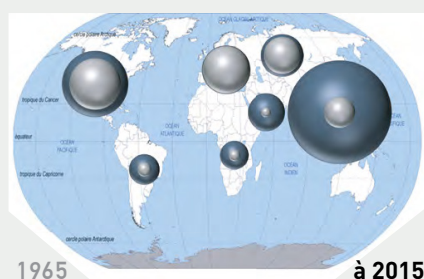


Éric Bausson

Qui n'a jamais entendu parler du réchauffement climatique lié à l'émission du CO₂, le dioxyde de carbone? Sans doute pas grand monde!

La carte ci-dessous présente l'évolution de la production de CO₂ entre 1965 (bulles en gris clair) et 2015 (bulles en bleu foncé).



Source : [Conférence de Jean-Eudes Moncomble](#)
Colloque Chimie et énergies nouvelles - 10/02/2021

La situation a profondément changé dans beaucoup de régions du monde. Si pour l'Europe et l'Amérique du Nord les bulles grises et bleues sont assez similaires en taille, en revanche, c'est en Afrique et au Moyen-Orient que les bulles ont le plus augmenté, et surtout, on constate une explosion de la bulle de l'Asie pacifique. Cela montre qu'aujourd'hui, c'est dans d'autres régions du monde que les nôtres (Europe) que se posent, entre autres, les enjeux et pour lesquelles des prises de décision drastiques et rapides s'avèrent nécessaires pour combattre le changement climatique.

Mais le dioxyde de carbone, un des gaz à effet de serre, produit à un endroit n'y reste pas cantonné! Il faut donc le piéger avant son rejet dans l'atmosphère terrestre, ainsi cela ne ferait pas augmenter sa concentration moyenne, actuellement de 400 p.p.m. (400 « parties par million » soit 0,04 %).

Comment la chimie peut-elle contribuer à cet effort indispensable, voire vital?

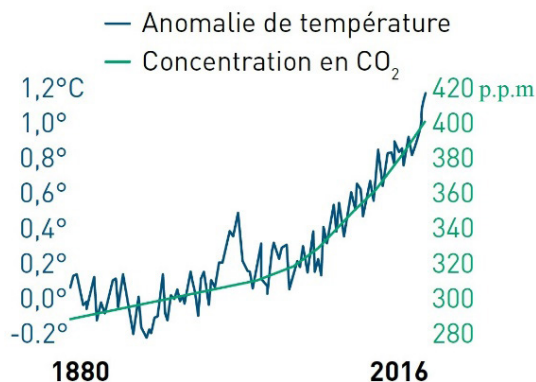
PLAN ET RESSOURCES POUR TRAITER CETTE QUESTION DU GRAND ORAL

En suivant le questionnaire ci-après et en vous appuyant sur les ressources proposées parmi toutes celles de Mediachimie, la médiathèque de la Fondation de la Maison de la Chimie, il est possible de répondre à cette problématique.

- Qu'entend-on par « gaz à effet de serre » ?
- Pourquoi le CO₂ est-il pourtant si important ?
- Que faire de l'excès de CO₂ ?

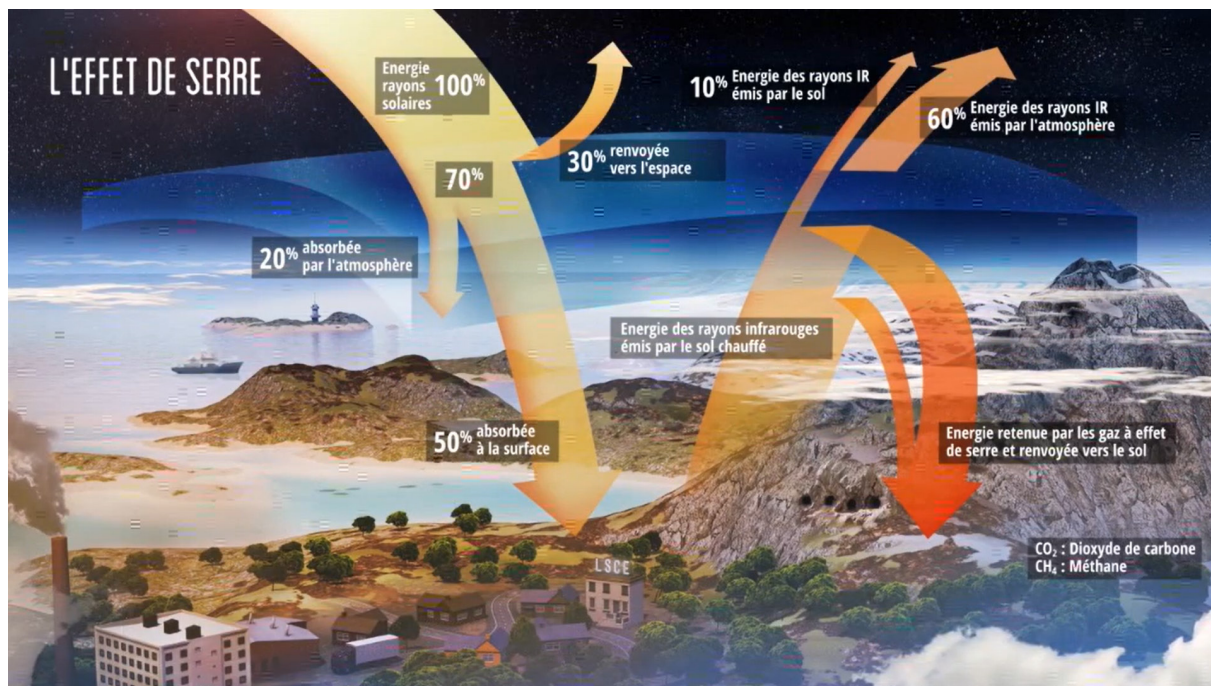
• Qu'entend-on par « gaz à effet de serre » ?

Le lien entre la concentration (exprimée en p.p.m.) du CO₂ et l'évolution de la température moyenne de la Terre ne laisse guère de doutes d'après le graphique ci-contre car entre 1880 et 2016, la concentration en CO₂ a augmenté de plus de 100 p.p.m., ce qui a entraîné une élévation de la température moyenne à la surface de la Terre supérieure à 1 °C.



Le dioxyde de carbone CO₂, tout comme le méthane CH₄ et l'eau H₂O, est un gaz à effet de serre.

D'après l'illustration ci-dessous, cet effet de serre correspond à l'énergie d'une partie du rayonnement infrarouge émis par le sol chauffé qui est retenue par les gaz à effet de serre et est renvoyée vers le sol.



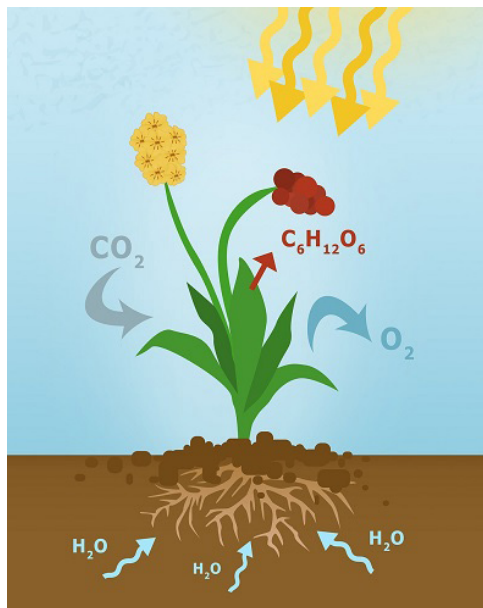
Source : C.E.A. – [Qu'est-ce que l'effet de serre?](#)

En l'absence de cet effet de serre, la température moyenne sur Terre serait de - 18 °C; il est heureux qu'il soit donc présent pour assurer actuellement une température de 15 °C. Mais l'activité humaine crée un déséquilibre débouchant sur le réchauffement climatique...

Sources : [Mieux capturer le principal gaz à effet de serre](#) – François Képès (Série Chimie et agriculture durable pour tous) – Mediachimie

[Chimie atmosphérique et climat](#) – M. Brasseur – Colloque Chimie et changement climatique – 18/11/2015

• Pourquoi le CO₂ est-il pourtant si important ?

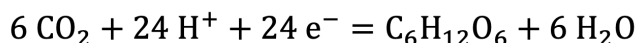
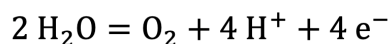


Le CO₂ est la source naturelle du carbone pour la flore et par ricochet pour la faune car les herbivores en consomment... et les carnivores se nourrissent de ces derniers... sans bien sûr oublier les humains en bout de chaîne !

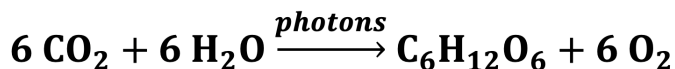
Les plantes et micro-organismes (microalgues, bactéries, etc.) absorbent le dioxyde de carbone atmosphérique et réalisent la **photosynthèse** en faisant réagir ce gaz avec de l'eau sous l'action de photons, quanta d'énergie associés aux ondes électromagnétiques du Soleil.

La photosynthèse est une réaction d'**oxydoréduction** lors de laquelle l'eau H₂O est oxydée en dioxygène O₂, molécule indispensable pour toute vie, et le dioxyde de carbone CO₂ est réduit en glucose C₆H₁₂O₆.

Voici les deux demi-équations électroniques mises en jeu :



Après échange de 24 électrons entre les réactifs, l'équation bilan de la photosynthèse est donc :



Le rendement de la photosynthèse est très faible car il ne dépasse pas 1 % pour les plantes et 4 % pour les micro-organismes. Ceci est dû à l'absorption partielle du spectre solaire par les pigments photosensibles et à une perte d'énergie de 30 % dans le mécanisme global. L'énergie apportée par les photons est convertie en énergie chimique lors de la création des nouvelles liaisons chimiques, dont les liaisons C-C. Il s'agit donc d'un **stockage chimique**.

Pour une puissance lumineuse de 100 000 TW, un térawatt correspondant à un milliard de kilowatt, par an reçue sur Terre, 100 TW sont stockés dans la biomasse. Alors que l'activité humaine consommait 17 TW en 2019, elle est estimée à 30 TW en 2050. Mais il n'est pas envisageable d'utiliser cette puissance disponible de la biomasse pour tous nos besoins énergétiques, mais seulement pour une petite part.

Le pétrole, le gaz naturel et le charbon sont actuellement les trois principales sources d'énergie utilisées dans le monde. Ils sont également sources de matières premières pour la création de molécules carbonées, ce qui constitue le domaine de la chimie organique au rôle essentiel dans notre quotidien (médicaments, polymères, fibres synthétiques, matériaux...). N'étant pas renouvelables, ces trois sources vont se tarir... or l'Homme, même s'il désire éliminer le plus vite possible ces combustibles fossiles pour la production d'énergie future, aura toujours besoin de sources carbonées pour produire des composés essentiels.

En plus de la biomasse, autre source carbonée, l'un des précurseurs envisagés est le dioxyde de carbone, gaz contenant l'élément carbone.

• Que faire de l'excès de CO₂ ?

Actuellement, les chimistes ont mis au point des techniques permettant de capturer les rejets industriels de CO₂.

Il s'agit principalement de réactions acido-basiques avec l'ammoniac NH₃.

Le CO₂ a d'innombrables applications industrielles, parmi lesquelles nous pouvons citer :

- Dans une station de production d'eau potable, le CO₂ est utilisé dans 99 % des cas dans les étapes de reminéralisation (ajout d'ions hydrogénocarbonates HCO₃⁻).
- Très souvent le CO₂, un acide faible, remplace les acides forts (acide sulfurique, acide chlorhydrique, etc.) pour neutraliser des bases pour des raisons de sécurité, d'absence de corrosion et économiques.
- À l'état liquide sous une pression de 70 bars à 30 °C, le CO₂ est un excellent solvant d'hydrocarbures.
- Au-delà de son point critique (voir deuxième lien des sources), le CO₂ super-critique a de très nombreuses applications en agroalimentaire (ôter la caféine du thé, etc.), en cosmétique, en pharmaceutique, etc.

Regardons maintenant du côté des activités de recherche récentes et focalisons-nous sur une d'entre elles.

Et pourquoi ne pas imiter la nature et réaliser une **photosynthèse artificielle** ?

Comme nous l'avons vu, le taux de dioxyde de carbone atmosphérique ne cesse d'augmenter. Or, il est exclu pour le moment de le capturer dans l'atmosphère car il y est en trop faible quantité. Il est plus raisonnable de privilégier sa **capture au niveau des zones de forte production** (cimenteries, usines sidérurgiques, centrales thermiques, etc.) pour le transformer ensuite en matières organiques facilement stockables et utiles pour l'Homme.

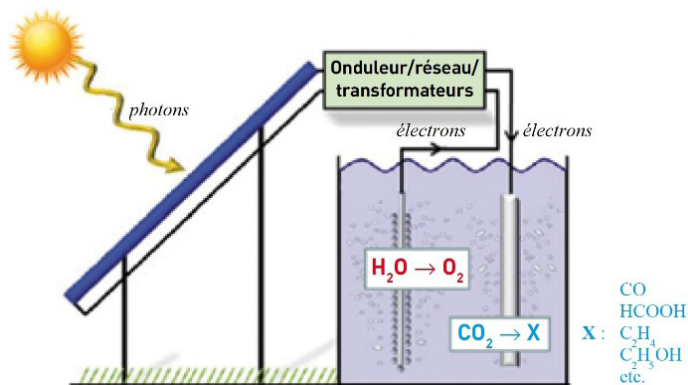
Actuellement, il n'est pas envisageable de réaliser la synthèse photochimique du glucose, molécule à six atomes de carbone, mais d'être plus modeste en réalisant celles de molécules contenant moins d'atomes de carbone.

Par contre, il s'agit toujours d'effectuer l'oxydation de l'eau en dioxygène ($2 \text{H}_2\text{O} = \text{O}_2 + 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^-$).

Parmi toutes les réductions possibles du CO₂, les molécules suivantes peuvent être produites parmi tant d'autres :

Nombre d'atomes de carbone	Demi-équation électronique	Molécule organique formée
1	$\text{CO}_2 + 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- = \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$	Monoxyde de carbone CO
	$\text{CO}_2 + 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- = \text{HCOOH}$	Acide méthanoïque HCOOH
2	$2 \text{CO}_2 + 12 \text{H}^+ + 12 \text{e}^- = \text{C}_2\text{H}_4 + 4 \text{H}_2\text{O}$	Éthène (éthylène) $\text{H}_2\text{C} = \text{CH}_2$
	$2 \text{CO}_2 + 12 \text{H}^+ + 12 \text{e}^- = \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 3 \text{H}_2\text{O}$	Éthanol C ₂ H ₅ OH

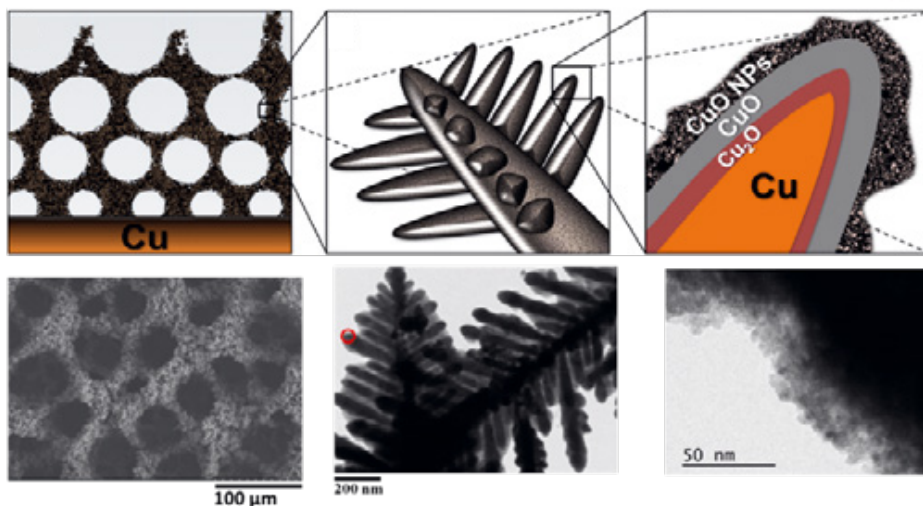
D'après le schéma de principe de la photosynthèse artificielle ci-contre, les électrons nécessaires sont apportés par des **panneaux photovoltaïques** alimentant un électrolyseur où ont lieu à l'anode l'oxydation de l'eau et à la cathode la réduction du dioxyde de carbone (en évitant celle des protons H⁺ en dihydrogène H₂). Il s'agit bien d'une **transformation forcée** car le dioxyde de carbone étant stable, il faut un apport d'énergie pour le transformer en d'autres molécules.



Toute demi-équation électronique paraît simple, mais par exemple, la formation en éthanol nécessite la rencontre entre deux molécules de dioxyde de carbone, douze protons et douze électrons ! Ce n'est pas si simple... d'où une cinétique lente. La recherche se focalise donc sur les **catalyseurs** nécessaires pour rendre tout cela possible et économiquement viable. Il faut en plus qu'ils permettent une **grande sélectivité** pour ne produire que des molécules d'intérêt. Seul le métal cuivre, heureusement disponible en grande quantité, permet la création de liaisons carbone-carbone (C-C), indispensables pour la formation d'hydrocarbures (éthanol, etc.) donc le **catalyseur à la cathode, lieu de la réduction du CO₂, ne peut être qu'à base de cuivre** si on désire des hydrocarbures avec au moins deux atomes de carbone !

Par chance, un catalyseur à base de cuivre permet d'accélérer aussi bien la réduction du dioxyde de carbone CO₂ à la cathode que l'oxydation de l'eau à l'anode.

Voici sa composition et sa structure :



Cela ressemble à des feuilles, mais en fait, il s'agit de « dendrites » permettant d'obtenir beaucoup de sites actifs sur très peu de surface. Ces dendrites sont constituées d'une superposition de couches d'oxydes de cuivre sur un support de cuivre. De plus, la porosité facilite le transport des réactifs. En phase liquide, il ne se forme que de l'éthanol au niveau de la cathode. Cela laisse donc entrevoir la production de ce composé organique à plus grande échelle en passant de la paille à l'industrie...

Actuellement, un autre catalyseur cathodique est à l'étude. Il est constitué d'atomes de cuivre isolés sur une structure conductrice en graphène (monocouche cristalline formée d'atomes de carbone). Ce dernier permet d'atteindre un rendement de 2,3 % pour la formation de l'éthène. C'est déjà un très beau rendement si on le compare à ceux des plantes (< 1 %) ou des microorganismes (4 %) ! Donc tout espoir est permis...

Sources : [Le dioxyde de carbone, la molécule clé de la chimie du développement durable](#) – Mediachimie (collectif d'auteurs)

[Les fluides supercritiques à votre service](#) – Stéphane Sarrade et Karima Benaissi – Mediachimie

[Que faire du CO₂ ? De la chimie!](#) – M. Fontecave – Colloque Chimie et changement climatique – 18/11/2015

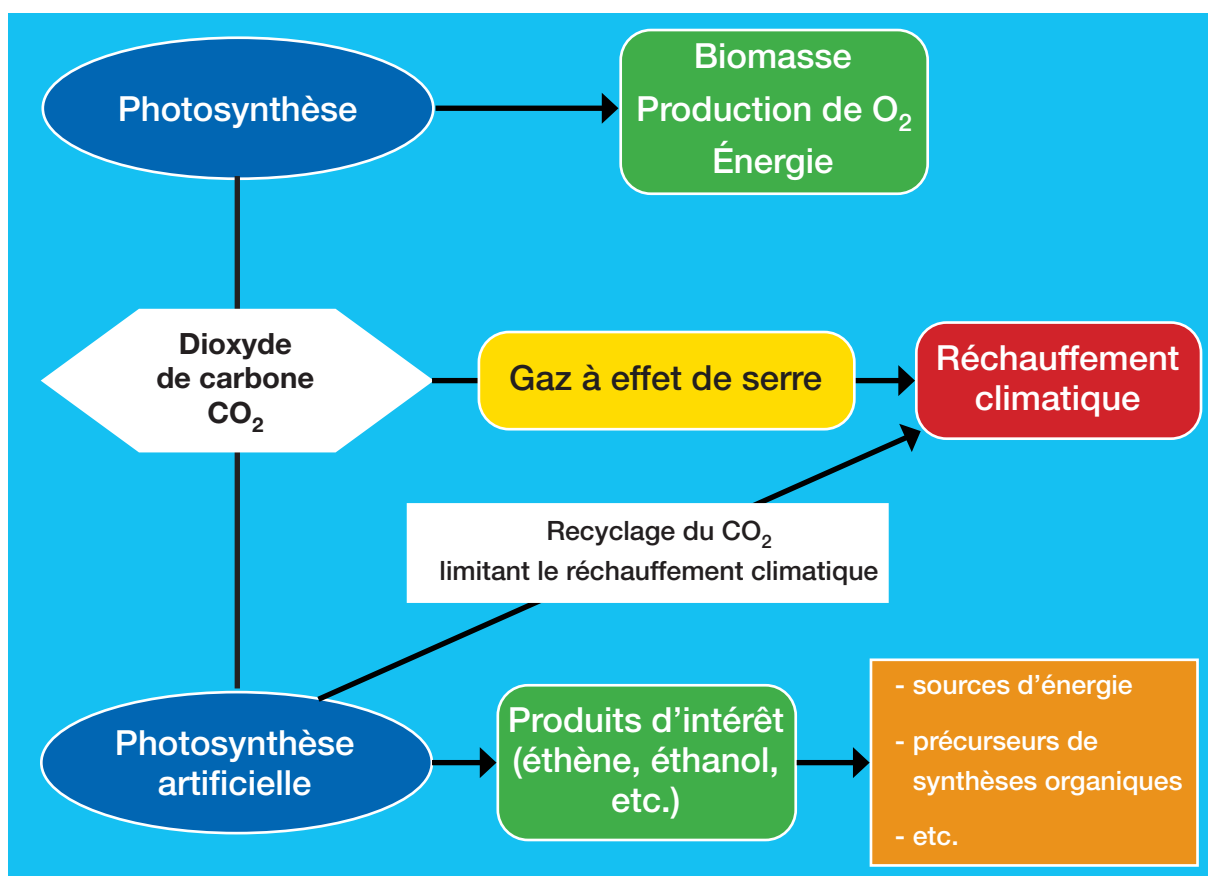
[Photosynthèse artificielle : du CO₂ aux carburants solaires](#) – M. Fontecave – Colloque Chimie et lumière – 26/02/2020

Vidéo « [Vive le CO₂!](#) » – Des idées plein la Tech -- Mediachimie

Conclusion

La température sur Terre ne cesse d'augmenter, lentement mais sûrement. Le niveau des mers s'est élevé de 20 centimètres entre 1901 et 2018 et la banquise en Arctique est à son plus bas niveau depuis près de deux siècles. Pour lutter contre le réchauffement climatique, les scientifiques, avec parmi eux les chimistes, sont largement mobilisés. Un des gaz à effet de serre, le CO₂, est mis au banc des accusés. Au plus vite, il faut donc être capable de capturer ses émissions liées aux industries lourdes et, si possible, comme nous venons de le voir de recycler ce CO₂ en produits chimiques d'intérêt. Mais il n'y a pas de vie sans CO₂... et il sera sans doute à l'avenir une des sources de carbone après la disparition des combustibles fossiles. Il n'a donc pas fini de faire parler de lui !

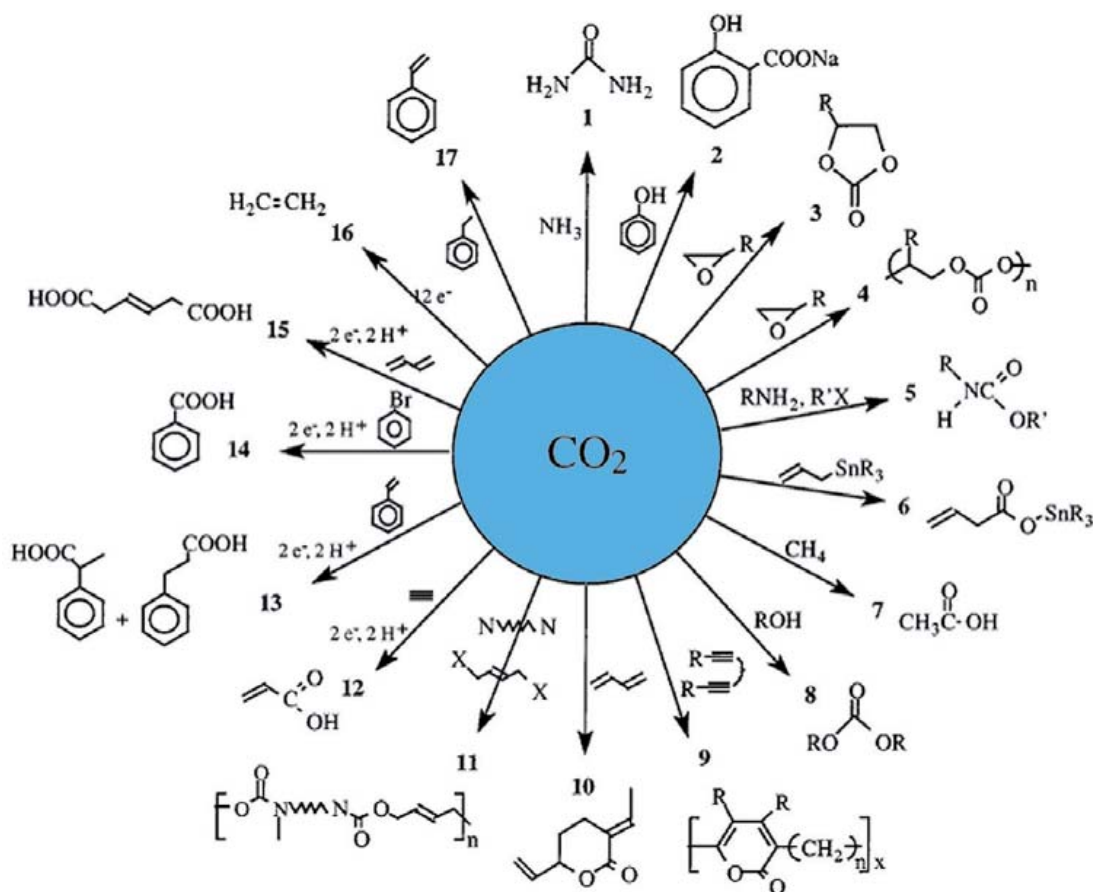
En résumé



Pour aller plus loin :

Pour prendre conscience de l'ampleur du sujet et son avenir, vous pourrez consulter les ressources suivantes :

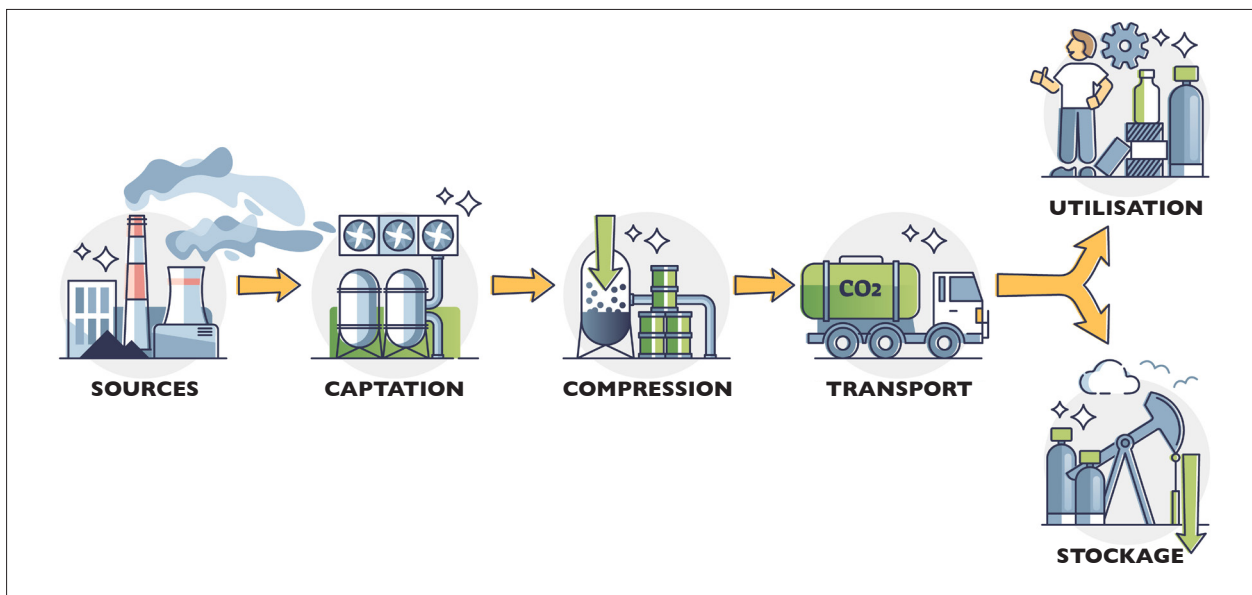
- [Rapports du G.I.E.C.](#)
- Colloque « [Chimie et lumière](#) » – 26/02/2020 – Maison de la Chimie
- Colloque « [Chimie et changement climatique](#) » – 18/11/2015 – Maison de la Chimie
- [Le dioxyde de carbone, la molécule-clé de la chimie du développement durable](#) – Mediachimie
- [Technologies chimiques émergentes pour la valorisation du dioxyde de carbone](#), cours du Collège de France de Marc Fontecave – 05/03/2014
- [La biomasse, matière renouvelable d'avenir](#) – M. Rous – Colloque Chimie et enjeux énergétiques – 14/11/2012
- Les Saventuriers – [Nom de code : CO₂](#) – C.E.A.



De nombreuses possibilités de réactions chimiques utilisant le CO₂ comme matière première
 © Conférence du Professeur Xianhong Wang EMRS/STOA, 22 mars 2011

LE PROJET PROFESSIONNEL

Les chimistes sont en première ligne pour relever le défi majeur qu'est la lutte contre le réchauffement climatique, que ce soit dans le captage du CO₂, le piégeage et son stockage et dans son utilisation en tant que matière première pour la chimie organique.



De la capture de CO₂ à l'enfouissement ou l'utilisation © AdobeStock

Pour cette dernière, en dehors de la photosynthèse artificielle, d'autres approches sont possibles mettant à réagir le dioxyde de carbone avec le dihydrogène. Il faut donc aussi que celui-ci soit vert¹ pour que cette démarche soit cohérente.

Les étapes de captage et stockage nécessitent de créer ou d'améliorer des matériaux permettant de fixer de façon sélective et réversible le CO₂ pour procéder ultérieurement à son stockage.

De BAC à BAC + 8, les chimistes interviennent tout au long de la chaîne qui va de la recherche à la production.

En recherche et développement pour la mise au point de nouvelles molécules, de nouvelles réactions, de nouveaux catalyseurs, de nouveaux matériaux adaptés et en optimisant procédés et production avec pour résultat de meilleurs rendements et des consommations énergétiques moindres. Les différents spécialistes de la chimie organique, minérale, des matériaux... sont impliqués dans ces défis.

Ci-après, des compléments d'informations sur les définitions de la [recherche et développement](#), des [procédés](#) et de la [production](#).

Des fiches métiers et les voies de formation qui y mènent sont présentées dans [l'espace métiers du site mediachimie](#), dont certaines reprises ci-dessous :

- [Ingénieur de recherche / Chercheur](#) (H/F), [Technicien chimiste](#) (H/F)

1. Voir la ressource : [Qu'est-ce l'hydrogène vert ?](#)

- [Technicien Génie des procédés / Génie chimique \(H/F\)](#) et [Ingénieur génie des procédés \(H/F\)](#) (photo ci-contre)
- [Responsable de production / Directeur de fabrication \(H/F\)](#)
- [Technicien environnement \(H/F\)](#)
- [Technicien \(H/F\) matériaux](#) et [Ingénieur \(H/F\) matériaux](#)
- Formation en chimie des polymères et des matériaux à l'[ECPM](#)
- Spécialisation en génie des procédés à l'[ENSIC](#) et matériaux et génie des procédés à l'[ENSIACET](#)



Ingénieur procédés © Usine Nouvelle

Au niveau doctorat, l'expertise dans un domaine particulier est bien entendu la règle.

Ressources proposées en collaboration avec les équipes métiers/orientation de la Maison de la Chimie : Françoise Brénon et Gérard Roussel.