

## Les mousses polymères poreuses : un avenir prometteur pour l'ingénierie chimique

### Les mousses de polyuréthane, le grand oublié de l'industrie chimique

Les mousses de polyuréthane (PU) sont des matériaux poreux dont la structure solide, appelée matrice, est composée d'un polymère représentant seulement entre 3 et 10 % du volume de la mousse. Ces mousses sont principalement connues du grand public en tant que matériau isolant ou comme élément de filtration (aquarium, hotte aspirante...). Bien que leurs synthèses présentent des risques (toxicité des isocyanates), elles restent peu coûteuses, produites en forts tonnages, et sont facilement usinables. Elles sont également élastiques et résistantes. D'un point de vue de l'ingénierie chimique, elles disposent également de propriétés de transport intéressantes – surface spécifique élevée, faible perte de charge – et leur morphologie anisotrope permet d'intensifier les transferts de matière et de chaleur [1]. Malgré ces avantages, ces mousses ne sont pas exploitées comme garnissage de colonne ou support de catalyseur dans l'industrie chimique ; les mousses céramiques ou métalliques étant en effet généralement privilégiées [2]. Cette préférence se justifie par une meilleure stabilité chimique, une plus grande conductivité et stabilité thermique. Pourtant, les mousses PU présentent des propriétés de transport similaires et des propriétés mécaniques particulières qui leur confèrent un avantage non exploité jusqu'à présent : leur élasticité. C'est cette singularité qui est à la base de nos travaux.

### Le réacteur à lit dynamique, c'est quoi au juste ?

Pour imaginer le fonctionnement du réacteur, il suffit de se référer à une situation simple de la vie courante : l'essorage d'une éponge. À l'image de l'action faite à la main, le laboratoire a développé un système original basé sur un vilebrequin actionné par un moteur électrique qui va comprimer/détendre deux mousses placées à l'intérieur d'une colonne [3]. Ces deux mousses servent de garnissage et sont disposées de sorte que lorsque la mousse du dessus est comprimée, celle située en dessous est détendue et *vice versa*. Ces cycles de compression/détente sont répétés avec une fréquence choisie par l'opérateur et imposée par la vitesse de rotation du moteur (figure 1). Le fait d'utiliser deux mousses en opposition est un choix stratégique car il permet de garder la hauteur totale (H) du garnissage constant au cours des cycles. Dans ces conditions, cette technologie peut être facilement comparée aux autres colonnes garnies (mousses rigides ou avec des particules) qui sont fréquemment utilisées dans l'industrie chimique ou pour le traitement de l'eau. De plus, cette configuration permet de travailler avec le même réacteur dans les deux modes : lit fixe (figure 1, position 1) ou lit dynamique.

### Un outil novateur dans l'amélioration des transferts gaz-liquide

Pour les réacteurs avec garnissage et avec un écoulement à faible vitesse d'un mélange gaz/liquide, il est souvent observé que le gaz traverse le garnissage (mousses ou particules) de manière

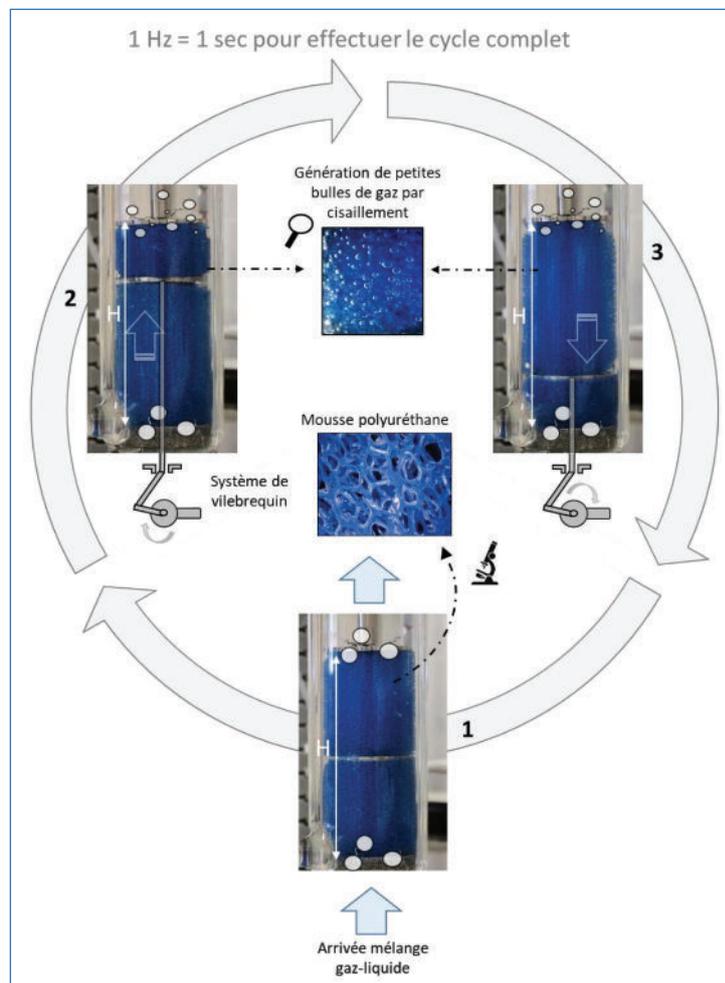
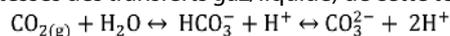


Figure 1 - Description d'un cycle complet de compression/détente des mousses, en partant de l'état initial 1 (mode lit fixe) jusqu'à revenir à cet état après compression et détente complète des deux mousses (mode lit dynamique).

hétérogène sous forme de grosses bulles via des chemins préférentiels. Dans ces conditions, le transfert du gaz au liquide est donc relativement faible. En mode lit dynamique, les cycles de compression/détente des mousses vont créer des forces de cisaillement générant alors de nombreuses bulles de petites tailles propices à un bon transfert du gaz à l'eau.

Pour démontrer l'efficacité de cette nouvelle technologie, une application en lien avec l'actualité environnementale a été choisie : le captage du dioxyde de carbone gazeux (CO<sub>2</sub>). Lors de sa dissolution, le CO<sub>2</sub> va réagir avec l'eau en libérant des ions H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> qui vont acidifier le milieu. Ce processus, très connu, est en partie responsable de l'acidification des océans. Cette réaction du gaz à l'eau va permettre à notre équipe de quantifier la quantité totale de CO<sub>2</sub> dissoute (par suivi de pH) et ainsi estimer les performances (vitesses des transferts gaz/liquide) de cette technologie :



Les résultats obtenus sont sans équivoque : avec le mode dynamique, il est possible de dissoudre une plus grande quantité de CO<sub>2</sub> ; et plus la fréquence des cycles est élevée, plus la quantité

transférée à l'eau est importante. Pour les mêmes conditions opératoires (débit d'entrée, température, même composition de l'eau initiale...), en mode lit fixe, la quantité totale dissoute est de l'ordre de 700 mg/L vs 1 500 mg/L en mode dynamique pour une fréquence de 1 Hz ou encore 1 900 mg/L avec 2 Hz. En effet, de plus petites tailles de bulles signifient une plus grande aire interfaciale gaz-liquide et donc une mise en contact plus efficace ; c'est pourquoi la quantité de CO<sub>2</sub> dissoute en solution augmente. Autre avantage, et pas des moindres : le système proposé ici fonctionne à l'aide d'un petit moteur électrique dont la consommation ne dépasse pas 50 watts. Ainsi le gain de performance apporté par ce réacteur dynamique n'est pas plus énergivore qu'une lampe de chevet.

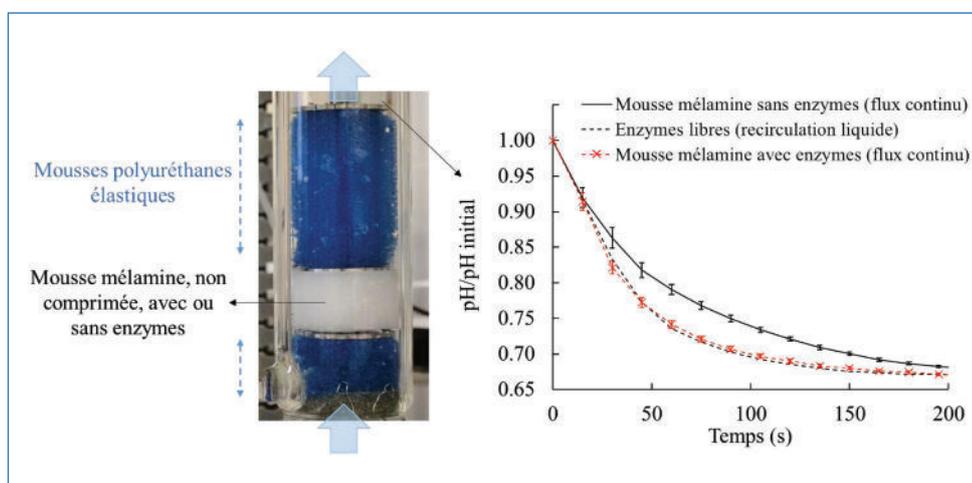


Figure 2 - Mousse enzymatique (blanche) insérée entre deux mousses élastiques dans le réacteur dynamique et variation du pH mesurée en sortie de réacteur (expérience avec ou sans enzymes, libres ou immobilisées en mode lit dynamique).

## Vers des applications en catalyse enzymatique

En chimie, il est courant d'avoir recours à des catalyseurs pour accélérer une réaction. Les enzymes sont des catalyseurs biologiques très utilisés et parmi elles, l'anhydrase carbonique (AC) est certainement la plus performante que la nature a créée. En effet, son « turnover » est remarquable puisqu'elle est capable de transformer 10<sup>6</sup> molécules de CO<sub>2</sub> dissoutes dans l'eau par seconde en ions hydrogencarbonates [4]. Cette enzyme est très coûteuse, fragile, et son utilisation en flux continu dans une colonne garnie est difficilement envisageable. L'immobilisation des enzymes est donc une étape cruciale pour la viabilité d'un procédé. Une équipe de recherche de l'Institut Charles Sadron a développé une technique d'immobilisation enzymatique universelle sur mousse via la formation d'un hydrogel [5]. Selon cette méthode, une mousse de mélamine sert de support, et l'hydrogel (assemblage de peptides) va venir se fixer sur la mousse au cours de sa formation. Pendant ce processus, l'AC présente dans le milieu se retrouve ainsi emprisonnée dans l'hydrogel. Cette mousse catalytique a été testée avec la technologie de réacteur à lit dynamique. Les mousses enzymatiques développées étant encore trop fragiles pour subir des cycles de compression/détente, nous les avons donc placées au milieu des mousses élastiques (figure 2). Les résultats en flux continu sont prometteurs puisque la chute du pH est effectivement plus rapide avec les enzymes, mais surtout l'efficacité des enzymes immobilisées est la même que celle des enzymes libres [6].

## Un changement de paradigme dans le domaine de l'ingénierie des réacteurs chimiques

Ces premiers résultats avec l'anhydrase carbonique sont particulièrement encourageants car ils ouvrent la voie à d'autres applications de réactions catalytiques gaz-liquide limitées par le transfert de matière. Nous étudions actuellement des réactions d'hydrogénation sélective catalysées par du palladium déposé directement sur les mousses élastiques. Pour accrocher les nanoparticules de palladium de manière robuste directement sur les mousses

élastiques, une méthode inspirée de la nature va nous être utile : le dépôt d'un film de « colle » de polydopamine (PDA). La PDA est un polymère bio-inspiré des protéines synthétisées par les moules marines pour se fixer sur différents supports. Dans cette nouvelle application, le défi est de garder le catalyseur actif sur les mousses PU du réacteur. Nous sommes relativement confiants dans les futurs résultats puisque nous avons déjà démontré au laboratoire le potentiel de la PDA sur les mousses PU dans un précédent brevet porté par le CNRS et l'UCBL [7]. Cependant, la température de 110 °C est la limite au-delà de laquelle les mousses de PU ne sont plus stables, ce qui ne permet pas leur utilisation pour des réactions fortement exothermiques.

Finalement, l'originalité de cette technologie pourrait également se trouver dans sa capacité à résoudre un problème bien connu des industriels : le colmatage des garnissages, généralement rencontré avec des liquides chargés de particules. Telle une éponge que l'on nettoie sous un flux d'eau, il est probable que cette technologie de garnissage élastique soit une solution pour diminuer les effets du colmatage à long terme. Les axes de recherches à explorer avec cette nouvelle technologie de réacteur sont nombreux et plusieurs financements de thèse ont été obtenus au laboratoire. Enfin, il est à noter que des études sont en cours pour remplacer les isocyanates par des dicarbamates beaucoup moins toxiques lors de la synthèse des mousses. L'avenir de ces mousses poreuses semble donc assuré et il est certain qu'elles n'ont pas fini de nous surprendre dans le domaine de l'ingénierie chimique...

[1] M. Lacroix *et al.*, Pressure drop measurements and modeling on SIC foams, *Chem. Eng. Sci.*, **2007**, 62, p. 3259-67.

[2] J.T. Richardson *et al.*, Properties of ceramic foam catalyst supports: pressure drop, *Appl. Catal. Gen.*, **2000**, 204(1), p. 19-32.

[3] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Vilebrequin\\_\(moteur\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Vilebrequin_(moteur))

[4] C. Greco *et al.*, Combining experimental and theoretical methods to learn about the reactivity of gas-processing metalloenzymes, *Energy Environ. Sci.*, **2014**, 7, p. 3543-73.

[5] J. Rodon Fores *et al.*, Protein-induced low molecular weight hydrogelator self-assembly through a self-sustaining process, *Chem. Sci.*, **2019**, 10, p. 4761-66.

[6] M. Michaud *et al.*, Unprecedented continuous elastic foam-bed reactor for CO<sub>2</sub> capture, *Chem. Eng. J.*, 12/08/2022, 138604, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138604>

[7] D. Edouard *et al.*, Procédé de modification des propriétés de surface de mousses cellulaires élastomères, WO2016012689A2 (Google patents), **2012**.

Cette fiche a été préparée par **David EDOUARD\***, maître de conférences, et **Maité MICHAUD**, postdoctorante, Université Claude Bernard Lyon 1, Laboratoire Catalyse Polymérisation, Procédés et Matériaux (CP2M), CNRS, CPE Lyon-UCBL ([david.edouard@univ-lyon1.fr](mailto:david.edouard@univ-lyon1.fr)). Les fiches « Un point sur » sont coordonnées par Jean-Pierre FOULON ([jp foulon@wanadoo.fr](mailto:jp foulon@wanadoo.fr)). Elles sont regroupées et en téléchargement libre sur [www.lactualitechimique.org](http://www.lactualitechimique.org).