

LE DIOXYDE DE CARBONE, UNE MOLÉCULE CLÉ POUR UNE PLANÈTE DURABLE

Julien Lefebvre, Noël Baffier, Jean-Claude Bernier

D'après l'article *Le dioxyde de carbone, la molécule-clé de la chimie du développement durable* de Jacques Amouroux, Paul Siffert, Jean-Pierre Massué, Simeon Cavadias, Béatriz Trujillo, Koshi Hashimoto, Phillip Rutberg et Sergey Dresvin publié dans l'ouvrage « La chimie et la nature » EDP Sciences, 2012, ISBN : 978-2-7598-0754-3

Le dioxyde de carbone CO_2 est une molécule très répandue (1) : il est à la fois responsable du stockage de l'énergie solaire par photosynthèse, de l'origine du charbon, du pétrole et du gaz naturel, ou encore des bulles qu'on trouve dans les sodas (2). Il est cependant aussi au cœur de problématiques majeures comme l'augmentation de l'effet de serre ou celle des besoins énergétiques. Comment en faire un usage bénéfique et durable ?

LE CYCLE DU CARBONE

Depuis des milliards d'années, le dioxyde de carbone joue un rôle majeur dans le cycle du carbone puisqu'il a une place centrale dans le développement des végétaux (3). Au cours du processus de photosynthèse, le dioxyde de carbone et l'eau réagissent pour former du glucose, sous l'action du soleil sur la chlorophylle, pigment végétal vert. Ce processus permet de stocker l'énergie solaire sous forme d'énergie chimique (Figure 1A).

Le stockage de la matière et de l'énergie peut ensuite évoluer par une polymérisation du glucose conduisant à des macromolécules de tailles plus ou moins importantes, telles que l'amidon, bien connu pour ses applications alimentaires, ou encore la cellulose, couramment utilisée dans le domaine du papier. À l'inverse, la combustion du glucose, réaction avec le dioxygène, permet de restituer sous forme d'énergie thermique l'énergie solaire stockée par les plantes (Figure 1B).

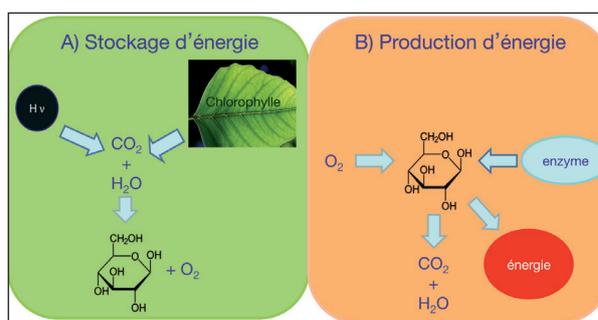


Figure 1. A) La photosynthèse est modélisée par l'équation chimique : $6 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2$.
B) L'équation de la réaction qui modélise cette combustion est : $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2 \rightarrow 6 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$.

Ces réactions font partie du cycle naturel du carbone (Figure 2). Il en existe d'autres. Le dioxyde de carbone peut notamment être stocké dans les océans dans lesquels il est dissous et transformé. Certaines micro-algues le transforment par exemple en carbonate de calcium CaCO_3 et d'autres en biomasse. En milieu profond et en l'absence d'oxygène, des bactéries transforment quant à elles le CO_2 en méthane CH_4 , lequel est ensuite stocké dans les roches sédimentaires qui conduiront aux « gaz de schistes », elles sont à l'origine de réserves d'hydrocarbures.

À travers ces transformations riches et variées, le CO_2 (4) apparaît bien comme une molécule potentiellement valorisable par la chimie. Mais depuis deux siècles, les échanges entre végétation, atmosphère et océans sont modifiés, par la combustion des réserves fossiles d'une part, et par la déforestation d'autre part. Ces deux phénomènes conduisent à

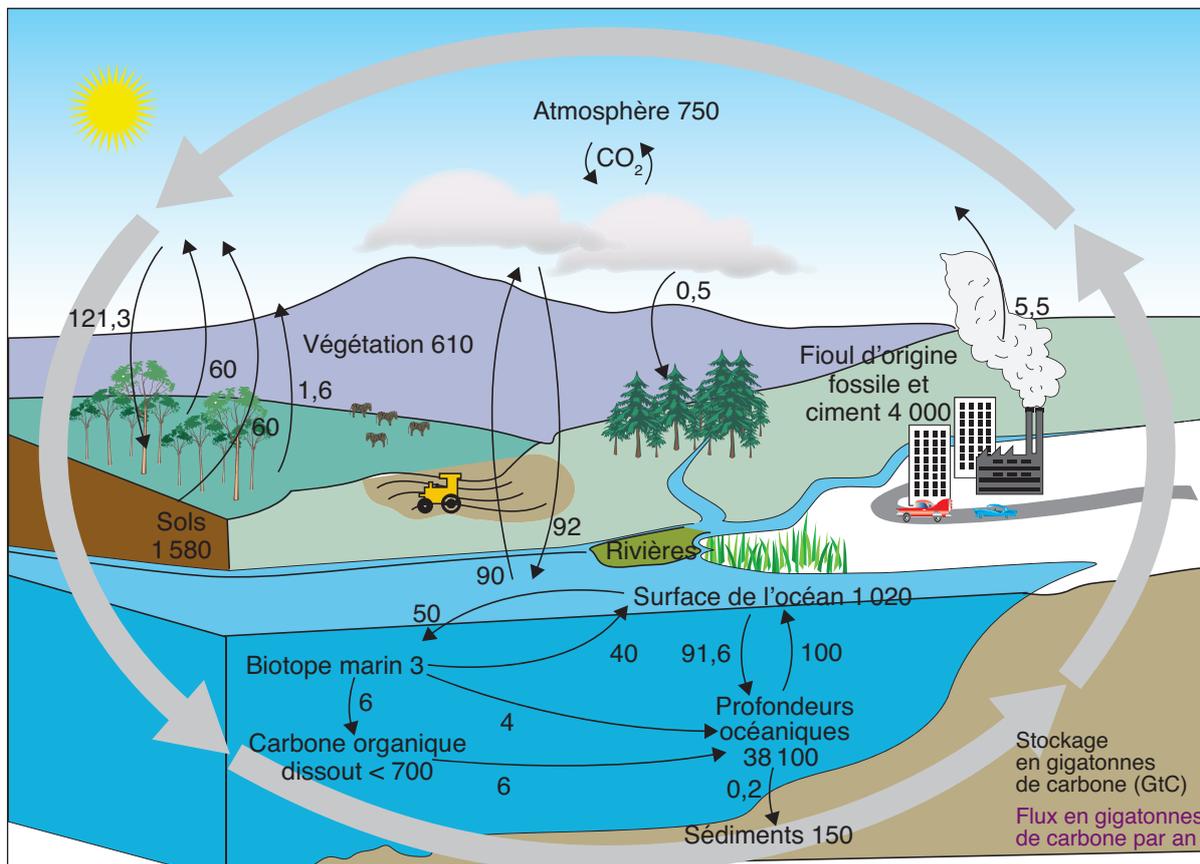


Figure 2. Le cycle du carbone. Source : ACS, 6 oct. 2009.

une accumulation accrue de CO_2 dans l'atmosphère (dont la quantité est passée de 280 à 400 ppm) et simultanément à une acidification des océans.

LES DÉFIS DU CO_2

Afin de réduire la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère, deux pistes sont envisagées conjointement : en premier lieu, réduire les émissions de CO_2 , et en parallèle, le capter pour le recycler et de le valoriser. La capture du CO_2 (5) se fait à partir des fumées émises par les centrales à charbon. Il existe ensuite plusieurs procédés – la plupart en cours de développement – pour stocker et valoriser le CO_2 . En voici quelques exemples.

Transformer le CO_2 en méthane CH_4 : une nouvelle source pour réguler l'énergie électrique

Le principe paraît très simple (Figure 3) : à partir de l'eau de mer et d'une énergie alternative renouvelable (éolienne, solaire), on génère de l'hydrogène et de l'oxygène par électrolyse. Puis par réaction entre l'hydrogène et le CO_2 , on fabrique du méthane CH_4 . Ce gaz peut alors être brûlé pour en tirer de l'énergie.

C'est un bon procédé pour stocker l'énergie produite par les éoliennes et les panneaux solaires : 1 kWh d'énergie intermittente produite de cette manière

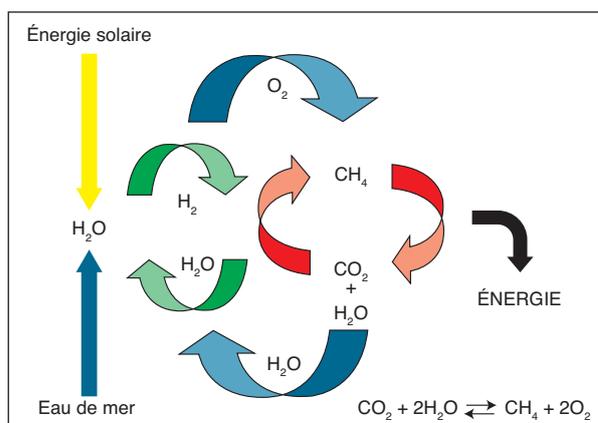


Figure 3. Transformation du CO_2 en méthane CH_4 . Source : Martin E. Carrera Manager Biotechnology BP, EMRS Paris 5/02/2008.

en heures creuses – peu chère et renouvelable – permet en effet d'obtenir 0,5 kWh en heures de pointe, quand l'énergie est dix fois plus chère et quand elle est produite essentiellement à partir de sources fossiles non renouvelables.

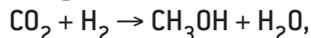
Transformer le CO_2 en méthanol CH_3OH : de nombreuses applications industrielles

Le CO_2 stocké peut aussi être transformé en méthanol et devenir une nouvelle matière première industrielle.

Le méthanol a de nombreuses applications. Il peut par exemple jouer le rôle d'additif pour l'amélioration de l'indice d'octane d'un moteur [6]. Il peut aussi servir pour extraire les protéines produites par élevage de micro-algues (procédé expérimenté aux Pays-Bas). Il peut également être polymérisé pour donner des matières plastiques (polyéthylène, polypropylène).

Il présente par ailleurs l'avantage d'être facilement liquéfié. Cette transformation physique s'accompagne d'une contraction de volume significative (de 22,4 litres à 32 cm³), ce qui facilite notamment son stockage et son transport.

Le méthanol est généré selon la réaction :



à 300 °C sous 70 bars, à l'aide d'un catalyseur (Cu/Zn).

Recycler le CO₂ pour transformer le charbon en gaz de synthèse

Le transport du charbon est cher. Il peut être rentable de le transformer en gaz sur son lieu d'extraction et de le transporter par gazoduc. Le gaz produit peut alors être utilisé dans les centrales électriques ou converti en hydrocarbures.

La transformation du charbon en gaz de synthèse, appelée gazéification, est une réaction qui peut être réalisée grâce au CO₂ selon la réaction de Boudouard :



Il faut cependant au préalable broyer le charbon et recourir au processus de lit fluidisé qui confère au charbon réduit en poudre un caractère fluide. Le CO₂ peut être apporté de deux manières différentes : soit

dans un mélange CO₂ + O₂ (qui nécessite au préalable la production d'O₂ par distillation – procédé expérimenté en Europe), soit pur en utilisant une torche à plasma, une source d'énergie très puissante (1 à 10 MW) alimentée par du CO₂ (procédé développé en Russie) (Figure 4).

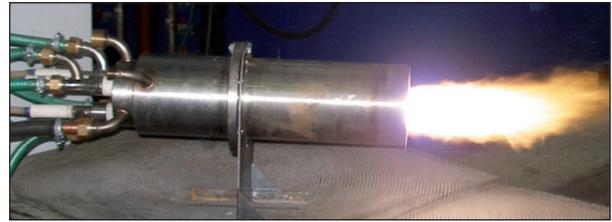


Figure 4. Une torche à plasma.

Valoriser le CO₂ pour la production de micro-algues

Le CO₂ capturé peut aussi être utilisé pour augmenter la photosynthèse de ces micro-algues. L'élevage de ces organismes présente de nombreux débouchés : on utilise leurs protéines et leurs lipides dans les domaines de la cosmétique, des additifs alimentaires ou des biocarburants. Certaines donnent préférentiellement des protéines, d'autres des lipides [7]. Cette voie fait l'objet de nombreux travaux de recherche en France.

La figure 5 présente le schéma d'une installation de production de biodiesel à partir de culture de micro-algues. Elles sont capables de fournir 50 fois plus d'huile que le colza, à surface égale. Il faut néanmoins rappeler que la culture des algues exige le contrôle des conditions de température, de pression (pressions d'oxygène et de CO₂), de nutriments et bien sûr la protection contre les attaques bactériennes ou virales.

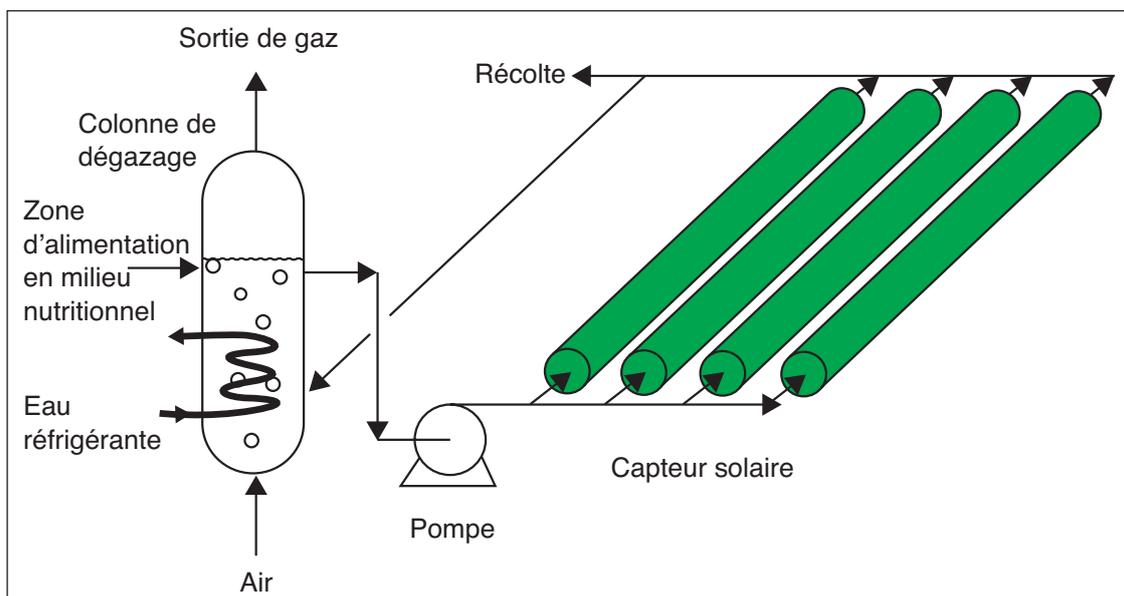


Figure 5. Production de biodiesel à partir de micro-algues.

Le CO₂, nouvelle matière première pour la chimie

À partir d'une matière première de très haute pureté (99,9 %), on peut imaginer élaborer des produits nouveaux : que ce soient des produits à grande valeur ajoutée ou des matériaux équivalents aux produits de base de la pétrochimie [8].

Il existe aujourd'hui de nombreuses possibilités de réactions chimiques utilisant du CO₂, qui ne sont limitées que par l'imagination des chimistes. Le CO₂ peut par exemple être polymérisé pour donner par exemple du polyméthacrylate de méthyle (PMMA), des polyéthers et du polyéthylène par réaction du CO₂ avec des polyols. Ces travaux visent à concevoir des voies de synthèse qui évitent les dangers de l'utilisation de l'acide cyanhydrique (HCN) et de l'acide sulfurique (H₂SO₄).



Figure 6. Produits à base de polymères (polyester et polyéther). Source : Laboratory of polymer ecomaterial, CAS/STOA 22/03/2011, Changchun Inst. Applied Chemistry, CAS.

LE CO₂ MOLÉCULE-CLÉ DE DEMAIN ?

Le CO₂ peut devenir la matière première [9] d'une véritable révolution industrielle. Nous sommes au début d'un cycle qui nous conduira d'ici quarante à cinquante ans au recyclage d'une plus grande partie du carbone émis sous forme de CO₂, selon des protocoles appropriés à chaque industrie. Imaginer atteindre au moins 50 % de CO₂ recyclé, contre seulement quelques % actuellement, est un enjeu considérable pour l'avenir de notre planète.

POUR EN SAVOIR PLUS

[1] Le CO₂ matière première de la vie (Chimie et... junior)

<http://www.mediachimie.org/node/1755>

[2] Pourquoi y a-t-il des bulles dans mon champagne

<http://www.mediachimie.org/node/1593>

[3] Exemple de réactions chimiques : la photosynthèse

<http://www.mediachimie.org/node/2096>

[4] Nom de code CO₂

<http://www.mediachimie.org/node/991>

[5] Le captage de CO₂ dans les fumées par absorption chimique réversible : comment ça marche (vidéo)

<http://www.mediachimie.org/node/1924>

[6] Pétrole et essences commerciales

<http://www.mediachimie.org/node/655>

[7] Les algocarburants, de nouveaux diesels miracles ?

<http://www.mediachimie.org/node/1169>

[8] Le dioxyde de carbone : enjeux énergétiques et industriels (vidéo)

<http://www.mediachimie.org/node/875>

[9] Que faire du CO₂ ? de la chimie !

<http://www.mediachimie.org/node/1334>

Noël Baffier, professeur honoraire d'université, ancien directeur des Études de l'École d'Ingénieurs de Chimie Paris-tech, spécialité de recherches : science des matériaux

Jean-Claude Bernier, professeur émérite de l'Université de Strasbourg, ancien directeur scientifique des sciences chimiques du CNRS

Julien Lefebvre, professeur de physique chimie

Grégory Syoën, professeur agrégé, chef de projet Mediachimie-Fondation de la maison de la chimie