulgaris* 924 ont vu leur productivité de glucides moyenne augmenter de plus de 20 % en présence d'AP atteignant 4,0 ± 0,4 g/L contre 3,1 ± 0,2 g/L en condition contrôle. Les substrats organiques contenus dans l'AP pourraient expliquer ce gain (Cao et al., 2023). Ainsi, le recyclage de l'AP pour produire des microalgues est une piste prometteuse pour l'optimisation de la production d'hydrochar. Ce travail sera poursuivi par la calibration d'un modèle biologique de la production de carbohydrates chez les microalgues.

Références

- Cao, Y., Yang, S., Wang, J., Kong, W., Guo, B., Xi, Y., Zhang, A., Yue, B., 2023. Metabolomic exploration of the physiological regulatory mechanism of the growth and metabol characteristics of *Chlorella vulgaris* under photoautotrophic, mixotrophic, and heterotrophic cultivation conditions. *Biomass Bioenergy* 173, 106775.
- Das, P., AbdulQuadir, M., Thaher, M., Khan, S., Chaudhary, A.K., Al-Jabri, H., 2020. A feasibility study of utilizing hydrothermal liquefaction derived aqueous phase as nutrients for semi-continuous cultivation of *Tetraselmis* sp. *Bioresour Technol* 295, 122310.
- Duan, W., Meng, F., Lin, Y., Wang, G., 2017. Toxicological effects of phenol on four marine microalgae. *Environ Toxicol Pharmacol* 52, 170–176.
- Gurreri, L., Calanni Rindina, M., Luciano, A., Falqui, L., Fino, D., Mancini, G., 2024. Microalgae production in an industrial-scale photobioreactors plant: A comprehensive Life Cycle assessment. *Sustainable Chem Pharm* 39, 101598.
- Li, Y., Liu, H., Xiao, K., Jin, M., Xiao, H., Yao, H., 2020. Combustion and Pyrolysis Characteristics of Hydrochar Prepared by Hydrothermal Carbonization of Typical Food Waste: Influence of Carbohydrates, Proteins, and Lipids. *Energy Fuels* 34, 430–439.

*Auteur/s à qui la correspondance devra être adressée : victor.lecoeuche@cea.fr

P2 - Caractérisation et modélisation d'un réacteur multiphasique à lit élastique

TRICAS Laura, FONGARLAND Pascal, PHILIPPE Régis, EDOUARD David
CP2M, Université Lyon 1, CNRS, CPE, 4 Rue Victor Grignard, 69100 Villeurbanne

Introduction

Inspiré par les réacteurs multiphasiques intensifiés à l'aide de garnissages structurés et d'opérations périodiques, un nouveau concept appelé réacteur à lit de mousse élastique (Elastic Foam-bed Reactor, EFR)^{1,2} a été développé. Ce réacteur permet la modification in-situ de la morphologie du garnissage structuré au cours du temps. Il se compose d'une colonne remplie de deux blocs de mousses de polyuréthane élastomères qui sont soumis à des cycles périodiques de compression et décompression réalisés grâce à un système de vilebrequin. Cet abstract présente une étude hydrodynamique et de transfert de matière visant à comparer les performances de l'EFR à celles de réacteurs à lit fixe (Fixed Foam-bed Reactor), et à évaluer son potentiel pour des applications multiphasiques.

Matériaux et méthodes

Trois paramètres clés sont estimés pour caractériser le réacteur en configuration gaz-liquide à contre-courant : (i) La distribution des temps de séjour (DTS) obtenue à l'aide d'une injection pulsée d'une solution de KCl suivie par conductimétrie. (ii) La perte de charge, mesurée à l'aide d'un capteur différentiel de pression. (iii) Le coefficient global de transfert de matière gaz-liquide (k_{la}), estimé par le strippage de l'O₂ dans l'eau par le N₂, mesuré à l'aide d'une sonde à oxygène.

Chaque paramètre est évalué selon deux modes de fonctionnement du réacteur :

- Mode lit fixe en mousse (FFR), sans cycle de compression et décompression.
- Mode lit dynamique (EFR), avec une fréquence du piston de 1 Hz et une compression de 80%.

Cette approche comparative permet d'analyser l'efficacité de l'EFR par rapport à un système FFR.

Résultats

La première campagne expérimentale a fourni des résultats très prometteurs en termes de transfert de matière gaz-liquide. La modélisation à partir de la DTS du réacteur a mis en évidence la bonne adéquation du modèle piston-dispersif pour décrire l'écoulement des fluides dans les modes FFR et EFR. Les résultats montrent une rétention liquide de 20% en FFR, qui peut augmenter jusqu'à 70% en EFR pour les vitesses les plus élevées. La modélisation du k_{la} , réalisée à partir du même modèle, révèle une amélioration significative du mélange et du contact interfacial, avec une augmentation de 150 % des valeurs en mode EFR dans les mêmes conditions opératoires pour les deux modes. Les pertes de charge en mode EFR présentent une évolution dynamique, fonction de la fréquence du piston. Cette variation de la pression traduit un écoulement liquide et gazeux non conventionnel et caractéristique du mode EFR. Un modèle a été développé, basé sur les équations dynamiques du mouvement des fluides et couplé aux résultats expérimentaux, afin de mieux comprendre les phénomènes hydrodynamiques se produisant au cours des cycles. Ces résultats démontrent une réduction notable des limitations liées au transfert gaz-liquide pour les réactions exigeantes, tout en maintenant une excellente distribution des phases, grâce au mélange intensifié induit par le mouvement du piston.

Conclusion

La comparaison des deux modes de fonctionnement met en évidence une amélioration des performances du réacteur pour le mode EFR. Deux stratégies de mise à l'échelle sont en cours de développement, elles permettront de démontrer la faisabilité d'une mise en œuvre à une échelle supérieure.

Références

Michaud M., Bornette F., Rautu E., More S. H., Leonardo Martinez Mendez M., Jierry L., Edouard D. Unprecedented Continuous Elastic Foam-Bed Reactor for CO₂ Capture. Chem. Eng. J. 2023, 452, 138604
Tricas L., Caractérisation d'un réacteur à lit élastique [communication orale]. Congrès annuel de la Société Française des Génies des Procédés ; 2024 Oct; Deauville, France.

P3 - Gestion des Données issues des Systèmes de Culture Contrôlée pour l'Espace

BATHICH Carlos, PUGHON Laurent, DUSSAP Claude-Gilles, POULET Lucie

Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS, Institut Pascal, F-63000 Clermont–Ferrand

La Plant Characterization Unit (PCU), située à l'Université de Naples, constitue une infrastructure expérimentale, permettant l'étude de la croissance de multiples espèces végétales dans un environnement à paramètres entièrement contrôlés. Cette installation offre la possibilité de générer des données quantitatives et qualitatives essentielles à la caractérisation fine des processus physiologiques et biochimiques des plantes sous diverses conditions opératoires. Ces informations sont mobilisées pour la validation et la calibration de modèles mécanistes décrivant la croissance, le métabolisme et le développement végétal dans le cadre des Systèmes de Support de Vie Bio-régénératifs (BLSS), dispositifs clés pour le maintien de la vie humaine lors de missions spatiales de longue durée.

Compte tenu du volume et de la complexité des données produites, une activité de gestion des données (data management) dédiée a été développée. Celle-ci vise à normaliser et harmoniser les procédures de collecte, de traitement, de stockage et de réutilisation des données expérimentales, conformément aux principes FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable). L'objectif principal est d'optimiser la traçabilité et la valorisation des données, tout en optimisant la collaboration entre les équipes de recherche et les partenaires institutionnels du projet, au moyen de la définition de protocoles normalisés et de l'utilisation d'une plateforme de stockage et de diffusion.

Les différentes données acquises seront présentées ainsi que les enjeux associés à leur interopérabilité et à leur archivage à long terme. Une attention particulière sera portée à la chaîne de transformation des données, décrivant les étapes de conversion des données brutes en ensembles de données exploitables pour la modélisation et la simulation des procédés. Enfin, les premiers développements d'un dépôt open source, interrogeable, accessible et conforme aux standards de la recherche ouverte, intégrant un ensemble complet de métadonnées techniques et expérimentales, seront détaillés.

Les différents formats de données acquis seront présentés ainsi que les défis associés à leur réutilisation. Une attention particulière sera portée au processus de transformation des données, décrivant les étapes de conversion des données brutes en ensembles de données exploitables et archivées dans un dépôt open source. Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet PaCMan (*Plant Characterization Unit for closed life support system – Maintenance, subsystem integration, review and scientific deployment*) financé dans le cadre du contrat ESA 4000115852/15/NL/AT.

P4 - Détection non-intrusive d'encrassement par dissipation thermique : modélisation CFD et régression symbolique de résistance thermique

RICHERMOZ Nathan^a, PHAM Quynh Trang^a, ANXIONNAZ-MINVIELLE Zoé^a, BOUVIER Laurent^b, DELAPLACE Guillaume^b

^aUniv. Grenoble Alpes, CEA, LITEN, France

^bUniv. Lille, CNRS, INRAE, Centrale Lille Institut, UMR 8207 – UMET, France

Sur les parois d'un procédé un encrassement peut se former. C'est un dépôt indésirable ayant pour conséquences notamment une réduction des sections de passage et ainsi une diminution des performances thermo-hydrauliques. Actuellement, les procédures de nettoyage de l'encrassement sont conservatives car le suivi en temps réel de l'évolution des dépôts n'est pas réalisé. Ainsi le développement de capteurs d'encrassement est un enjeu de réduction des émissions de gaz à effet de serre [1] car le nettoyage peut représenter jusqu'à 76% [Zouaghi] du score d'impact environnemental d'un procédé.

Le principe du capteur étudié (Figure 1) repose sur l'effet thermorésistif d'une couche de nickel encapsulée dans du polyimide résistant électriquement et conduisant thermiquement. La sonde est collée à l'extérieur de la paroi étudiée et isolée thermiquement du milieu ambiant. La géométrie étudiée est un tube, ainsi le cas d'étude se réduit à un problème 2D axisymétrique. Le capteur joue le rôle d'émetteur et de récepteur : une puissance thermique est dissipée par effet Joule et une température est mesurée par l'intermédiaire de la résistance électrique.



Figure 1. Sonde de détection de l'encrassement (droite) et sonde fixée sur un tuyau (gauche)

Un modèle CFD (Computational Fluid Dynamics) du système est établi en deux dimensions (Figure 2), il modélise les champs de température et flux thermique. Ce modèle est validé par des expériences sans encrassement. Est isolé de ce modèle la température dans le capteur ce qui constitue ensuite une base de données avec différents matériaux et épaisseurs du tuyau et du dépôt ainsi que différents débits et la température d'entrée du fluide. Une analyse dimensionnelle est effectuée sur la base de données. L'étude se concentre sur la création d'une corrélation à l'aide de régression symbolique (Figure 3). La méthodologie inclut une réflexion sur le nombre de données nécessaires, en fonction du nombre de paramètres étudiés, ainsi que sur le choix de l'objet de la corrélation parmi la température dans le capteur ou la résistance thermique entre le capteur et le fluide. Les corrélations créées sont analysées avec un second jeu de données préalablement retiré de la base de données.

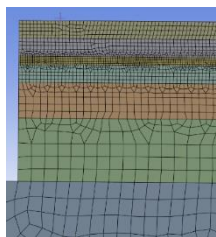


Figure 2. Modèle CFD de la sonde de détection d'encrassement

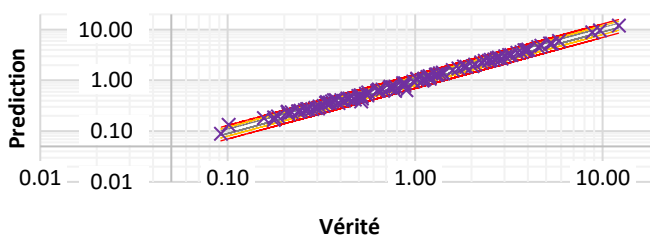


Figure 3. Graphe d'erreur issu d'une régression symbolique, les lignes grises, jaunes et rouges correspondent respectivement à des erreurs de 10%, 20% et 30%

En conclusion, une sonde de détection d'encrassement a été modélisée en CFD. Ce modèle 2D a permis de constituer une base de données exploitée par une régression symbolique. Cette présentation se concentre sur l'analyse critique de la mise en place de cet outil innovant de traitement de données

Références

Overview of Conference Series », 7 octobre 2024. <https://heatexchanger-fouling.com/about-conference-series/>
S. Zouaghi, J. Frémiot, C. André, M. A. Grunlan, C. Gruescu, G. Delaplace, S. Duquesne, M. Jimenez, ACS Sustain. Chem. Eng., vol. 7, no 10, p. 9133-9142, 2019

P5 - Étude de la coprécipitation des précurseurs d'hydroxydes de NMC de l'échelle laboratoire à l'échelle pilote

BRAIK Rayen^a, BOUILLOT Baptiste^a, CAMEIRAO Ana^a, RAPONI Antonello^a, MARCHISIO Daniele^b, VUKASIN Julien^c

^aCentre SPIN, Mines Saint-Etienne, Univ Lyon, CNRS, UMR 5307 LGF, 42023 Saint-Etienne, France

^bDISAT, Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi, 24, 10129 Turin, Italie

^cDépartement Développement et Recherche, ORANO, France

La transition énergétique mondiale repose en grande partie sur le développement de batteries lithium-ion performantes, dont les propriétés dépendent intrinsèquement de la qualité des matériaux cathodiques NMC (Nickel-Manganèse-Cobalt). La coprécipitation des précurseurs hydroxyde $\text{Ni}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Co}_y(\text{OH})_2$ de ces matériaux constitue une opération unitaire critique où convergent des phénomènes complexes de nucléation, croissance cristalline, agglomération et hydrodynamique réactionnelle. Le verrou scientifique majeur réside dans le passage de l'échelle laboratoire à l'échelle industrielle, où les gradients de concentration, température et intensité de mélange modifient radicalement la cinétique de formation et les propriétés des particules. Cette problématique fondamentale en génie des procédés nécessite une approche intégrative combinant expérimentation avancée et modélisation multi-échelle.

Cette thèse vise à développer un modèle prédictif en couplant les bilans de population (PBE) à la mécanique des fluides numérique (CFD), s'appuyant sur les approches pionnières de Shiea et al.. Ce modèle permettra de capturer l'interaction complexe entre l'hydrodynamique du réacteur, le mélange à l'échelle moléculaire, les réactions chimiques et l'évolution de la population de particules. Des expériences de coprécipitation seront menées à l'échelle laboratoire dans un réacteur batch, en variant les paramètres critiques (pH, concentration métallique, température, etc.) et en caractérisant finement les précurseurs obtenus. Les données expérimentales permettront de calibrer et valider le modèle CFD-PBE. Une validation expérimentale à l'échelle pilote viendra ensuite confirmer la robustesse de la stratégie de transposition et affiner les paramètres du modèle.

Cette recherche apportera des avancées significatives en génie de la cristallisation et en scale-up de procédés réactifs complexes. Elle contribuera à une meilleure compréhension des phénomènes de coprécipitation multi-composants en conditions de mélange imparfait et fournira un cadre de modélisation intégré CFD-PBE transposable à d'autres systèmes de précipitation d'intérêt industriel. En remplaçant les approches empiriques coûteuses par une démarche prédictive rationnelle, ces travaux accéléreront le développement industriel et contribueront à la transition énergétique.

Mots clés : Coprécipitation, batteries lithium-ion, NMC, CFD-PBE, modélisation multi-échelle, scale-up, optimisation de procédés, transition énergétique

Références

Shiea, M., Querio, A., Buffo, A., Boccardo, G., Marchisio, D. (2022). CFD-PBE modelling of continuous Ni-Mn-Co hydroxide coprecipitation for Li-ion batteries. *Chem. Eng. Res. Des.*, 177, 461-472.

P6 - Étude d'un procédé de fermentation sombre pour la production de biohydrogène à partir de résidus des industries laitières

El ABYAD Sara*, GUEZ Jean-Sebastien, VIGNIGBE Emeric, VIAL Christophe, TAHA Samir

Université Clermont Auvergne, CA INP, CNRS, Institut Pascal, 63000, Clermont-Ferrand

La fermentation sombre (DF) constitue un procédé biologique prometteur pour la production de biohydrogène, vecteur énergétique propre et durable (142 MJ/kg), à partir de biomasse (Ahmad *et al.*, 2024; Jain *et al.*, 2024). Parmi les résidus organiques valorisables, le lactosérum, sous-produit des fromageries (≈ 9 kg/kg de fromage) et à forte DBO ($\approx 435\,000$ ppm), représente une charge environnementale majeure s'il n'est pas traité (Goyal *et al.*, 2023). Riche en lactose (4,5-5% w/v), il sert de source de carbone à deux groupes microbiens : (i) les bactéries lactiques, productrices de lactate, et (ii) les bactéries anaérobies (strictes ou facultatives) générant H_2 , CO_2 et acides gras volatils. Leur interaction, compétitive ou synergique selon les conditions opératoires détermine la dynamique microbienne et le rendement global en H_2 (Vural, 2022). Comme les rendements rapportés dans la littérature demeurent faibles par rapport au rendement théorique (8 mol H_2 /mol lactose), des recherches supplémentaires sont nécessaires. Dans notre projet, une caractérisation physicochimique de différents types de lactosérum a été effectuée, suivie d'essais en bouteilles pour comparer la flore endogène à un inocula exogène (Figure). Enfin, des études à échelle extrapolable ont été menées en réacteur discontinu STR pour évaluer l'influence du potentiel redox (ORP) sur le rendement d' H_2 (Y_{H_2}) (Tableau).

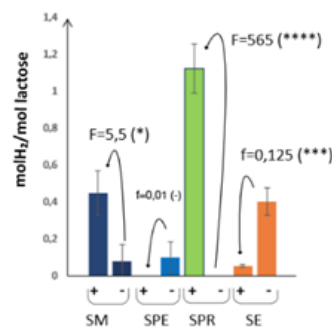


Figure 1. Rendement d' H_2 obtenu à partir de sérum moyen (SM), de sérum de pâtes pressées (SPR), de sérum de pâtes persillées (SPE) et de sérum d'effluent (SE), en présence (+) et en absence (-) d'inoculum, (F : Facteur d'augmentation et f de diminution).

La figure ci-dessus montre que l'ajout d'inoculum (digestat) influence différemment la production selon le type de lactosérum : il exerce un effet positif avec le SPR et le SM, mais négatif avec le SPE et le SE.

Tableau. Y_{H_2} et paramètres du modèle de Gompertz obtenus à partir de la DF de SM à trois ORP_i différents.

Batch	Lactose (g/L)	Lactate (g/L)	ORP_i (mV)	Y_{H_2} (mol H_2 /mol lactose)	Nb de phases de production	λ (h)	R_{max} (mL/h)	V_{max} (mL)
1	31,5	1,7	-277,8	0,5	2	16,1/46,7	107,0/67,6	3181,1
2	49,6	0,47	-322,6	0,3	1	21,7	280,1	3327,9
3	36,6	0,6	-428,8	0,9	2	10,6/38,3	569,7/155,9	6025,8

Le tableau ci-dessous montre qu'une baisse de l' ORP_i initial augmente le Y_{H_2} et réduit la phase de latence. Les écarts observés pour le batch 2 s'expliquent par l'usage d'un lot plus concentré, ayant subi des traitements supplémentaires, éliminant ainsi les bactéries lactiques et améliorant la performance de la fermentation.

Références

- Ahmad, A., Rambabu, K., Hasan, S.W., Show, P.L., Banat, F., Int. J. Hydrogen Energy, 2024, 52, 335–357.
 Goyal, C., Dhyani, P., Rai, D.C., Tyagi, S., Dhull, S.B., Sadh, P.K., Duhan, J.S., Saharan, B.S., Food Process. Preserv., 2023, 1-24.
 Jain, R., Panwar, N.L., Jain, S.K., Gupta, T., Agarwal, C., Meena, S.S., Biomass Conv. Biorefin., 2024, 14, 12699–12724.
 Vural, C., Curr. Perspect. Effects Lactobacilli Biohydrogen Prod. Dark Ferment., 2022.

*Auteur/s à qui la correspondance devra être adressée : sara.el_abyad@doctorant.uca.fr

P7 - Catalytic depolymerization of xylan to sugars over WOX/TiO₂ catalyst

IOANNIDOU Georgia^a, PHILIPPE Régis^a, VILCOQ Léa^{a,b}

^aCP2M (Catalysis, Polymerization, Processes, Materials) – UMR 5128, CNRS/CPE Lyon/UCBL, 43 Boulevard du 11 Novembre 1912, 69616 Villeurbanne, France

^bUniversité Claude Bernard Lyon 1, CNRS, IRCELYON, UMR 5256, Villeurbanne, F-69100

Hemicellulose which account for 20-35% of lignocellulosic biomass is considered an abundant and renewable carbohydrate (Zhou et al.). It is polymer made up from C5 (xylose, arabinose) and/or C6 (glucose, mannose) sugars linked by glycosidic bonds (Deng et al.). Catalytic depolymerization of hemicellulose via hydrolysis could lead to its sugar monomer(s), important key intermediates to produce both green fuels and chemicals. It has been reported that acid-based catalyst, such as WOX supported on TiO₂ are active and selective for this reaction, promoting sugars production, while minimizing the formation of degradation products (furans, humins) (Vilcoq et al.). This work studies the continuous flow hydrolysis of xylan hemicellulose over WOX/TiO₂ and the effect of operating conditions.

The WOX/TiO₂ catalyst was prepared according to a previously reported protocol³. Hydrolysis experiments were performed in a continuous flow fixed bed reactor (din=1 cm, L=35 cm) using an HPLC pump (KNAUER, P2.1S/P4.1S). The effect of temperature, feed concentration and catalyst to substrate ratio(W/F) are explored by using a commercial xylan feedstock from cornhob (Carl ROTH, MW=(132)_n g/mol). Unreacted xylan was determined by post hydrolysis³, while the hydrolysates were analyzed by HPLC (RID and PDA detectors).

The hydrolysis reaction was initially investigated without the presence of a catalyst to explore the possibility of homogeneous hydrolysis, filling the reactor only with inert silicon carbide (SiC) particles. The effect of reaction temperature was studied from 100-180 °C at 60 bar N₂, 10 g/L initial xylan concentration and at different values of residence time (τ) of 10-20 min. Results indicated that at higher temperatures and increased τ, a partial homogeneous depolymerization to sugars occurs. The highest sugars selectivity (50% xylose) was achieved at 180 °C and τ=20 min for 30% conversion due to the extended residence time. The effect of reaction parameters was further explored over WOX/TiO₂ at 20 bar N₂, and 10 g/L initial feed concentration, while the catalyst was diluted by SiC in a ratio of cat:SiC=1:8. The effect of reaction temperature was explored from 100 to 180 °C at W/F ratios of 135-571 g_{cat}/g_{c,xylan}min. Increasing temperature boosts conversion from 10 to almost 100%. For reaction temperatures below 130 °C, conversion and sugars selectivity remain low, whereas above 180 °C sugars production is restricted in favor of undesired products especially for the highest W/F value (figure 1a). The effect of feed concentration (10-50 g/L) was further explored at 150 °C in a wide range of τ (4-34 min). Catalytic results showed that higher concentrations greatly favored both conversion and sugars selectivity (figure 1b). The highest xylose selectivity of 50% was reached for 53% conversion at 50 g/L concentration and 34 min residence time.

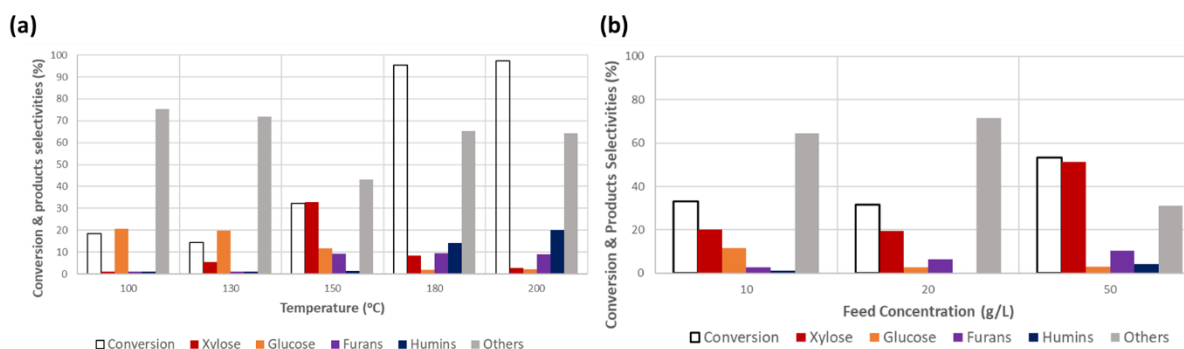


Figure 1. a) Effect of reaction temperature (PN2=20 bar, W/F=541 g_{cat}/g_{c,xylan}min, τ=20 min) and b) Effect of feed concentration (PN2=20 bar, T=150 °C and τ= 34 min) on xylan hydrolysis.

Références

- Zhou, Z., Ouyang, D., Liu, D., Zhao, X. 2023, Bioresour. Technol. 367, 128208.
 Deng, J., Xiong, T., Wang, H., Zheng, A., Wang, Y. 2016, Chem. Eng. 4, 3750-3756.
 Vilcoq, L., Rebmann, E., Cheah, Y. W., Fongarland, P. 2018, ACS Sustain. Chem. Eng. 6, 5555-5565.

P8 - Valorisation du LDPE par pyrolyse catalytique sur des mousses fonctionnalisées de zéolithe

KARAKACHE Sabrina^{a**}, VILCOQ Léa^{a,b}, BATALHA Nuno^b, MEILLE Valérie^b, LAURENTI Dorothée^b et FONGARLAND Pascal^a

^aCNRS, UCBL, CPE-Lyon, CP2M, UMR 5218, Villeurbanne, France

^bCNRS, UCBL, IRCELYON, UMR 5256, Villeurbanne, France

L'augmentation continue de la production et de l'accumulation de plastiques représente un défi environnemental majeur. En 2024, le volume de déchets plastiques produit à l'échelle mondiale a atteint 400 millions de tonnes, dont 3,7 millions en France. Dans ce contexte, le recyclage est devenu impératif. Parmi les méthodes de valorisation des plastiques en fin de vie, la pyrolyse catalytique présente une voie de recyclage thermochimique prometteuse pouvant convertir des plastiques à base de polyoléfinés en produits chimiques à haute valeur ajoutée notamment en aromatiques, oléfines légères et hydrocarbures de la gamme essence, dans des conditions opératoires typiques de 380 et 500°C et de 0,1 à 23 MPa. Lors de la pyrolyse catalytique, les plastiques fondus forment une phase liquide et une phase vapeur, qui interagissent avec la surface et/ou les pores internes d'un catalyseur solide de type zéolithe acide, générant des hydrocarbures légers. L'acidité et la structure poreuse du catalyseur influencent donc fortement la distribution des produits. Les zéolithes classiques présentent des dimensions de pores restreintes qui entraînent un encombrement stérique limitant la diffusion des macromolécules conduisant à une faible activité catalytique. Une approche prometteuse pour pallier ceci consiste à déposer les zéolithes (ZSM-5) sur des mousses cellulaires macroporeuses par le procédé de dip-coating, combinant ainsi une meilleure activité catalytique, transfert de matière et conductivité thermique. L'étude porte sur l'optimisation du procédé de dip-coating pour l'élaboration des catalyseurs ZSM-5 sur mousse et sur l'évaluation de leur performance en pyrolyse du LDPE, l'un des plastiques les plus courants.

Les résultats préliminaires montrent que trois immersions successives sont nécessaires pour obtenir la charge de zéolite souhaitée lors du dip-coating. Une teneur plus élevée en zéolite dans la suspension augmente la charge de zéolite mais rend les revêtements plus épais et moins homogènes. Le dépôt est fortement influencé par les teneurs en additifs Ludox et en PVOH dans la suspension. La maximisation de leur teneur favorise la charge de zéolite sur la mousse. Des tests d'adhérence par ultrasons ont confirmé que les revêtements préparés avec des concentrations plus élevées de PVOH présentent une stabilité mécanique supérieure.

Table 1. Composition des suspensions et caractéristiques finales du revêtement de zéolite obtenu par dip-coating sur des mousses de SiC.

Échantillon	Si/Al ZSM-5	Zéolithe (% m)	Ludox (% m)	PVOH (% m)	Eau distillée (% m)	Charge de ZSM-5 (g/cm ³)	Résistance aux ultrasons (%)
1	23	20	5	6	69	0,09	93,5
2	80	20	5	2	73	0,13	99,0
3	23	30	10	2	58	0,10	96,7
4	23	30	5	2	63	0,06	97,0
5	23	30	5	6	59	0,10	99,3
6	23	30	10	6	54	0,12	99,3
7	80	20	10	6	64	0,16	100,0
8	80	30	10	6	54	0,22	99,6

Références

United Nations Environment Programme, 2021, Drowning in plastics – marine litter and plastic waste vital graphics.
Chen, W., K. Jin et N. Linda Wang, 2019, ACS Sustainable Chem. Eng. 7, 3749–3758.
Qian, M., H. Lei, et R. Zou, 2021, Energy Conversion and Management. 236, 114020.

*Auteur/s à qui la correspondance devra être adressée : ska@lgpc.cpe.fr

P9 - Understanding and modelling the mechanisms of lithium chloride extraction using LiAl-LDH

SUVOROVA Anastasiia^{a**}, FARRUSSENG David^b, GIARDELLA Lucas^c, TUEL Alain^b, EDOUARD David^a

^aCP2M UMR 5128, CPE Lyon, CNRS - Univ Lyon, 43 Bd du 11 novembre, F-69100 Villeurbanne, France

^bIRCELYON UMR 5256, CNRS - Univ Lyon, 1, 2, Av. Albert Einstein, F-69626 Villeurbanne, France

^cSaint-Gobain Research Provence, 550 R. Alphonse Jauffret, F-84300 Cavaillon, France

The lithium market is currently being disrupted by the high demand for electric batteries and is considered a strategic metal in the world. As a consequence, large R&D efforts concentrate on the development of low-cost and/or high-yield lithium extraction technologies. Direct Lithium Extraction (DLE) technique using selective adsorbents is promising since it allows Li extraction from brines (saline solutions) in an environmentally sustainable way. The main challenge lies in the development of a performing adsorbent which can recover Li at low concentration (100-500 ppm) from a highly saline solution. LiAl-LDH, Aluminium-based Layered Double Hydroxide, is a good candidate thanks to the presence of the cationic vacancies fitting the size of Li. It can adsorb up to 35 mg/g. However, the first test show that it is necessary to better understand the limited phenomenon and optimize the global process. The objective of this study is in first time to model the kinetic of Li adsorption process on LiAl-LDH sorbent synthesized at Saint-Gobain.

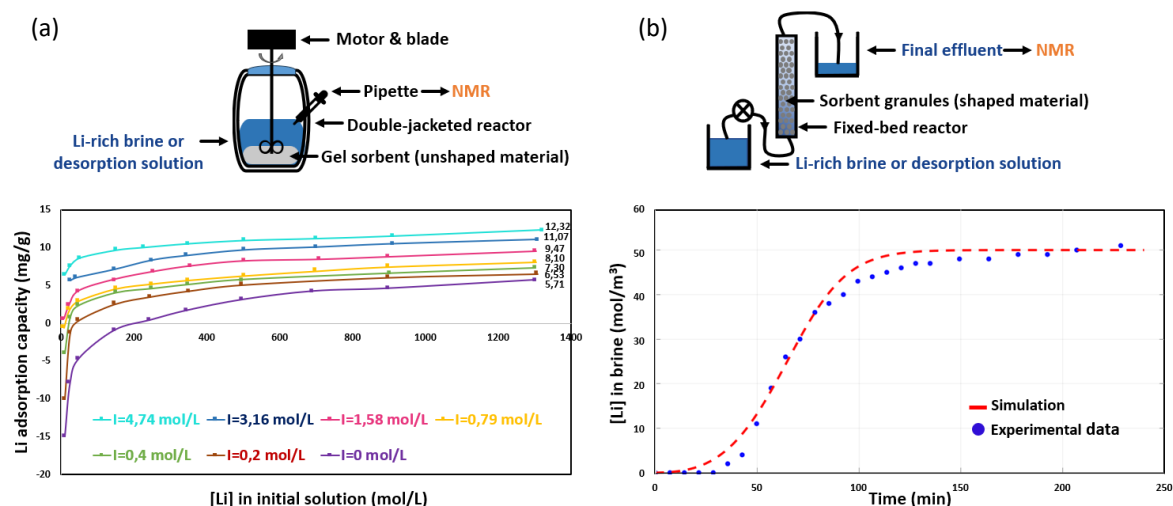


Figure 1. (a) Adsorption isotherms at different ionic strengths from batch tests using the unshaped material (gel); (b) Experimental and modeled breakthrough curves for the fixed-bed extraction test using the shaped material (granules)

The thermodynamic studies of Li ion exchanges were performed for LiAl-LDH material via the measurement of adsorption isotherms in batch tests. The investigation of isotherms considered not only variations in lithium concentration but also evaluated the effect of the concentrations of other salts present in the solution (Figure 1(a)). Surprisingly, we found that the driving force of the adsorption process is mainly governed by the solution's ionic strength whereas the Li concentration plays a second role. We set a thermodynamic model of adsorption derived from the Langmuir concept incorporating the effect of ionic strength.

To identify the limiting steps of the overall Li adsorption process in continuous fixed bed, a dynamic model was developed basing on the batch results (adsorption/desorption phenomena) and the mass balance in Piston Dispersive model with Exchange (PDE) (Figure 1(b)).

Références

- Britto, S. et Kamath, P.V., Inorg.Chem., 2009, 48, 11646-11654
 Dupont, L., Martin, A., et Bernard, P., Ind. Eng. Chem. Res., 2025, 64, 15234-15242
 Zhang, L., Wang, Y., Li, J. et al., Nano Res., 2023, 17, 1646-1654

*Auteur/s à qui la correspondance devra être adressée : anastasiia.suvorova@ircelyon.univ-lyon1.fr

P10 - Etude expérimentale et numérique de l'efficacité de l'émulsification double dans des mousses métalliques à cellules ouvertes

CHAKLEH Ranim, LEBAZ Nouredine, SHEIBAT-OTHMAN Nida

Université Claude Bernard Lyon 1, LAGEPP, UMR 5007, CNRS, Villeurbanne, Lyon

Les émulsions doubles (EDs) sont des systèmes dispersés dans lesquels une émulsion est dispersée dans une phase continue. Les deux types les plus courants sont les systèmes eau-dans-huile-dans-eau (E/H/E) et huile-dans-eau-dans-huile (H/E/H). Grâce à leur structure double, les EDs sont polyvalentes et utilisées dans plusieurs domaines, notamment dans l'industrie agroalimentaire, ainsi que l'encapsulation de substances actives dans les industries pharmaceutiques et cosmétiques.

Dans cette étude, on se focalise sur la préparation des EDs de type E/H/E à l'aide d'un procédé en continu innovant. La préparation est faite en deux étapes : Tout d'abord, une émulsion simple E/H est préparée sous forte énergie dissipée à l'aide d'un Ultraturrax®. Cette émulsion est ensuite dispersée dans une phase aqueuse sous une énergie dissipée moins importante afin d'éviter d'extraire ou de casser les gouttes internes (μ -gouttes). L'eau interne consiste en une solution aqueuse à 0.1M NaCl jouant le rôle d'un stabilisant pour contre-équilibrer les pressions osmotiques et Laplace, et 5g/L de fluorescéine en tant qu'un traceur pour quantifier la libération. En fait, pendant la deuxième étape une partie des μ -gouttes peut être libérée soit par brisure des gouttes externes (M-gouttes) soit par coalescence des μ -gouttes avec l'eau externe à la surface de la membrane huileuse. La deuxième étape de préparation se réalise généralement dans une cuve agitée ou à l'aide des dispositifs à fort cisaillement comme le rotor stator. Une limitation majeure de ces dispositifs réside dans leur tendance à produire des émulsions polydisperses en raison de leur conception intrinsèque entraînant une dissipation d'énergie non uniforme. De plus, ces dispositifs fonctionnent en mode batch, alors que, dans une optique d'intensification des procédés, on cherche à évoluer vers des procédés continus.

Dans ce contexte, Lebaz et al. (2023) ont démontré que les mélangeurs statiques de type SMX⁺ permettent de produire des émulsions doubles monodisperses, malgré le fort caractère rhéofluidifiant des émulsions testées. Plus récemment, la même équipe a proposé l'utilisation des mousses métalliques à cellules ouvertes (i.e., Open Cell solid Foams, OCSF) pour la préparation d'émulsions simples (Lebaz et al. 2024). Leurs résultats montrent que les OCSF peuvent surpasser les mélangeurs statiques commerciaux. Dans ce travail, nous visons à évaluer la performance des OCSF pour la deuxième étape de préparation des émulsions doubles. Les expériences sont menées en régime turbulent, et différentes formulations et conditions opératoires sont testées. Trois mousses à différentes propriétés géométriques sont étudiées, et leurs performances sont comparées à celle d'un mélangeur statique commercial de type SMX⁺.

Cette étude propose également un modèle numérique permettant de prédire l'évolution dynamique de la distribution de taille des M-gouttes et la cinétique de libération des μ -gouttes. Ce modèle repose sur le couplage d'un bilan de population (Eq. (1)) appliquées aux M-gouttes et une deuxième équation qui suit l'évolution de nombre de μ -gouttes dans les différentes classes des M-gouttes (Eq. (2)). Cette dernière considère la redistribution des μ -gouttes à travers les différentes classes des M-gouttes suite à la brisure de ces dernières ($R'_{br}(v, t) - R^D_{br}(v, t)$), en plus de la perte due à la libération par brisure ($R_{libération}$).

$$\frac{dn_M(v, t)}{dt} = R^B_{br}(v, t) - R^D_{br}(v, t) \quad (1)$$

$$\frac{dn_\mu(v, t)}{dt} = R^B_{br}(v, t) - R^D_{br}(v, t) - R_{libération} \quad (2)$$

Références

- Lebaz, N., Touma, K., Guedda, Y., Philippe, R., Sheibat-Othman, N., 2024. Chem. Eng. Process. - Process Intensif. 199, 109770. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.109770>
- Lebaz, N., Touma, K., Sheibat-Othman, N., 2023. Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp. 674, 131984. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131984>.

P11 - Visualisation quantitative du transfert de matière d'hydrogène en phase aqueuse

TAULEIGNE Blandine**, MARCATI Alain, VIAL Christophe,

Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France

Dans le contexte de la transition énergétique, l'hydrogène suscite un fort intérêt en raison de ses nombreuses applications potentielles. Les procédés émergents dits « verts » impliquant l'hydrogène mettent souvent en évidence son transfert de matière comme une étape limitante majeure. La compréhension de cette limitation nécessite une étude approfondie de l'interface gaz-liquide ainsi que de l'influence des paramètres opératoires. Étant donné que l'hydrogène demeure bien moins étudié que d'autres gaz tels que l'oxygène, combler cette lacune de connaissance est essentiel pour optimiser les technologies reposant sur l'hydrogène.

Une méthode colorimétrique pour une visualisation quantitative du transfert d'hydrogène a été étudiée afin de répondre à cet enjeu. Cette approche utilise l'anthraquinone-2-sulfonate de sodium (AQ2S, $1,8 \times 10^{-5}$ – $3,6 \times 10^{-4}$ mol/L), comme indicateur redox sensible à l'hydrogène, et le chlorure de palladium (II) (PdCl_2 , $1,8 \times 10^{-7}$ – $1,8 \times 10^{-3}$ mol/L), comme catalyseur, en solution aqueuse d'hydroxyde de sodium (Silverman & Bradshaw, 1956). Le dispositif expérimental comprend un réacteur en acier, d'une longueur de trajet optique de 150 mm, équipé de sondes hydrogène et pH couplé potentiel redox, permettant également un suivi vidéo et d'absorbance. Comme la forme réduite de l'AQ2S est sensible à l'oxygène, les expériences sont réalisées sous atmosphère inerte.

Les expériences préliminaires ont examiné l'effet de la concentration en catalyseur sur la vitesse de la réaction colorimétrique. Le catalyseur influence la cinétique de la réaction, qui doit être plus rapide que le transfert de matière de l'hydrogène pour permettre un suivi en temps réel, sans toutefois modifier ce transfert. Dans la gamme de concentrations étudiée, aucune accélération du transfert n'a été observée, cependant la faible solubilité du PdCl_2 engendre des problèmes de visualisation. Ainsi, une concentration minimale et optimale de travail a été identifiée et retenue pour les expériences ultérieures.

L'intensité du changement de couleur dépend à la fois de la longueur du trajet optique et de la quantité d'AQ2S réagi, corrélée à la consommation d'hydrogène. Afin de quantifier cette relation, des essais spécifiques ont été menés avec des cellules de plus courte longueur optique (2,5 à 40 mm). La figure 1 illustre le changement de couleur observé lors de l'un de ces essais. Des travaux de modélisation sont en cours afin de permettre, à terme, des études quantitatives de transfert de matière d'hydrogène à l'échelle d'une bulle.

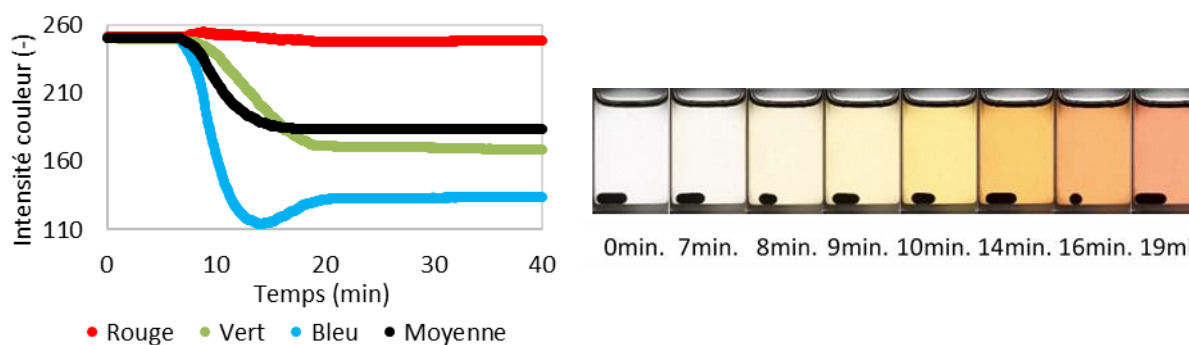


Figure 1. Visualisation graphique de l'évolution des composantes RVB et du changement de couleur correspondant, pour une longueur de trajet optique de 10 mm, avec des concentrations en AQ2S et PdCl_2 de $1,8 \times 10^{-4}$ mol/L.

Références

Silverman, L., & Bradshaw, W. (1956). Determination of small quantities of hydrogen in the inert gases. *Analytica Chimica Acta*, 15, 31-42. [https://doi.org/10.1016/0003-2670\(56\)80007-X](https://doi.org/10.1016/0003-2670(56)80007-X).

*Auteur/s à qui la correspondance devra être adressée : blandine.tauleigne@doctorant.uca.fr

P12 - Hydrodynamique multi-échelle des bulles dans les liquides organiques : mesures locales dans une colonne à bulles et étude de la coalescence et de la rupture des bulles

ABIDEDDINE Soufiane^a, AUGIER Frédéric^a, TOURBIER Alexis^a, ALMERAS Elise^a, ORVALHO Sandra^b et ZEDNIKOVA Maria^b

^aIFP Energies Nouvelles, Rond-point de l'échangeur de Solaize, BP 3, 69360 Solaize, France

^bInstitute of Chemical Process Fundamentals, Prague, Czech Republic

La précision des prédictions hydrodynamiques dans les réacteurs à colonne à bulles dépend de notre capacité à décrire l'évolution de la distribution des tailles de bulles dans des régimes d'écoulement homogènes et hétérogènes. La coalescence et la rupture sont les principaux phénomènes qui influencent ces distributions, et elles sont fortement modulées par les propriétés physico-chimiques de la phase continue (tension de surface, viscosité, densité) et les conditions opératoires de l'écoulement (vitesse superficielle du gaz V_{sg} , température et pression, ...). Si les systèmes eau-air sont bien documentés, la dynamique des bulles dans les liquides organiques reste mal quantifiée. La présente communication résume les résultats de l'étude expérimentale de la dynamique des bulles dans quatre liquides : eau, n-heptane, Isopar G et Isopar M (Table 1). Les expériences ont porté sur des processus à petite échelle tels que la coalescence et la rupture des bulles : L'effet des propriétés physico-chimiques sur le temps de drainage du film liquide avant coalescence est quantifié. L'hydrodynamique des colonnes à bulles a été quantifiée par la rétention globale de gaz (Figure 1) et les caractéristiques des bulles (vitesses et tailles) dans une dispersion gaz-liquide à grande échelle.

Table 1. Propriétés physico-chimiques de la phase liquide.

	Propriétés physico-chimiques		
	Densité (kg/m ³)	Viscosité (mPa.s)	Tension de surface (mN/m)
Eau	998	1	72
Isopar G	739	0,83	22,7
Isopar M	775	1,91	24,4
n-Heptane	680	0,389	19,8

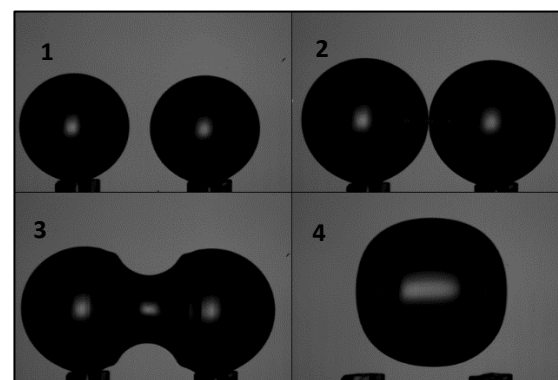
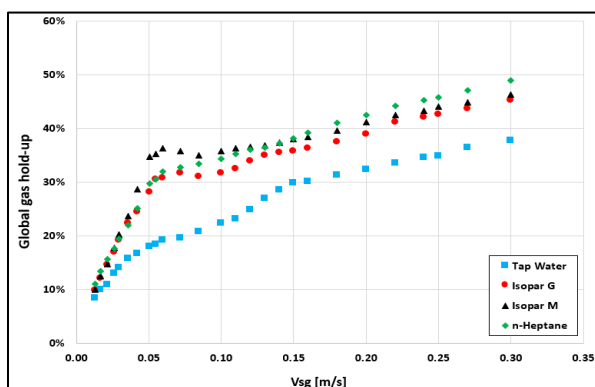


Figure 1. Evolution du taux de vide global en fonction de V_{sg} . Figure 2. Coalescence de deux bulles d'azote dans l'Isopar G.

Références

- Orvalho, S., Stanovsky, P. et Ruzicka, 2021, Bubble coalescence in electrolytes: Effect of bubble approach velocity, Chem. Eng. Journal 406, 18.
- Zednikova, M., Semlerova, T., Orvalho, S., Havlica, J. et Tihon, J., 2025, Surfactant effect on bubble deformation and breakup after interaction with vortex structure, Chem. Eng. Sci. 305, 121144.

P13 - Analyse d'un écoulement diphasique dans une colonne à bulles à contre-courant en fonction des paramètres opératoires : étude expérimentale des vitesses

ESSID Adib, FONTAINE Jean-Pierre, URSU Alina-Violeta, VIAL Christophe

Université Clermont Auvergne, CNRS, Clermont Auvergne INP, Institut Pascal, F-63000, Clermont-Ferrand, France

Introduction :

Les performances de la méthanation biologique ex-situ sont souvent limitées par le transfert de matière en raison de la faible solubilité du gaz H_2 dans les milieux aqueux (Lecker et al.). Par conséquent, ce travail étudie une colonne à bulles à contre-courant à l'aide de techniques d'imagerie rapide, afin d'évaluer l'influence des paramètres opératoires sur l'hydrodynamique locale.

Matériels et méthodes :

Les expériences ont été réalisées avec l'eau pure dans une colonne à bulles à contre-courant en PVC transparent et de 3 L de volume utile. Une boîte mobile et remplie d'eau a été utilisée pour limiter les distorsions optiques. Le gaz a été injecté via un diffuseur céramique (porosité : 10–16 μm) dont le débit a été contrôlé par un débitmètre ($Q_G = 3\text{--}12 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$), tandis que l'écoulement liquide descendant était imposé par une pompe péristaltique ($Q_L = 0\text{--}144 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$). La vitesse des bulles a été mesurée par une technique d'imagerie rapide rétro-éclairée dont les images brutes ont été analysées par *Tractrac PTV*. L'écoulement liquide a été caractérisé par *PIV 2D2C* puis par *PIV stéréoscopique (2D3C)* dont les images brutes ont été traitées sous *PIVLab* et *Hiris*, respectivement. Trois zones de mesure ont été définies : en haut, au milieu et en bas de la colonne.

Résultats et discussion :

Les résultats montrent qu'à faible Q_G , le profil de vitesses est radialement hétérogène, avec des V_{xy} faibles au centre et plus élevées près des parois. Lorsque Q_G augmente, le profil devient plus uniforme et V_{xy} des bulles augmente. Cette tendance s'explique par la répartition spatiale des tailles de bulles, les plus grosses se concentrant près des parois et les plus petites au centre. La recirculation du liquide, pour $Q_L \geq 72 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, s'oppose à la remontée des bulles, réduisant ainsi leur vitesse et augmentant leur temps de séjour dans le réacteur. Dans les écoulements diphasiques, le profil de vitesse du liquide présente généralement deux zones distinctes : une zone à faible vitesse où les bulles remontent à contre-courant du liquide, et une zone à haute vitesse caractérisée par une faible rétention de gaz et un écoulement descendant du liquide. Les données de vitesse du liquide en 3D montrent que la phase gazeuse induit des valeurs V_z non négligeables en raison du mouvement hors plan induit par les bulles et de la déviation locale de l'écoulement. De plus, la vitesse de la phase gazeuse présente une hétérogénéité axiale, qui diminue de la zone du diffuseur vers le sommet de la colonne. Cette tendance est cohérente avec la dispersion radiale des bulles.

Conclusion :

Le champ de vitesse local des deux phases présente une forte dépendance vis-à-vis des paramètres opératoires. Dans la plage de débits de gaz étudiée, il est possible d'identifier une plage optimale d'écoulement à contre-courant du liquide afin d'améliorer l'hydrodynamique et le transfert de masse à faible puissance absorbée.

Références

Lecker B., Illi L., Lemmer A., Oechsner H., Biores. Technol. 245A, 1220-1228 (2017).

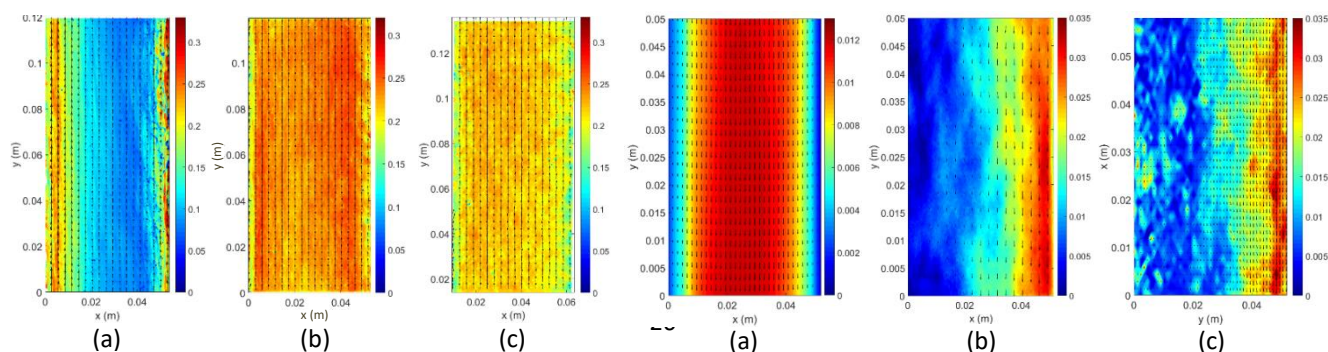


Figure 1: Vitesse de gaz à (a) $Q_G = 3 \text{ l/h}$ et $Q_L = 0 \text{ l/h}$, (b) $Q_G = 12 \text{ l/h}$ et $Q_L = 0 \text{ l/h}$, (c) $Q_G = 12 \text{ l/h}$ et $Q_L = 144 \text{ l/h}$.

Figure 2: Vitesse de liquide : V_{xy} à (a) $Q_G = 0 \text{ l/h}$ et $Q_L = 72 \text{ l/h}$, (b) $Q_G = 9 \text{ l/h}$ et $Q_L = 72 \text{ l/h}$; (c) V_{xyz} à $Q_G = 9 \text{ l/h}$ et $Q_L = 144 \text{ l/h}$.

