

Quand le carbone boucle la boucle

Quand l'atmosphère commence à ressembler à une serre mal ventilée, chacun cherche un coupable. Certains accusent le Soleil, d'autres leur bureau sans climatisation, et les plus courageux regardent du côté de nos habitudes. C'est dans cette ambiance de thermomètre indécis que les rédacteurs du Grain de Sel ont rencontré l'inspectrice Clara Carbonelle*, spécialiste des affaires où le carbone finit toujours au mauvais endroit.

Son dernier dossier commence par une scène ordinaire : une bouteille vide oubliée après un pique-nique, un emballage qui s'échappe d'une poubelle, et du CO₂ qui flotte dans l'air avec l'air de dire : « Ne me regardez pas, je suis invisible ». Pourtant, les indices donnent vite chaud. Plus de 8 milliards de tonnes de plastiques avaient déjà été produites dans le monde en 2015 [1], et une part importante finit encore en décharge, est incinérée ou échappe aux filières de traitement. Le problème ne se limite donc pas à l'objet abandonné : il concerne aussi la manière dont le carbone est extrait, transformé, utilisé, puis trop souvent perdu.

L'inspectrice Carbonelle refuse pourtant de classer les suspects trop vite. Pour elle, plastiques et CO₂ ne sont pas seulement deux problèmes environnementaux : ce sont aussi deux réservoirs de carbone qui ont raté leur orientation professionnelle. L'objectif devient alors clair : remettre ce carbone dans la boucle de la chimie, au lieu de le laisser s'accumuler sous forme de déchets ou d'émissions.

Le PET dans le viseur

Dans cette enquête, un suspect revient souvent : le PET, ou polyéthylène téréphtalate. Ce plastique, utilisé dans de nombreuses bouteilles, emballages et fibres textiles, contient des liaisons ester. Ces liaisons peuvent être rompues par hydrolyse pour redonner des molécules plus petites, comme l'éthylène glycol et l'acide téréphtalique. Mais l'histoire ne s'arrête pas là : certaines molécules issues du PET peuvent ensuite être oxydées pour former des produits à plus forte valeur ajoutée.

Le Soleil entre en scène

C'est ici que la photoélectrochimie entre en scène (figure 1). Son principe est d'utiliser la lumière pour déclencher des réactions chimiques à la surface de matériaux appelés photoélectrodes. Ces matériaux absorbent la lumière, génèrent des charges électriques puis les dirigent vers les molécules à transformer. En version courte : le Soleil fournit l'énergie, et les électrodes organisent le travail. Cette approche est aujourd'hui étudiée pour transformer des déchets plastiques en molécules utiles, parfois en produisant aussi de l'hydrogène [2,3]. Les photoélectrodes à base de silicium sont particulièrement intéressantes, car le silicium absorbe efficacement la lumière solaire. Mais il ne peut pas travailler seul. En milieu photoélectrochimique, il doit être protégé et associé à des catalyseurs capables d'accélérer les réactions souhaitées.

Les architectes de la scène de crime

Dans ce type de dispositif, les MOF, ou réseaux métallo-organiques (figure 2), peuvent jouer un rôle important. Ces matériaux sont construits à partir d'ions métalliques reliés par des molécules organiques, formant des architectures poreuses et ordonnées. On peut les imaginer comme de petites charpentes moléculaires : leurs pores peuvent accueillir les réactifs, leurs sites métalliques peuvent participer à la catalyse, et leur organisation peut aider à orienter les transformations chimiques [4].

Deux sources de carbone, une seule stratégie

Les indices mènent à une stratégie originale développée dans le cadre du projet européen Actions Marie Skłodowska-Curie « SOLAR-CATMOF », au sein de l'équipe Matière Condensée et Systèmes Électroactifs (MaCSE) de l'Institut des Sciences

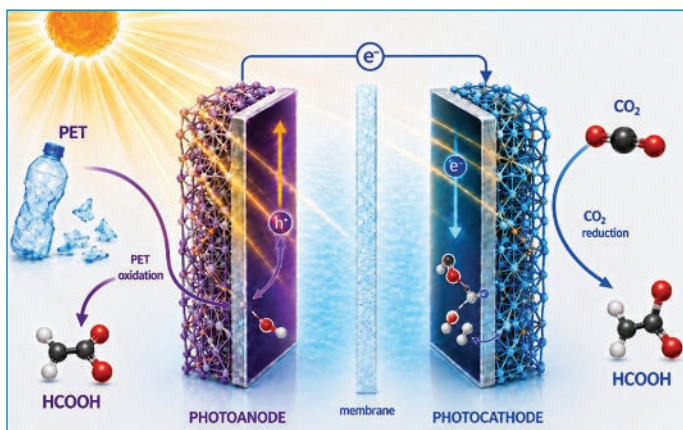


Figure 1 - Photoélectrochimie solaire : transformer les déchets carbonés en molécules utiles. Illustration réalisée à l'aide de l'intelligence artificielle.

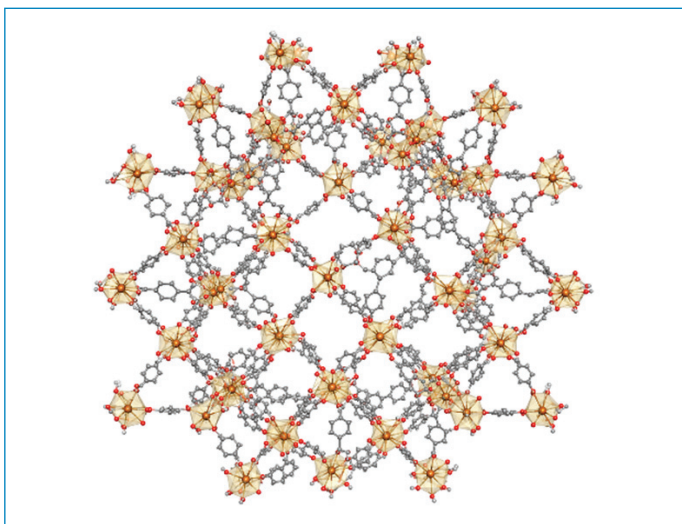


Figure 2 - Structure cristallographique d'un MOF à base de fer.

Chimiques de Rennes (ISCR). Leurs travaux montrent qu'il est possible d'utiliser un même dispositif photoélectrochimique pour transformer deux sources de carbone en parallèle. D'un côté, des molécules issues du PET sont oxydées pour produire de l'acide glycolique et de l'acide formique. De l'autre, le CO₂ peut être réduit simultanément en acide formique. Cette approche permet donc de coupler la valorisation d'un déchet plastique avec la transformation du CO₂, en utilisant la lumière comme source d'énergie. L'acide glycolique est bien connu dans le domaine de la cosmétique, notamment dans certains

soins exfoliants pour la peau. L'acide formique, quant à lui, est une petite molécule très utile en chimie : il peut servir d'intermédiaire de synthèse, intervenir dans différentes transformations chimiques, et il est aussi étudié comme vecteur potentiel pour le stockage et le transport de l'hydrogène.

Bien sûr, il ne suffit pas de poser une bouteille au soleil pour obtenir une crème cosmétique ou un carburant propre. Sinon, les laboratoires auraient déjà remplacé les pailles par des transats. Le vrai défi consiste à concevoir des matériaux capables d'absorber la lumière, de protéger l'électrode, de transférer efficacement les charges et de favoriser la bonne réaction, sans gaspiller l'énergie dans des réactions secondaires.

Cette stratégie ne prétend pas remplacer toutes les filières de recyclage ni résoudre seule le problème du CO₂. Plusieurs verrous restent importants : améliorer l'efficacité, la stabilité, la sélectivité et le coût des dispositifs. Mais elle montre qu'une autre lecture des déchets carbonés est possible. Le PET n'est plus seulement une bouteille en fin de vie, et le CO₂ n'est plus seulement une molécule à éviter : tous deux peuvent devenir des points de départ pour fabriquer de nouvelles molécules utiles.

La prochaine fois qu'un emballage chauffera au soleil, il ne se transformera pas par magie. Mais il rappellera qu'avec un peu de lumière, des électrodes bien conçues et beaucoup de chimie, même un déchet peut retrouver une place dans la boucle.

Zoom sur le RJ Bretagne - Pays de Loire

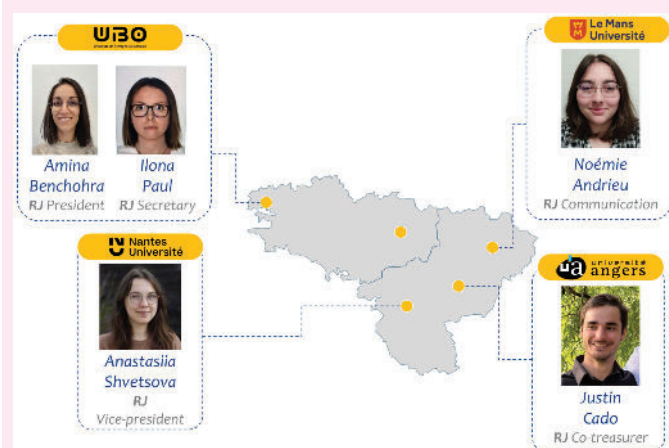
Depuis janvier 2025, le bureau du RJ-SCF Bretagne - Pays de Loire multiplie les initiatives pour fédérer les jeunes chimistes de son territoire. Parmi ses actions phares figure l'organisation de webinaires mensuels réunissant étudiants, doctorants, postdoctorants et jeunes professionnels autour de présentations scientifiques et de témoignages issus du monde académique ou industriel. Ces rencontres visent à valoriser les travaux menés dans la région, favoriser les échanges entre établissements et faire découvrir la diversité des carrières en chimie.

Le bureau est également présent lors de nombreux événements régionaux, qu'il s'agisse de journées des écoles doctorales, d'actions de médiation scientifique ou de manifestations organisées par les sociétés savantes. Plus récemment, il a engagé une collaboration avec le Réseau Jeunes de la Société Chimique Allemande (JCF-GDCh) autour des questions d'inclusion, en particulier concernant les étudiantes et étudiants en situation de handicap.

Le RJ-SCF Bretagne - Pays de Loire est toujours à la recherche de nouveaux membres. Les personnes intéressées peuvent contacter le bureau ou suivre ses actualités sur LinkedIn.

*bureau-rj-bpl@societechimiquedefrance.org

www.linkedin.com/in/rj-scf-bretagne-pays-de-loire-89a132351



Les membres du bureau du RJ Bretagne - Pays de Loire.

* Le nom a été modifié pour préserver l'anonymat de ce personnage fictif.

[1] R. Geyer, J.R. Jambeck, K.L. Law, Production, use, and fate of all plastics ever made, *Sci. Adv.*, **2017**, 3, e1700782, <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

[2] T. Uekert, M.F. Kuehnle, D.W. Wakerley, E. Reisner, Plastic waste as a feedstock for solar-driven H₂ generation, *Energy Environ. Sci.*, **2018**, 11, p. 2853-57, <https://doi.org/10.1039/C8EE01408F>

[3] X. Li, J. Wang, T. Zhang, T. Wang, Y. Zhao, Photoelectrochemical catalysis of waste polyethylene terephthalate plastic to coproduce formic acid and hydrogen, *ACS Sustainable Chem. Eng.*, **2022**, 10, p. 9337-47, <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c02244>

[4] K. Dashtian, S. Shahbazi, M. Tayebi, Z. Masoumi, A review on metal-organic frameworks photoelectrochemistry: a headlight for future applications, *Coord. Chem. Rev.*, **2021**, 445, 214097, <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.214097>

Dans le dernier numéro du Grain de Sel, l'inspecteur Percy Boulette laissait un indice sur l'identité de sa némésis. Félicitations à Clément CAMP, chargé de recherche CNRS au laboratoire de Catalyse, Polymérisation, Procédés et Matériaux (CP2M, Villeurbanne), pour avoir trouvé la réponse à l'énigme ; il s'agissait de PARACELSE, qui est également le nom du médecin suisse (entre autres activités) ayant l'adage : « *Seule la dose fait qu'une chose n'est pas poison* ». Peut-être reverra-t-on l'inspecteur Boulette dans d'autres enquêtes...

Cet article a été préparé par **Manel MACHREKI**, postdoctorante MSCA, CNRS (manel.machreki@univ-rennes.fr), et **Bruno FABRE**, directeur de recherche au CNRS (bruno.fabre@univ-rennes.fr), Institut des Sciences Chimiques de Rennes, UMR 6226, CNR/Université de Rennes, Équipe MaCSE – Matière Condensée et Systèmes Électroactifs.

Les « Grains de Sel » sont coordonnés par **Lise ESTOURNET**, membre du Bureau national du RJ-SCF, responsable communication (lise.estournet@gmail.com) et **Alexis PERROT**, président du RJ-SCF Normandie (alexis.perrot@ensicaen.fr). Ils sont en téléchargement libre sur www.lactualitechimique.org