

Introduction

Dans le World Energy Outlook 2021, pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, l'Agence internationale de l'énergie a chiffré les volumes de CO₂ qu'il va falloir capter et stocker/valoriser. Le besoin est estimé à 4 GtCO₂/an d'ici à 2035 et à 7,6 GtCO₂/an d'ici à 2050. Quelles sont les méthodes les plus avancées pour réutiliser et valoriser le CO₂ afin d'atteindre ces objectifs ?

Familles de capture

- **Postcombustion** : captage du CO₂ en sortie d'un flux de gaz
- **Précombustion** : oxydation préalable du combustible pour libérer H₂ et CO₂ concentrés.
- **Oxycombustion** : combustion avec O₂ (et non de l'air) afin d'avoir un flux CO₂ + H₂O

Méthodes de capture

- Absorption
- Membranes
- Adsorption
- Combustion en boucle chimique
- Stockage par minéralisation
- Distillation cryogénique
- ...

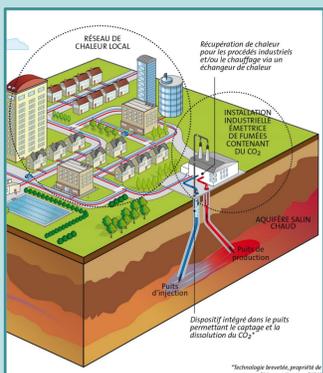
Qualités de CO₂



VOIES DIRECTES

Géothermie

Concept : la récupération assistée de la chaleur en géothermie profonde consiste à injecter de l'eau froide à haute pression dans la formation géologique, pour réactiver les boucles de convection, ramenant la chaleur des profondeurs vers la surface. Le CO₂ pourrait remplacer l'eau comme fluide de travail.



Qualité du CO₂ nécessaire : > 95%
Etat de développement : R&D
Energie

Récupération Assistée des Hydrocarbures

Concept : la récupération assistée d'hydrocarbures (RAH) est l'ensemble des techniques destinées à accroître les quantités d'hydrocarbures extraites d'un gisement. En utilisant du CO₂ à l'état supercritique, la RAH permet d'augmenter la récupération d'hydrocarbures de 7 à 23 %, ce qui en fait une opération économiquement intéressante.

Qualité du CO₂ nécessaire : > 85%
Etat de développement : industrialisé
Energie

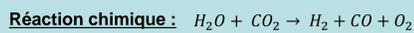
Etat des lieux :
En 2016, la consommation de CO₂ pour la RAH était de l'ordre de 65 à 72 Mt/an. Le potentiel d'utilisation du CO₂ en 2050 au niveau mondial est estimé entre :
• 16 et 22 GtCO₂ pour la récupération de pétrole (EOR). L'amélioration des techniques de récupération offre un potentiel de récupération de pétrole entre 67 et 137 milliards de barils et celui du CO₂ capté et stocké de l'ordre de 20 à 45 MtCO₂
• 160 et 390 GtCO₂ pour la récupération de gaz naturel (EGS)

Propriété/état	Utilisations
CO ₂ supercritique/ Solvant	Extraction, séparation, réaction, formulation, stérilisation, nettoyage
Fluide caloporteur	Réfrigérant, hydrate de CO ₂ , nettoyage, cryo-broyage
Gaz	Conditionnement et gazéification alimentaire, agent gonflant, séchage, technique de moussage
Propriétés acido-basiques	Agent neutralisant du pH, traitement des eaux
Propriétés minérales	Reminéralisation de l'eau associée à l'injection des chaux
Inertage	Viticulture, carboxythérapie

VOIES CHIMIQUES

Electrolyse à haute température

Concept : l'eau et le dioxyde de carbone sont tous deux électrolysés à haute température (500°C à 800 °C) afin de produire du syngaz (CO + H₂)



Qualité du CO₂ nécessaire : CO₂ pur
Etat de développement : R&D
Energie

Exemple de projet :

Au Centre énergétique et procédés des Mines ParisTech, l'équipe de recherche travaille sur la coélectrolyse de l'eau et du CO₂ avec notamment une évaluation technico-économique des SOEC (Solid Oxid Electrolysis Cells) dans l'objectif d'obtenir du gaz de synthèse. Une simulation du procédé de la technologie SOEC montre la possibilité d'atteindre un coût de production de 0,85 €/kg d'éthanol (pour une production annuelle de 165 kt).

Reformage à sec et variantes

Concept : réaction du dioxyde de carbone avec du méthane pour produire du syngaz



Autres variantes : reformage avec de l'eau et du dioxyde de carbone, tri-reformage

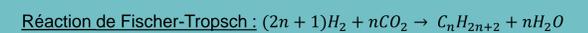
Qualité du CO₂ nécessaire : A sec : CO₂ pur
Etat de développement : A sec : R&D
Avec de l'eau : industrialisé
Energie

Exemple de projet :

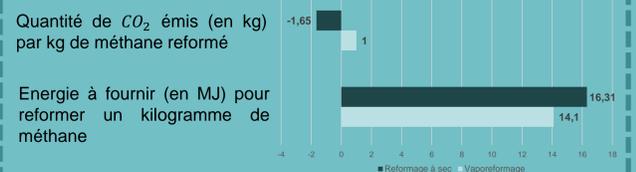
• Il existe en Iran une usine de production de méthanol à partir de gaz de synthèse avec la méthode de reformage avec de l'eau et du dioxyde de carbone. Le CO₂ utilisé est capté d'une usine d'ammoniac voisine. Cette unité, démarrée en 2004, produit 3,03 kt de méthanol par jour.
• Le « Mindrex Syngas System » est un système de reformage sec pour produire un gaz de composition de 10 à 20% de CO et de 80 à 90% de H₂, ensuite utilisé pour l'obtention du fer par la réduction d'oxyde de fer.

Le syngaz, pour quoi faire ?

Le gaz de synthèse produit peut être converti en carburants de synthèse (essence, diesel, éthanol...) via les réactions de synthèse de Fischer-Tropsch, en éthanol ou en méthanol. L'ajout de l'éthanol à l'essence réduit les émissions des gaz à effets de serre ainsi que d'autres polluants en garantissant le même potentiel énergétique.

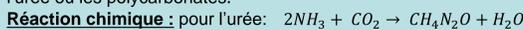


Comparaison vaporeformage et reformage à sec



Synthèse organique

Concept : utilisation du CO₂ dans les synthèses de carboxylation en chimie organique pour rentrer dans la composition de nouveaux matériaux tels que certains polymères ou pour produire de nouvelles molécules telles que l'urée ou les polycarbonates.



Qualité du CO₂ nécessaire : Urée : industrielle
Autre : CO₂ pur
Etat de développement : Urée, acide salicylique : industrialisé
Polymère : R&D
Chimie

Etat des lieux :

Via l'urée, 135 à 138 Mt de CO₂ sont valorisées par an. Les améliorations de ces procédés portent notamment sur l'utilisation de CO₂ dilué et contenant des impuretés.
Le bilan carbone est plutôt défavorable : la synthèse de l'urée génère plus de 2 tonnes de CO₂ par tonne de CO₂ utilisée. Pour la production de polymères, ce ratio monte à 5,5.

Hydrogénation

Concept : addition de molécules de dihydrogène (obtenues par électrolyse de l'eau) sur du CO₂ pour obtenir des produits à valeurs énergétiques (méthanol, méthane, CO destiné à être transformé en biocarburant...) ou chimiques (acide formique, acide acétique, méthanol...).

Qualité du CO₂ nécessaire : CO₂ pur
Etat de développement : Préindustriel
Energie

Exemple de projet :

L'usine George Olah en Islande, mise en service en 2011, utilise du CO₂ purifié provenant d'une centrale géothermale. La production s'élève à environ 2 millions de litres de méthanol renouvelable par an. La capacité de production envisagée est de 5 millions de litres par an pour une consommation de CO₂ de 4.500 t/an. Les futures installations à l'échelle commerciale pourront produire entre 50 et 100 Mt de méthanol/an pour une consommation d'environ 45 kt de CO₂.

Thermochimie

Concept : réaliser des réactions chimiques à hautes températures pour transformer le CO₂ en monoxyde de carbone CO, notamment en utilisant la chaleur solaire obtenue par des miroirs réfléchissants.



Qualité du CO₂ nécessaire : CO₂ pur
Etat de développement : pilote
Energie

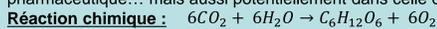
Exemple de projet :

Situé dans les Pyrénées Orientales à Font-Romeu, le four solaire d'Odeillo est l'un des plus grands au monde. La puissance de ce four est de 1 MW et les températures maximales obtenues sont supérieures à 3.000°C. Ce type d'installation destiné à la recherche est utilisé pour faire fonctionner un cycle thermochimique comme celui à base d'oxyde de zinc qui est dissocié en Zn gazeux et O₂ à environ 1.600°C. Le Zn métal récupéré en sortie sous forme de particules fines permet de dissocier le CO₂ à environ 300-400°C.

VOIES BIOLOGIQUES

Culture de microalgues

Concept : les algues et microalgues sont des organismes qui, grâce à leur activité photosynthétique, utilisent le CO₂ en présence de lumière. La biomasse générée par ce processus aboutit à la production de protéines, de lipides et de cellulose, valorisables dans les filières alimentaire, pharmaceutique... mais aussi potentiellement dans celle des algocarburants.



Qualité du CO₂ nécessaire : industrielle
Etat de développement : Industrialisé
Alimentation Chimie Energie

Exemple de projet :

Le pilote Seabiotic en Israël est une unité de culture de microalgues en bassin ouvert utilisant des gaz de fumées issus des cheminées de combustion. Les gaz utilisés sont préalablement traités pour éliminer les composés soufrés. La productivité moyenne obtenue est de 20 g/m²/jour. Les algues sont ensuite congelées et envoyées par bateau aux États-Unis. La société Inventure se charge d'extraire les lipides et la cellulose pour la production d'algocarburant.

Biocatalyse

Concept : la biocatalyse utilise des biocatalyseurs comme des enzymes isolées ou maintenues au sein du micro-organisme d'origine afin de stimuler les réactions chimiques, en imitant les processus naturels. Il existe, en effet, dans la nature, certaines enzymes (ou voies enzymatiques) qui convertissent le CO₂ en molécules d'intérêt (lipides et composés oxygénés) comme l'anhydrase carbonique (AC) et la RuBisCO.

Qualité du CO₂ nécessaire : CO₂ pur
Etat de développement : R&D
Energie

Exemple de projet :

Le projet CarBioRed vise à développer de nouveaux catalyseurs efficaces et sélectifs pour l'électroréduction de CO₂ à base de métaux non nobles donc abondants. Le choix des métaux et des ligands constituant les catalyseurs étudiés repose notamment sur une approche bioinspirée des métalloenzymes transformant le CO₂. Ils ont ainsi obtenu des catalyseurs capables de réduire le CO₂ en CO, acide formique ou formaldéhyde. Les projets consacrés à la biocatalyse du CO₂ sont rares.

Minéralisation

Concept : la minéralisation du CO₂ consiste en une réaction entre le CO₂ et des oxydes de calcium ou de magnésium pour former des carbonates (MCO₃). Les carbonates sont des produits inertes et stables. Ils constituent la forme thermodynamique la plus stable du CO₂. On distingue deux types de minéralisation :

- la minéralisation in-situ : le CO₂ est injecté dans des formations géologiques. Ayant lieu en sous-sol, cette minéralisation s'apparente à une opération de stockage géologique.
- la minéralisation ex-situ : la minéralisation a lieu dans une usine de transformation dédiée. Les produits obtenus peuvent être valorisés : calcaire, ciment, matériaux de construction... La principale application de la minéralisation ex-situ est la formation de calcaire obtenu par réaction entre le CO₂ et la chaux éteinte (Ca(OH)₂) avec de l'eau comme coproduit.

Qualité du CO₂ nécessaire : Industrielle
Etat de développement : industriel
Réaction chimique : CO₂ + oxyde métallique (MO) → MCO₃ + chaleur avec M métal contenant du Mg, du Ca, du Fe...

