

Une Chimie bioinspirée pour le développement durable

« Aller chercher l'inspiration dans la nature n'est pas une idée neuve. La pratique a été courante tout au long de l'histoire de l'humanité. Mais imiter la nature pour innover de façon durable, voilà une idée qui prend tout son sens au moment où la France s'engage dans une transition à la fois énergétique et écologique. C'est cette ambition que porte le biomimétisme. »

Question dont le Conseil économique, social et environnemental a été saisi par décision de son bureau en date du 27 mai 2014 en application de l'article 3 de l'ordonnance no 58-1360 du 29 décembre 1958 modifiée portant loi organique relative au Conseil économique, social et environnemental. Le bureau a confié à la section de l'environnement la préparation d'un avis et d'un rapport intitulés : *Le biomimétisme : s'inspirer de la nature pour innover durablement*. La section de l'environnement, présidée par Mme Anne-Marie Ducroux, a désigné Mme Patricia Ricard comme rapporteuse.

L'observation de la nature est une source inépuisable d'inspiration pour promouvoir les innovations en chimie. L'approche biomimétique et/ou bio-inspirée est une révolution dans nos paradigmes, car il ne repose pas sur ce que nous pouvons prendre à la nature, mais sur ce que nous pouvons apprendre d'elle. La production d'hydrogène, la conversion de l'énergie solaire, l'utilisation de matériaux renouvelables, abondants et peu chers, l'utilisation de processus chimiques plus écologiques... sont autant de défis que la chimie bio-inspirée est en mesure de prendre.

Bio-inspiration pour une économie durable de l'hydrogène

L'hydrogène est à la fois un mode de stockage efficace des énergies renouvelables et un vecteur énergétique prometteur. Produit à partir d'eau, son utilisation au sein de piles à combustibles ne génère que de l'eau. Il s'inscrit donc en plein dans les technologies de la transition énergétique. Cependant, le développement d'une économie basée sur l'hydrogène comme vecteur énergétique principal nécessite la levée de verrous scientifiques et technologiques majeurs. Le remplacement du platine par des catalyseurs moins coûteux au sein des couches actives des piles à combustible et d'électrolyseurs en est un. La mise au point de moyens de production directe (sans passer par la production intermédiaire d'électricité) d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables, telle que celle du soleil, en est un second qui permettrait sans doute de réduire les coûts tout en autorisant le stockage massif et durable de l'énergie solaire. Dans les deux cas, la solution peut venir d'une inspiration des systèmes naturels. Certains micro-organismes développent en effet un métabolisme centré sur l'hydrogène, grâce aux enzymes hydrogénases à base de fer ou de nickel. D'autres, comme certaines micro-algues réalisent une forme particulière de photosynthèse et utilisent la lumière pour produire de l'hydrogène à partir d'eau.

Bio-inspiration et valorisation du carbone renouvelable

Les plantes, lors de la photosynthèse, utilisent la lumière pour synthétiser directement des molécules à haute valeur énergétique, telles que les sucres, par réduction du CO₂ couplée à l'oxydation de l'eau. Le processus photosynthétique a depuis longtemps fasciné les chimistes qui ont essayé d'en reproduire les étapes clés. Ainsi, la production de méthane, de carburants liquides (acide formique, méthanol) ou de gaz de synthèse (CO + H₂) via l'électro ou la photo-réduction du CO₂ est une alternative d'actualité. En parallèle la valorisation du CO₂ et la production de molécules à haute valeur ajoutée forme un second axe de recherche.

D'autre part, les parois de cellules végétales sont une ressource renouvelable à fort potentiel pour la production de biocarburants de 2^{ème} génération. Elles représentent également une source de synthons de faible poids moléculaire pour l'industrie chimique et de molécules complexes aux propriétés intéressantes pour la cosmétique (antioxydants naturels), la pharmaceutique et l'industrie (arômes, adhésifs, biopolymères) Il a été récemment rapporté que certaines enzymes oxydatives améliorent de manière significative la dégradation enzymatique des parois cellulaires de plantes s. Les Lytic Polysaccharide Monooxygenases (LPMOs) sont une nouvelle classe de métalloenzymes contenant un atome de cuivre dans leur site actif. Elles agissent sur la partie cristalline de la cellulose en générant des polymères de glucose oxydés. Les recherches en cours s'intéressent à l'action de ces enzymes sur les autres composants majeurs des parois végétales ; hémicelluloses et lignines, sources de molécules en C5 et polyaromatiques. D'autres enzymes microbiennes utilisant le Fer ou le Manganèse comme agent oxydant sont capables d'oxyder la lignine végétale et fournissent des modèles de biocatalyseurs pour la dégradation de composés polyaromatiques et la bioremédiation

Bio-inspiration, photocatalyse et chimie verte

Pour effectuer les transformations chimiques vitales pour leur développement, les organismes vivants mettent en œuvre des processus qui utilisent des réactifs abondants tels que O₂ (oxygénation et oxydation), H₂ (hydrogénation), H₂S (sulfuration), H₂O (réaction hydrolytique, water splitting : $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$), CO₂ (formation de liaisons carbone-carbone) ... Peu réactives, ces molécules doivent subir des activations qui font généralement appel à des métalloprotéines à fer, cuivre, manganèse ou nickel. La compréhension du fonctionnement de ces systèmes enzymatiques est une source inépuisable d'inspiration pour les chimistes toujours en quête de réactions efficaces, propres et respectueuses de notre environnement. Cette chimie dite biomimétique ou bioinspirée, qui a fait l'objet de nombreuses investigations, reste un axe de développement important en chimie verte. D'autre part, ces transformations nécessitent le plus souvent des réducteurs ou des oxydants pour la régénération des espèces métalliques actives. Un axe nouveau en émergence dans ce domaine concerne l'utilisation de réducteurs ou oxydants photoinduits fonctionnant sur un mécanisme proche du photosystème (PSI et PSII).

Bio-inspiration et activation du dioxygène

Sur une période d'un siècle, l'effet de serre du méthane a été estimé 20 fois plus efficace que le dioxyde de carbone et sa persistance dans l'atmosphère a été évaluée entre 9 et 15 ans. Le méthane est également le constituant principal du gaz naturel et constitue une importante source d'énergie. Afin d'augmenter son potentiel comme une alternative aux carburants et au pétrole, il est transformé en méthanol. Actuellement, la production industrielle du méthanol est accomplie par le reformage de méthane qui nécessite des températures et des pressions élevées. Des procédés alternatifs tels que l'oxydation sélective directe du méthane en méthanol sont donc d'un intérêt considérable. Mais, l'énergie de la liaison C-H très élevée (104 kcal/mol) rend son oxydation en méthanol extrêmement difficile. Cependant, dans la nature, les méthanes monooxygénases (MMO) catalysent la conversion directe du méthane en méthanol à température ambiante et sous pression atmosphérique permettant ainsi l'utilisation du méthane comme source d'énergie.

La transposition de ces principes de base « bio-inspirés » permettra-t-elle l'émergence de nouvelles technologies ? Il y a fort à parier que oui...