

Demain le carbone : une nouvelle chimie

L'humanité commence à répondre au défi climatique en s'engageant dans une révolution énergétique et environnementale sans précédent. Si des mesures collectives et individuelles doivent être mises en place dès aujourd'hui pour conduire à des économies d'énergie, à moins de gaspillages et à plus de sobriété, car l'énergie sera plus rare et plus chère, et parce que les ressources de la planète, prenons-en conscience, ne sont pas infinies, une partie de la solution résidera dans la recherche, fondamentale, technologique et industrielle, et dans l'innovation. Il est illusoire de penser que la production exclusive d'énergies vertes, remplaçant énergies fossiles et nucléaire, le stockage des énergies intermittentes, les transformations des méthodes de l'agriculture et des procédés industriels les plus émetteurs de gaz à effet de serre, l'électrification massive de la mobilité et la rénovation thermique, soient possibles à très court terme et accessibles sans acquisition de nouvelles connaissances fondamentales et de nouvelles technologies. Ce message prend toute sa valeur en cette année de célébration des sciences fondamentales pour le développement durable. Ce que je veux brièvement mettre en avant ici, parmi la multitude de questions scientifiques et technologiques à traiter, c'est la nécessité d'avancer dans les deux directions suivantes, directions dans lesquelles la chimie va jouer un rôle majeur.

Tout d'abord, la finitude des ressources associées aux nouvelles technologies de l'énergie – je pense en particulier aux ressources minérales dont les besoins vont augmenter considérablement avec le développement massif des éoliennes, des outils numériques et des batteries par exemple – impose un investissement nouveau dans les technologies de récupération et de recyclage des métaux. C'est un des pans de ce que l'on intègre aujourd'hui dans les scénarios d'économie circulaire, le cycle récupération-recyclage s'appliquant évidemment à bien d'autres matériaux, en premier lieu les plastiques et les polymères.

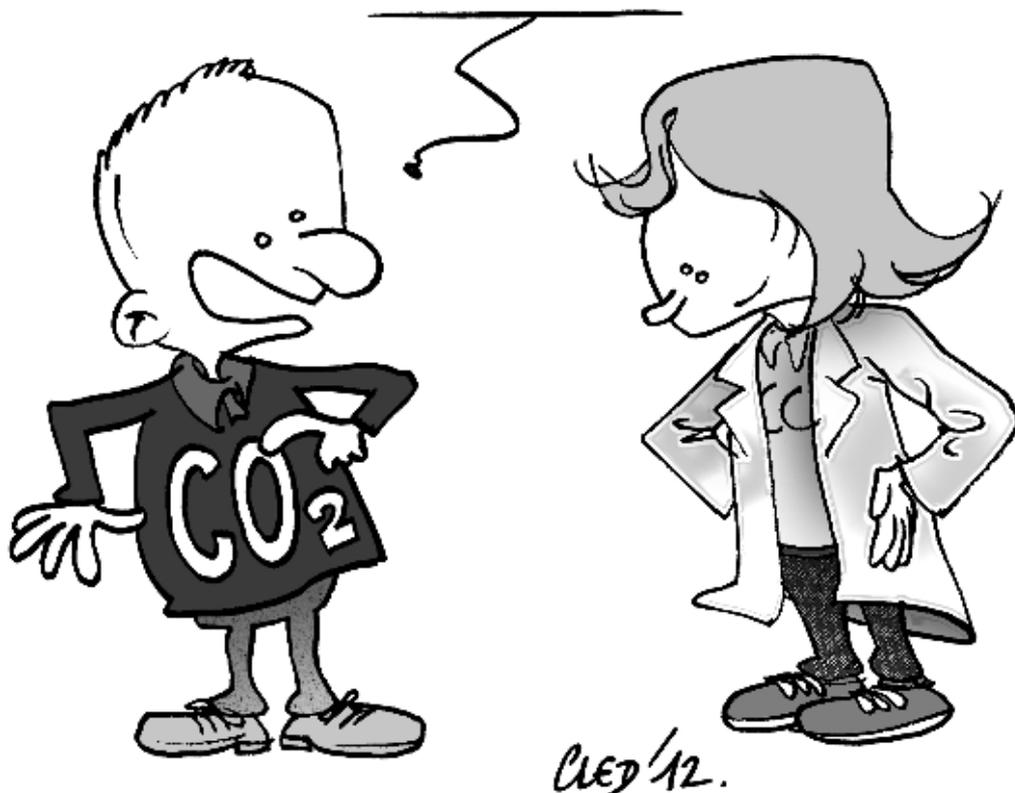
La seconde problématique porte sur le développement d'une chimie nouvelle du carbone qui s'appuie sur des ressources carbonées non fossiles. Le maître mot, on l'a compris, est « décarbonation ». Ce verbe, « décarboner », n'est malheureusement pas approprié. Je propose plutôt d'utiliser le verbe « défossiliser » pour indiquer clairement qu'il ne s'agit en aucune manière de supprimer totalement le carbone de la planète et des sociétés humaines, ce qui est absurde, mais de supprimer l'utilisation des ressources fossiles (charbon, pétrole, gaz) comme sources d'énergie, ce qui est très différent. En effet, la dénonciation pure et simple du CO₂ a un double inconvénient. Le premier est qu'elle le réduit à son seul effet de serre, alors qu'il est le médiateur chimique central de la relation entre l'homme et la nature, produit par la respiration du premier et substrat de la photosynthèse naturelle mise en œuvre tous les jours par la seconde, plus spécifiquement par l'activité des organismes vivants dits photosynthétiques (plantes, microalgues et cyanobactéries). La photosynthèse

est ce mécanisme prodigieux qui permet aux organismes photosynthétiques de faire réagir le CO₂ avec de l'eau pour produire toutes les molécules carbonées (sucres, acides aminés, protéines) contenues dans la biomasse qui nous entoure, et d'utiliser la seule énergie solaire pour rendre cette réaction possible. La transformation naturelle du CO₂ est en effet sous une contrainte thermodynamique incontournable : elle a besoin d'énergie. Ce faisant, ce mécanisme conduit à stocker l'énergie solaire sous une autre forme d'énergie, dite chimique, puisque concentrée dans les liaisons chimiques des composés carbonés formés, plus facile d'utilisation. Ces molécules carbonées, riches de l'énergie solaire qu'elles ont incorporée et contenant du carbone exclusivement issu du CO₂ atmosphérique, constituent les « carburants biologiques » permettant d'un côté la vie cellulaire, et fournissant de l'autre l'énergie nécessaire aux hommes et animaux qui s'en nourrissent.

Tout est donc carboné sur la planète et le restera, à commencer par la vie donc : humains, animaux, plantes, dépendent tous du CO₂ et des molécules qui en dérivent. Il faut ici rappeler cette chose fondamentale : si la vie a été possible, d'ailleurs très tôt dans l'histoire de la Terre, il y a plusieurs milliards d'années avec la naissance des premiers organismes cellulaires, c'est grâce à ce qui constituait la seule source de carbone disponible, à savoir le CO₂, massivement présent dans l'atmosphère, lui-même dérivé du carbone né dans les étoiles. C'est à partir du CO₂ que se sont construites les premières briques moléculaires du vivant d'abord, les premiers acides aminés, les premiers sucres, les premières bases nucléiques, puis dans un second temps les acides nucléiques (ADN et ARN, les molécules de l'information génétique), les lipides (nécessaires à la compartimentation cellulaire), les protéines et les enzymes (les acteurs de la transformation de la matière biologique). C'est ce qui fait que la seule vie possible est organique, carbonée donc.

Le deuxième inconvénient de la dénonciation globale du CO₂ est qu'elle s'élargit, dans l'inconscient collectif, au carbone en général, justifiant des appels absurdes à une élimination radicale du carbone. Ces visions oublient que celui-ci est omniprésent dans notre environnement le plus quotidien, et pas seulement sous la forme des carburants fossiles dont nous voulons nous débarrasser. Le carbone est utile pour le bien de l'humanité sous la forme d'une infinité d'usages : pour se loger (bois), se déplacer (plastiques et batteries), se vêtir (polymères, colorants), se soigner (médicaments, équipements plastiques divers à l'hôpital). Demain, même après avoir éradiqué le carbone fossile, il faudra encore et toujours du carbone. Demain, un médicament restera, en grande partie, une petite molécule organique. Demain, de nombreuses formes de mobilité ne pourront pas être alimentées par des batteries électriques ou de l'hydrogène et il faudra encore, pour longtemps, des hydrocarbures liquides, certes synthétiques mais de structure identique à l'essence et au diesel d'aujourd'hui. Demain, il faudra des précurseurs organiques

ÇA, C'EST POUR CHIMIE ORGANIQUE 2 FOIS PLUS EFFICACE!



de polymérisation pour produire de nouveaux plastiques. Que ces derniers soient biosourcés et biodégradables ne change rien à l'affaire, il s'agit de carbone. Le carbone est donc irremplaçable pour de nombreux usages. La planète et les sociétés humaines sont donc carbonées et le resteront, une notion malheureusement peu connue.

La conséquence, c'est que lorsque nous nous serons débarrassés des ressources fossiles, soit parce que nous les aurons toutes consommées – ce qu'il vaudrait mieux éviter –, soit parce que nous aurons pris la décision de les laisser au fond de la Terre – ce qui sera difficile –, il faudra non seulement utiliser toutes les sources d'énergie bas-carbone (soleil, vent, géothermie, énergies hydroélectrique et nucléaire), mais également exploiter d'autres sources de carbone, et ce ne sont ni le vent ni le soleil qui fourniront ce carbone. En réalité, le choix est limité : il s'agira pour l'essentiel de la biomasse et du CO_2 , aujourd'hui déjà utilisés au niveau industriel, mais à une échelle bien trop limitée qu'il faudra augmenter massivement. Il est important, à cette étape, de bien comprendre la chose suivante : le fait que l'usage de ce « nouveau » carbone puisse produire du CO_2 devient secondaire puisque qu'il est issu du CO_2 lui-même ou de la biomasse dont on a bien vu qu'elle ne contient que du carbone issu du CO_2 de l'atmosphère. De sorte que, évidemment avec des rendements optimisés, le cycle est fermé.

La biomasse sera exploitée en effet pour produire de plus en plus de molécules organiques nécessaires à l'industrie chimique : carburants, solvants, polymères, précurseurs de

synthèse, etc. Pour que cela soit possible à très grande échelle, il va falloir, là aussi, développer massivement la recherche fondamentale et technologique pour inventer de nouveaux procédés ou pour améliorer d'anciens procédés de : méthanisation (pour la production de biométhane, à partir de déchets agricoles et de cultures intermédiaires à vocation énergétique), pyrolyse, gazéification (pour produire du gaz de synthèse, à convertir en hydrocarbures par le procédé Fischer-Tropsch), fermentation des sucres issus de plantes de culture sucrière (canne à sucre, betterave), ou fermentation de l'amidon issu du blé, du maïs ou de la pomme de terre (pour produire du bioéthanol), et également pressage d'oléagineux (colza, tournesol) pour produire des huiles. Le bioéthanol peut être mélangé à l'essence et les huiles au gazole, après différents traitements (estérification, hydrotraitement).

Mais ces biocarburants, dits de première génération, posent de sérieux problèmes, notamment parce qu'ils sont produits à partir de cultures vivrières. La véritable révolution des biocarburants sera celle des biocarburants de deuxième et troisième génération. La seconde génération utilise non pas les parties comestibles des plantes, mais les parties non valorisables, les résidus forestiers et agricoles, ainsi que des plantes à croissance rapide non comestibles et dédiées à la production de ces biocarburants. On est encore loin, au niveau technologique, de pouvoir développer cette filière à grande échelle. En effet, si les parois cellulaires de ces plantes sont très riches en sucres, ces derniers sont fixés dans des polymères naturels très stables (cellulose, hémicellulose), desquels ils sont très difficiles à extraire. De nombreux travaux de recherche sont en cours pour mettre au point des procédés propres et

économiques en énergie, chimiques, enzymatiques et microbiologiques pour déstructurer ces matériaux lignocellulosiques et récupérer les sucres, précurseurs de l'éthanol.

Les biocarburants de troisième génération sont quant à eux obtenus à partir d'huiles produites par les microalgues, des organismes photosynthétiques qui, grâce à la photosynthèse et à l'énergie solaire, sont capables de fixer des quantités importantes de CO_2 et de les transformer massivement en lipides. Ces derniers peuvent être ensuite estérifiés pour donner des biodiesels, ou hydrogénés pour donner des hydrocarbures à mélanger à l'essence ou au kérosène. Le développement de cette filière, encore émergente, passe par de nouvelles innovations, en particulier dans la mise au point de nouvelles souches d'algues, pour augmenter les rendements photosynthétiques, et dans l'optimisation des photobioréacteurs installés dans de grandes fermes d'algues. Ces algues doivent aussi être, sans doute plus utilement, exploitées pour la production de molécules à haute valeur ajoutée, de polymères biodégradables et de nourriture.

La biomasse doit également avoir sa place, grâce aux matériaux biosourcés comme le bois, pour l'essentiel, mais aussi la paille, un excellent isolant, et les fibres bio-organiques végétales, comme le lin et le chanvre, qui complètent les fibres minérales (fibres de verre). Les pays scandinaves nous montrent qu'il est possible de faire une très grande utilisation du bois pour la construction.

Une autre source de carbone à développer est le CO_2 lui-même. Pour cela, il convient de travailler à la mise au point et à l'optimisation de toute une série de procédés de transformation du CO_2 : hydrogénation du CO_2 avec de l'hydrogène vert, (photo)électrolyse directe du CO_2 dans des stratégies de photosynthèse artificielle, réactions de polymérisation

conduisant à une fixation importante du CO_2 dans des matériaux carbonés stables (polycarbonates et résines par exemple). Aujourd'hui, cette chimie ne concerne que 150 millions de tonnes de CO_2 , dans le monde ; il faut donc passer à une autre échelle. Tout dépend de notre capacité à capturer le CO_2 en quantités suffisantes, d'abord en sortie des sites industriels les plus émetteurs (métallurgie, centrales thermiques, fermenteurs, cimenteries, etc.), à hauteur de 4 gigatonnes par an, et plus tard, en fixant directement et concentrant le CO_2 de l'atmosphère.

La chimie organique a eu de longues heures de gloire à partir de la fin du XIX^e siècle jusqu'à la fin du XX^e siècle. Certains se sont émus de voir cette science merveilleuse un peu trop abandonnée par les agences de financement, les programmes de recherche et les comités Nobel. Qu'ils se rassurent : dans ce contexte nouveau de l'approfondissement des sciences fondamentales et appliquées pour le développement durable, la chimie organique a devant elle de formidables perspectives et de nouvelles opportunités. En réalité, c'est toute la chimie qui est concernée dans cette nouvelle aventure du carbone : chimie des matériaux, catalyse homogène et hétérogène, électrochimie et photochimie, biochimie et chimie biologique.

Marc FONTECAVE,

Professeur au Collège de France, Laboratoire de Chimie des Processus Biologiques, Paris.

* marc.fontecave@college-de-france.fr

VA VRAIMENT FAUOIR DEMANDER
AUX CHIMIISTES QU'ILS NOUS AMÉLIORENT
CES NOUVEAUX CARBURANTS...

