

SEQUESTRATION DU CO2

Le gaz carbonique (CO₂) produit par la combustion des combustibles fossiles est considéré comme le principal responsable de l'élévation de température moyenne de l'atmosphère par l'accroissement de « l'effet de serre » qu'il engendre.

Sur quoi se fonde ce constat ? Comment influencer sur le cours des choses et notamment, peut-on réduire les quantités de CO₂ de l'atmosphère en le piégeant et en l'isolant (en le séquestrant)?

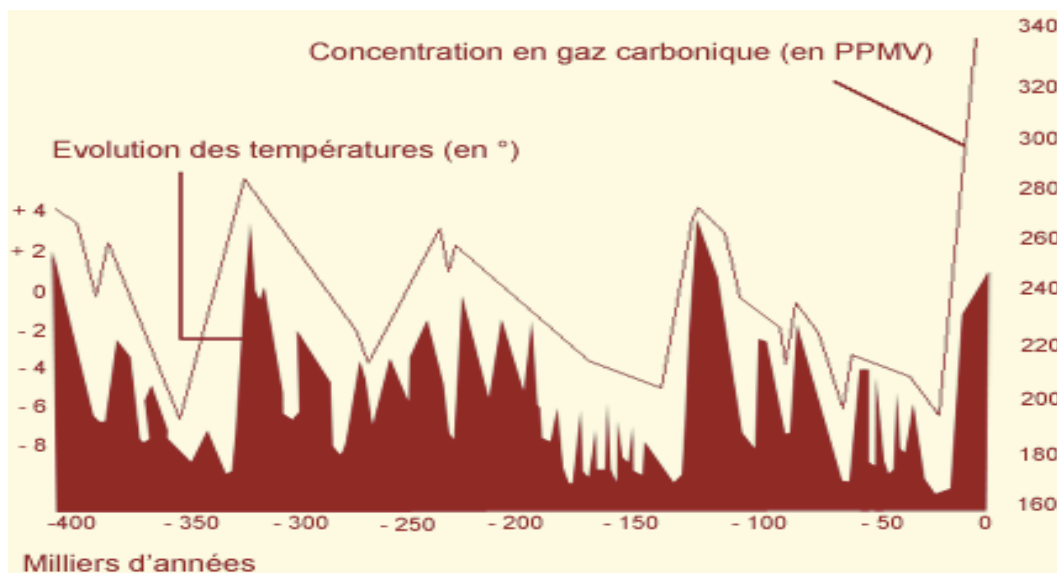
Cette note rassemble quelques éléments d'information pour mieux cerner cette question.

(Version complétée par rapport à la version précédente publiée dans « Les Plumes » de Juin 2008)

1-CO₂ et changement climatique

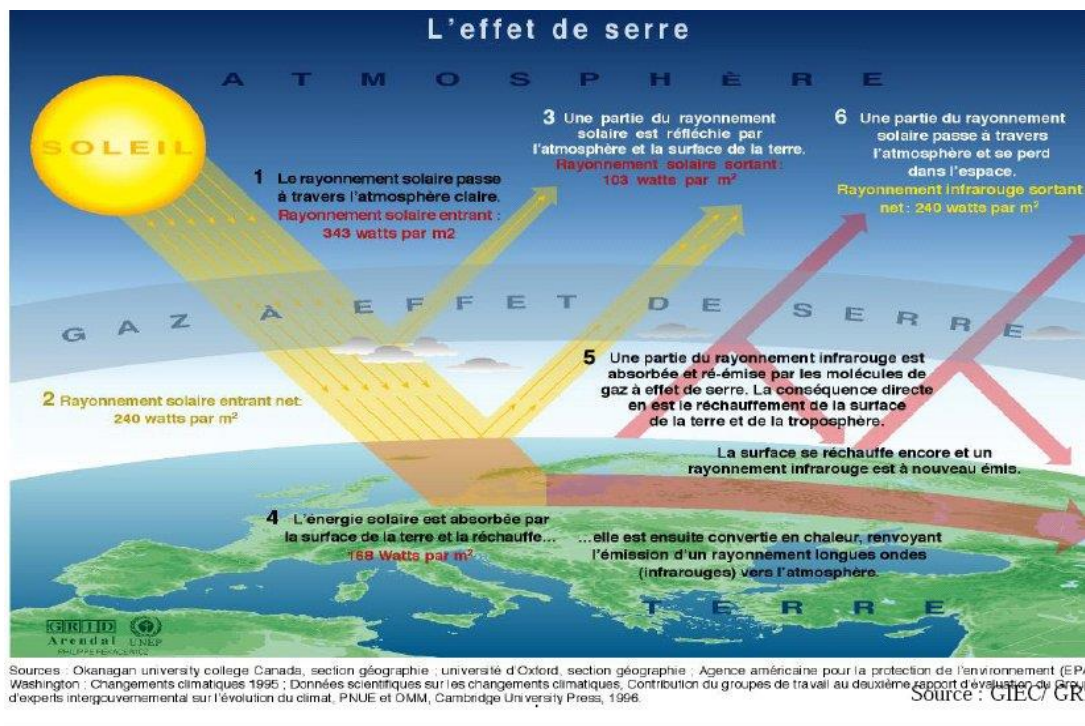
Les observations réalisées sur une très longue période de temps montrent que la température moyenne sur la Terre a augmenté d'une manière significative depuis le début de l'ère industrielle et de façon accélérée pendant les dernières décennies. D'autres phénomènes ont précédemment causé des variations de température dans l'histoire de la Terre (influence de l'activité solaire, évolution du positionnement de la Terre par rapport au Soleil...). Certains pensent qu'ils peuvent à nouveau être la cause de cette élévation.

Mais la vitesse d'accroissement de température constaté depuis 150ans semble dépasser celle qu'on pourrait attendre de tels évènements.



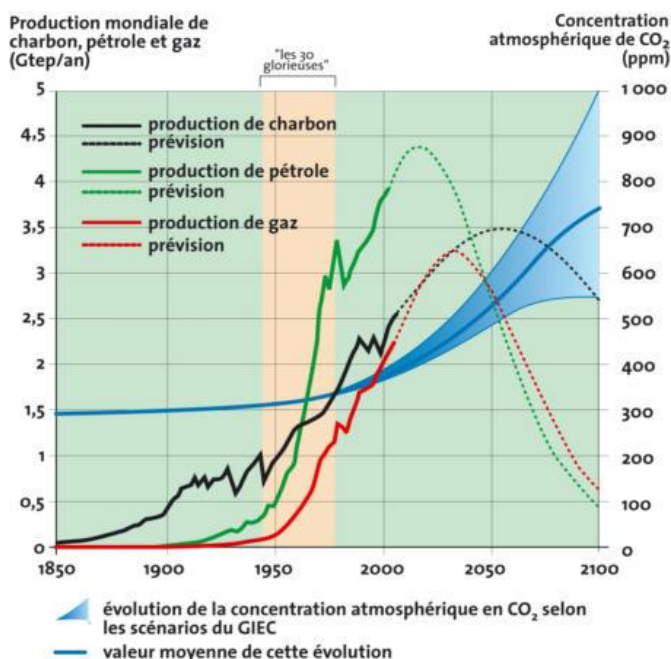
En revanche, les études et modélisations permettent d'établir un lien entre ce « réchauffement climatique » constaté et l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre (GES) mesurée dans notre atmosphère.

Les GES ont globalement pour effet de réduire la capacité de la Terre à renvoyer vers l'espace une partie de l'énergie qu'elle reçoit du Soleil. Pour vaincre cette résistance plus forte, la température de l'atmosphère doit s'élever : c'est ce qu'on appelle l'effet de serre.



L'effet de serre est indispensable au maintien sur Terre d'une température permettant la vie. C'est son accroissement excessif qui peut devenir néfaste.

Parmi les principaux GES présents naturellement dans l'atmosphère en équilibre avec les autres constituants de la biosphère on trouve la vapeur d'eau, le gaz carbonique et le méthane.



Le gaz carbonique est le produit de la combustion ou de la décomposition des produits contenant du carbone.

Les sources potentielles de CO₂ sont donc très nombreuses. Les combustibles fossiles en sont une importante mais il faut aussi considérer tous les composants du règne animal et du règne végétal y compris la matière organique en décomposition dans le sous-sol (humus) et les sédiments accumulés au fond des océans.

Les absorbeurs de CO₂ sont en compétition avec les sources pour maintenir l'équilibre que nous connaissons : l'eau des océans dissout une partie du CO₂ (d'autant mieux qu'elle est froide), les plantes croissent grâce à la photosynthèse qui utilise le CO₂ pour bâtir le bois, les feuilles...

Depuis des millions d'années ce cycle naturel est équilibré. Mais depuis le début de l'ère industrielle (en gros depuis 150ans), plusieurs perturbations sont intervenues qui contribuent à déplacer cet équilibre :

- rejets dans l'atmosphère d'énormes quantités de CO₂ par combustion de combustibles fossiles (du Carbone vieux de plusieurs centaines de millions d'années stocké dans le sous-sol sous forme de charbon, de pétrole ou de gaz)
- rejets dans l'atmosphère d'importantes quantités de CO₂ par combustion du bois (déforestation pour augmenter les surfaces cultivables et pour utilisation du bois comme source d'énergie ou matériau de construction)
- rejets dans l'atmosphère de CO₂ et de méthane résultant de la consommation d'une partie du stock de matières organiques des sols (déforestation, augmentation des activités agricoles)

Ainsi sur cette période la concentration du CO₂ dans l'atmosphère a augmenté de plus de 30%, celle du méthane a plus que doublé.

La poursuite dans les mêmes conditions des activités humaines qui sont en augmentation constante conduirait rapidement (quelques décennies selon certains) à des modifications climatiques importantes pouvant modifier considérablement l'avenir de la planète.

C'est la raison pour laquelle la prise de conscience qui est en train de se faire conduit les gouvernements responsables à organiser des actions permettant de limiter l'incidence des activités industrielles sur l'atmosphère : recherche de moyens de production d'énergie moins producteurs d'oxyde de carbone (énergies dites renouvelables, mais aussi nucléaire), recherche d'économies d'énergie (isolation des habitations, véhicules économes), et promotion de comportements différents (transports en commun, limitation des températures dans les habitations...).

On réfléchit par ailleurs, aux moyens de piéger une partie du CO₂ de l'atmosphère sous une forme durablement stable. Augmenter le stock de biomasse (les forêts, le plancton...) est une voie. Réformer certaines pratiques agricoles pour favoriser le maintien voire accroître le stock de matière organique des sols en est une autre mais d'application limitée.

Par ailleurs, des études et des essais sont réalisés pour mettre au point les moyens de capter le CO₂ et l'isoler de façon stable de l'atmosphère : le séquestrer. On parle de procédés de Séquestration du CO₂

2 Où et comment piéger le CO2 ?

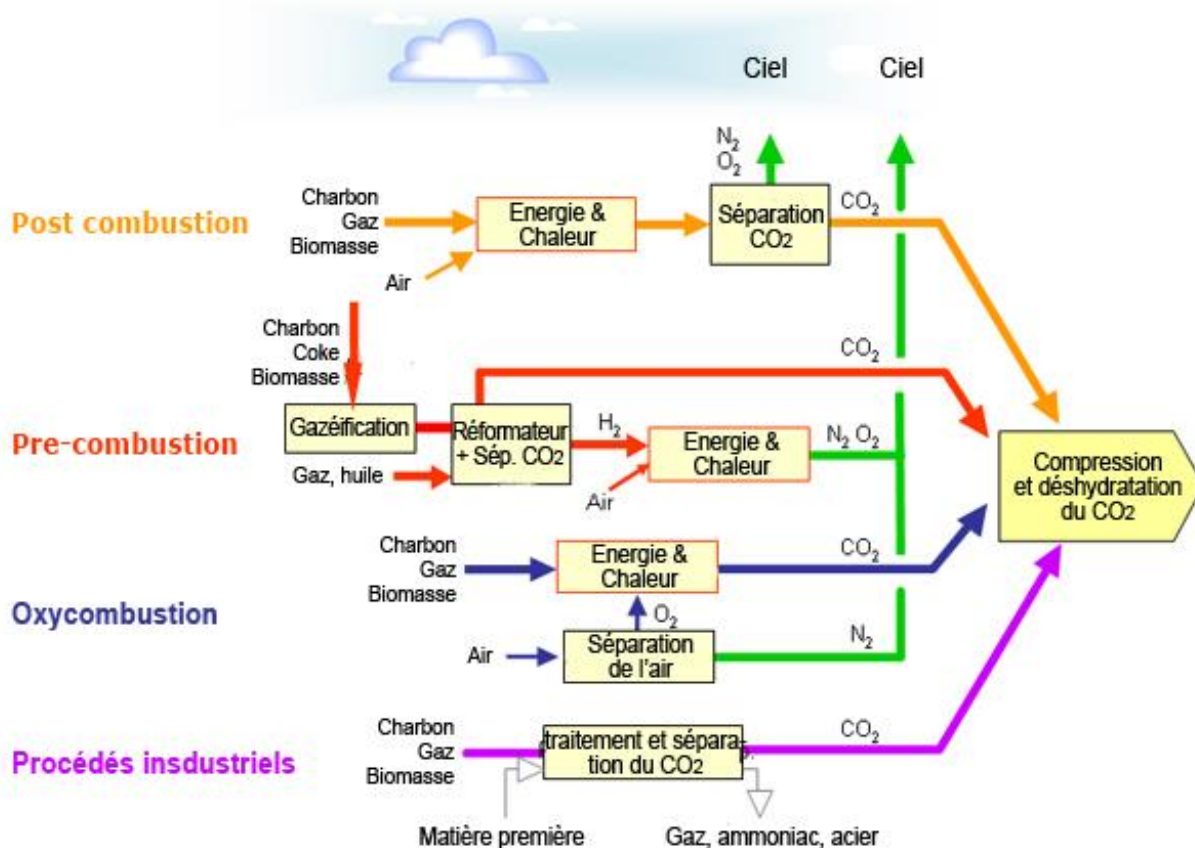
Le piégeage du CO2 se fera en priorité, bien évidemment, là où c'est le plus efficace et le plus facile donc là où il se trouve en grandes quantités et à la concentration la plus forte possible : dans les gaz de combustion des centrales thermiques, qu'elles soient exploitées pour produire de l'électricité ou seulement de la chaleur alimentant des procédés (raffineries de pétrole par exemple), et des usines sidérurgiques. Ces producteurs sont à l'origine de 50% des rejets dans l'atmosphère du CO2 issu de combustibles fossiles, soit environ 25% du rejet de gaz à effet de serre actuel.

Les quantités en jeu sont énormes : un cycle combiné à gaz de 800MW fonctionnant en base, c'est-à-dire en continu, émettra 2,4 millions de tonnes de CO2 par an (4,9 s'il fonctionne au charbon pulvérisé)

2-1 Trois filières de captage

Capter le CO2 veut dire le séparer d'autres composants avec lesquels il est mélangé. Trois filières de captage existent aujourd'hui.

Options techniques pour le captage du CO2



La première est la dé-carbonisation des fumées. Le constituant principal des fumées est l'azote, qui en représente typiquement 75% en volume, en mélange avec 13% de CO₂, 8% H₂O et 3% O₂. Pour une centrale à charbon, l'opération consiste à isoler le CO₂ en injectant dans les fumées une molécule de lavage (un solvant typiquement une amine) qui avale le CO₂ et pas l'azote, qui relâche ce CO₂ quand elle est chauffée et qui est ensuite recyclée pour rejouer son rôle de «mangeur» de CO₂. L'opération consomme de la chaleur, ce qui implique une pénalité énergétique sur les performances du système.

La deuxième est la dé-carbonisation du combustible (le charbon, le pétrole et le gaz naturel) soit par gazéification, soit par reformage. L'hydrocarbure étant composé de carbone et d'hydrogène, il s'agit de libérer l'hydrogène et de conserver le carbone sous forme de CO₂. La formule chimique de l'opération de reformage du gaz naturel est globalement résumée par une réaction simple : $\text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2$. Un procédé qui serait donc en même temps une source d'hydrogène, lequel peut aussi être utilisé dans les piles à combustible, pour le transport par exemple. Une autre source possible d'hydrogène sans carbone est l'électrolyse de l'eau, mais la condition est que celle-ci soit opérée par une source d'électricité elle-même sans carbone, soit le nucléaire ou les renouvelables.

La troisième est l'oxycombustion. Ici, on intervient en amont de la combustion en injectant de l'oxygène pur au lieu d'air comme comburant. La réaction s'écrit pour du méthane par exemple: $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$. Pour capter le CO₂, il suffit alors de condenser l'eau par refroidissement du mélange. L'avantage de cette troisième voie de dé-carbonisation est qu'elle repose sur une technologie éprouvée de longue date, celle la séparation de l'oxygène de l'air par cryogénie (société Air Liquide. C'est aussi la plus efficace puisque, contrairement aux deux premières options de captage qui ne retiennent que environ 90 % du carbone, l'oxycombustion en retient pratiquement 100 %.

Le flux de CO₂ recueilli est plus ou moins pur selon le combustible et le procédé de captage utilisés : le CO₂ capturé contiendra des contaminants comme SO₂, NOX, H₂S, N₂, O₂, Ar, H₂O, etc. Leur concentration pourra atteindre 0,2% à 10% en volume.

Ces procédés fonctionnent, des installations pilotes à grande échelle ont été construites et sont exploitées. Il s'agit maintenant de développer ces procédés au stade industriel :

- capacité des installations et fiabilité du procédé sur des durées suffisantes
- réduction des coûts de fonctionnement par amélioration de l'efficacité énergétique : actuellement on considère qu'il en coûterait entre 20% et 40% de l'énergie produite pour traiter les rejets d'une centrale thermique
- choix des solutions d'élimination

2-2 Transport

Le CO₂ capturé est ensuite comprimé pour être stocké puis transporté.

Le transport du CO₂ ne pose pas de problèmes nouveaux par rapport au transport du gaz naturel : les mêmes moyens (gazoducs principalement, mais aussi navires de type méthaniers ou encore citernes ferroviaires) peuvent transporter le CO₂ comprimé.

3 Comment séquestrer définitivement le CO₂ ?

Pour isoler de façon durable le CO₂ plusieurs voies sont envisagées :

- la minéralisation
- l'injection du CO₂ dans des formations géologiques profondes
- la dissolution du CO₂ dans des aquifères salins

3-1) Minéralisation du CO₂

Certains minéraux (à base de calcium ou de magnésium, par exemple) peuvent se combiner par réaction chimique avec le CO₂ : c'est ainsi notamment que s'est formé le calcaire de notre sous-sol.

Malheureusement, les cinétiques de réaction sont lentes. Il est donc nécessaire, pour limiter le volume des réacteurs où sont effectuées ces réactions chimiques, de broyer finement les minéraux utilisés pour augmenter la surface d'échange entre le gaz et le solide.

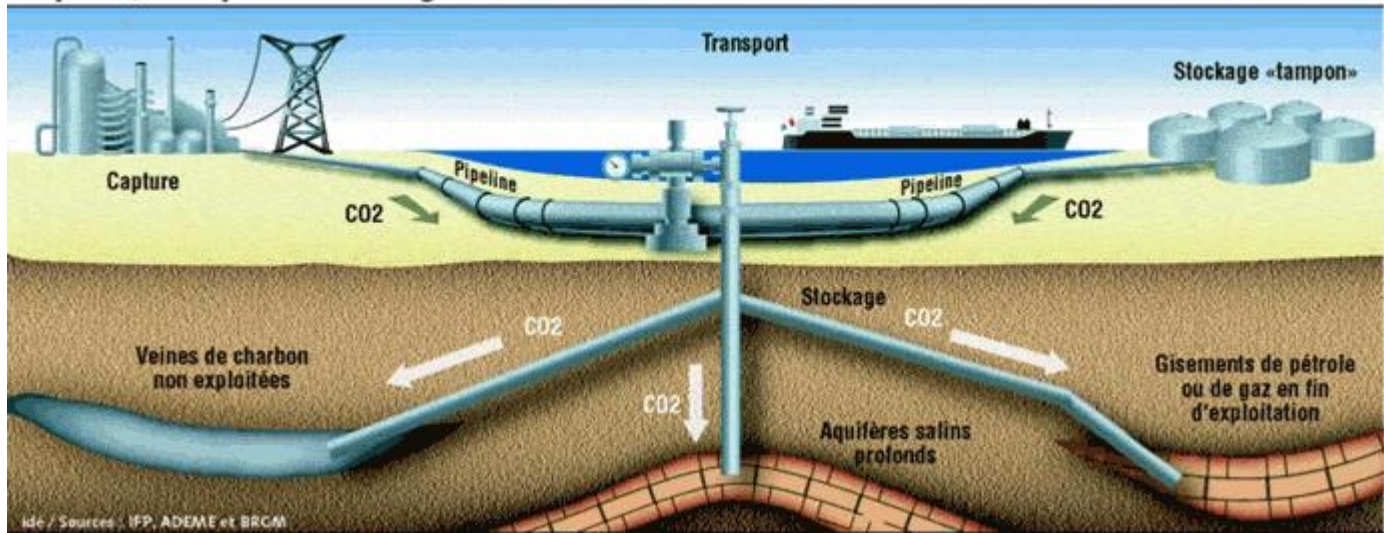
Dans ces conditions, les quantités en jeu étant considérables, l'énergie et l'espace nécessaires pour assurer le traitement, le transport et l'élimination des produits constituent un handicap pour la mise en œuvre de cette solution.

Cette voie semble donc peu favorable.

3-2) Injection dans des formations géologiques

De nombreux sites géologiques sont susceptibles d'accueillir et de retenir localement et de façon durable le CO₂. Ils sont largement répandus sur la surface du globe et de caractéristiques et capacités variables.

Capture, transport et stockage du CO₂



- le CO₂ peut théoriquement être stocké comme l'est aujourd'hui le gaz naturel dans des réservoirs étanches créés au sein de couches de sel souterraines. Cette technologie existe. On peut toutefois craindre que la fermeture étanche vis-à-vis de gaz sous pression, nécessaire à la sûreté de ce type de stockage, ne puisse être garantie sur des périodes extrêmement longues.
- le CO₂ peut être injecté dans des gisements épuisés d'hydrocarbures. Injecté sous pression il remplace le pétrole ou le gaz dans le milieu poreux qui constitue le gisement et y reste piégé.

Cette solution apparaît d'autant plus intéressante qu'elle permet de « stimuler » les gisements en accroissant significativement le taux de récupération d'hydrocarbure qui peut passer dans certains cas de 30 à 70%. Elle est déjà mise en œuvre sur certains gisements avec du CO₂ comprimé ou un autre fluide moteur.

- le CO₂ peut être injecté dans des mines de charbon profondes et difficilement exploitables. Il se substitue alors dans la structure du charbon au méthane qui s'y trouvait piégé et qui peut ainsi être récupéré, le potentiel d'adsorption du CO₂ sur le charbon étant environ 2 fois plus important que celui du méthane. Le charbon possède une surface spécifique généralement importante qui permet de piéger de façon durable jusqu'à 40 à 60 m³ de CO₂ par tonne de charbon.

3-3) Dissolution dans des aquifères salins

Le CO₂ peut être dissous dans l'eau d'aquifères inexploitable compte tenu de leur profondeur et de leur salinité.

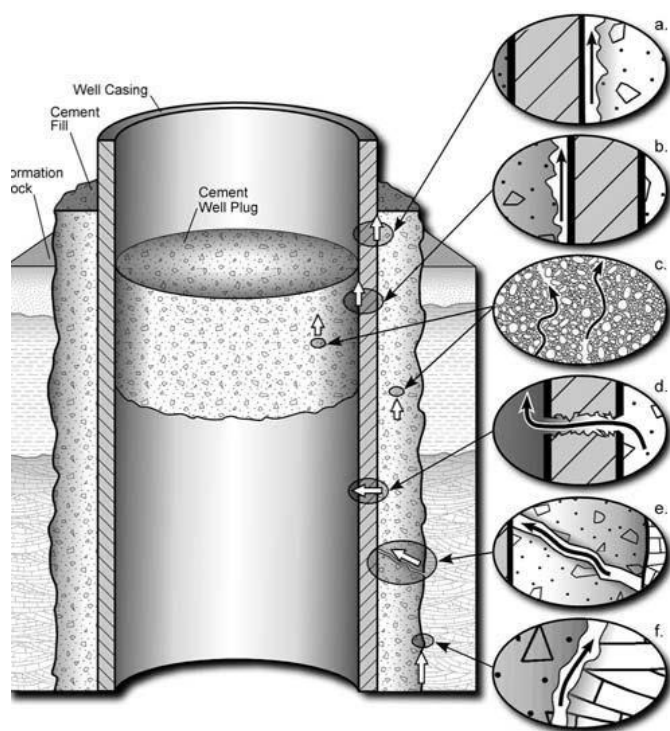
De tels aquifères existent dans de nombreuses régions et peuvent donc constituer des exutoires disponibles à des distances réduites des unités de piégeage du CO₂.

Situés dans des formations sédimentaires, ils offrent théoriquement par ailleurs de bonnes garanties de stabilité et d'étanchéité. Le gaz est injecté sous pression à l'état

supercritique (dès que la pression est supérieure à 7,4 MPa à 31°C) réduisant ainsi son volume de 1000 m³ sous forme gazeuse à 3,8 m³ à 800m de profondeur, ou à 2,7 m³ au-delà de 2000m de profondeur.

Au contact de l'eau le CO₂ se dissout en acidifiant l'eau. Il peut ensuite réagir avec les autres sels dissous et selon leur nature précipiter des espèces conduisant ainsi idéalement à une minéralisation du carbone (par exemple : formation de calcaire).

Il peut aussi réagir avec la roche en altérant la capacité de rétention ou son étanchéité. Il peut aussi causer la corrosion des systèmes d'étanchéification des puits d'injection.



a. Fuites entre le ciment et le cuvelage acier (a et b), à travers le ciment (c et e), à travers le cuvelage (d), entre le ciment et la roche (f).

L'existence de ces phénomènes constitue un risque pour la sûreté à long terme des stockages.

3-4 Combien de CO₂ peut-on espérer séquestrer ?

Les capacités mondiales de séquestration

estimées seraient :

- jusqu'à 950 milliards de tonnes (Gt) de CO₂ dans les gisements épuisés d'hydrocarbures (estimation basse : 675 Gt)
- jusqu'à 10000 Gt de CO₂ dans les aquifères salins (estimation basse : 1000 Gt)
- jusqu'à 200 (Gt) de CO₂ dans les mines de charbon (estimation basse : 3 Gt)

Ces capacités sont à la hauteur de ce qui serait nécessaire : actuellement les rejets de CO₂ sont estimés à environ 8 milliards de tonnes par an.

3-5 Estimation des coûts

Les chiffres sont évidemment variables en fonction du mode de production-captage, de la distance à parcourir entre la production et le site de stockage et du mode de stockage. On trouve des estimations qui vont de 6 à 190 dollars par tonne se décomposant en 3 à 160 dollars par tonne pour le captage-conditionnement, 1 à 25 pour le transport, 2 à 5 pour le stockage.

4- Installations Pilotes et Projets

Dans le monde, 75 démonstrateurs de large échelle (procédés industriels de captage et de stockage d'un minimum de 1 million de tonnes de CO₂ par an) sont en cours de développement ou en projet, principalement aux Etats-Unis, au Canada, en Australie et en Chine, selon la liste du Global CCS Institute. Mais parmi eux, seulement huit s'avèrent opérationnels, aux Etats-Unis, au Canada, en Norvège et en Algérie. Ils sont à l'origine du stockage de 23 millions de tonnes de CO₂ par an. En France, une expérimentation est menée par Total dans le bassin gazier de Lacq (Pyrénées-Atlantiques).

4-1 Capture du CO₂

Au niveau européen, un des projets les plus importants se nomme Castor (CO₂ from Capture to Storage). Lancé en 2006, rassemblant trente acteurs issus de onze pays européens, Castor s'est appuyé sur le site industriel d'Esbjerg, au Danemark

Dans le cas de la capture post combustion, l'absorption est la technologie la plus utilisée. Cependant, son intégration à une centrale existante réduit de 15 à 20% le rendement de la production d'électricité, et augmente jusqu'à 50% le coût de production. . Le projet Castor visait à rendre la capture post combustion plus attractive. L'objectif premier consistait à réduire les coûts du processus, pour passer de 50 ou 60 euros par tonne de CO₂ à 20 ou 30 euros, sans pour autant nuire au rendement.

Le projet a atteint ses objectifs. L'installation pilote du projet CASTOR, installée au Danemark dans une centrale électrique à charbon, est la première de ce type et reste la plus grande au monde. Il a démontré qu'il était possible d'atteindre un taux de récupération du CO₂ de 90 %. L'installation est capable de capturer une tonne de CO₂ par heure, pour un coût estimé à 35 euros par tonne de CO₂.

En France

Le site Total de Lacq a accueilli depuis 2010 une chaîne complète de CSC, depuis la captation du CO₂ réalisée par oxycombustion, le transport de celui-ci via un gazoduc existant de 27 km, et enfin son stockage sur le site de Rousse. C'est là, dans cet ancien gisement de gaz, qu'il était prévu d'injecter jusqu'à 120 000 tonnes de CO₂ pendant deux ans et stockées par 4 500 m de profondeur, sous une couche d'argile épaisse de 2000m.

Un projet qui se singularise tout d'abord par l'oxycombustion, utilisée pour la première fois par Total. S'il existe quelques autres pilotes de ce procédé, comme l'entreprise suédoise Vattenfall utilisant l'oxycombustion de charbon en Allemagne, son intégration à une chaîne complète de CSC est, elle, par contre, unique au monde. Total utilise une chaudière classique, d'une puissance de 30 MW. L'obstacle majeur au développement du CSC étant son coût, ce pilote a été réalisé pour vérifier et démontrer

que la réduction des coûts et l'amélioration de l'efficacité énergétique étaient possibles, et ce à une échelle industrielle.

Total, après avoir obtenu une prolongation de son autorisation d'exploitation, vient de décider l'arrêt du projet au 1^{er} trimestre 2013. Total considère en effet que l'expérience est désormais suffisante même si la production se limite à 50000 à 60000 tonnes de CO2 piégé et injecté dans le stockage.

4-2 Stockage du CO2

Bien que les aquifères salins profonds représentent une option prometteuse pour le stockage du CO2, il n'existe actuellement qu'un seul site au monde de stockage de CO2 dans ce type de réservoir : il s'agit du site norvégien de Sleipner, situé en mer du Nord. En fonctionnement depuis 1996, ce site d'injection de CO2 est implanté à proximité d'un gisement de gaz naturel exploité à 2 500 m de profondeur. Le CO2 est présent à titre d'impureté à hauteur de 9% environ dans le gaz naturel et, au lieu d'être rejeté dans l'atmosphère, il est réinjecté in situ dans une formation sableuse située à une profondeur de 1000m environ. La durée prévue d'injection est de 20 ans, au débit de 1 MtCO2/an.

4-3 Le Projet ULCOS

ULCOS dont on a beaucoup parlé dans la presse ces derniers temps à propos de l'avenir du site sidérurgique de Florange en Lorraine, est un programme de recherche européen porté par un consortium européen d'acteurs de la sidérurgie et de secteurs associés

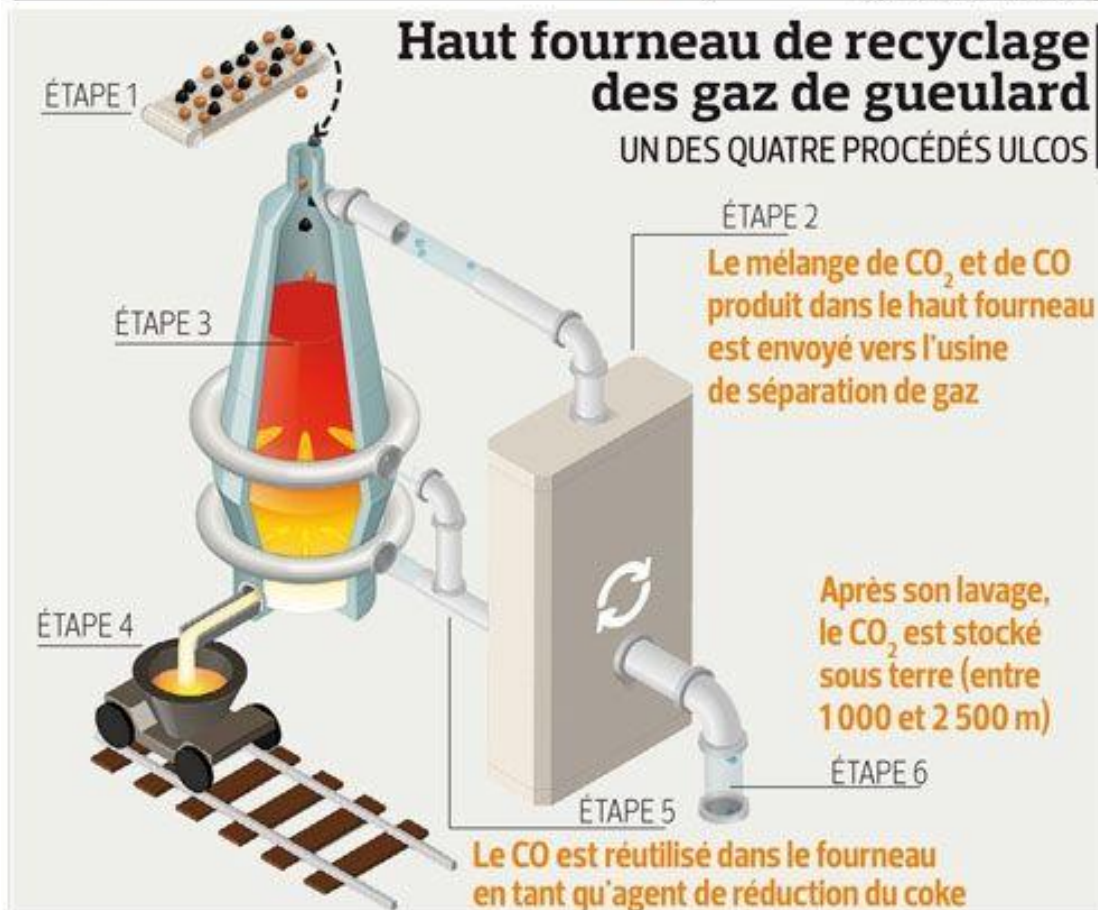
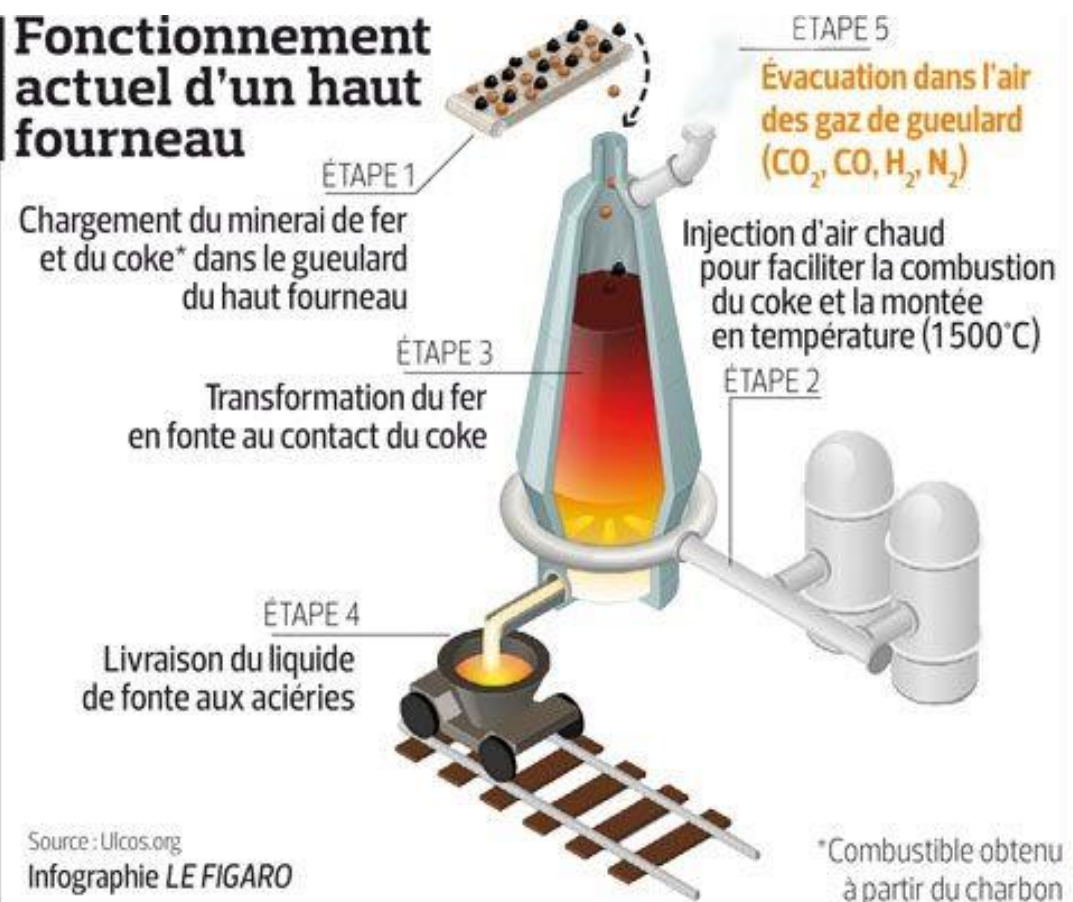
Arcelor-Mittal, leader mondial, est le principal coordinateur de cette initiative, qui fut financée jusqu'en 2010 à 60% par la Commission européenne.

Le site web dédié au programme résume son contenu de la manière suivante :

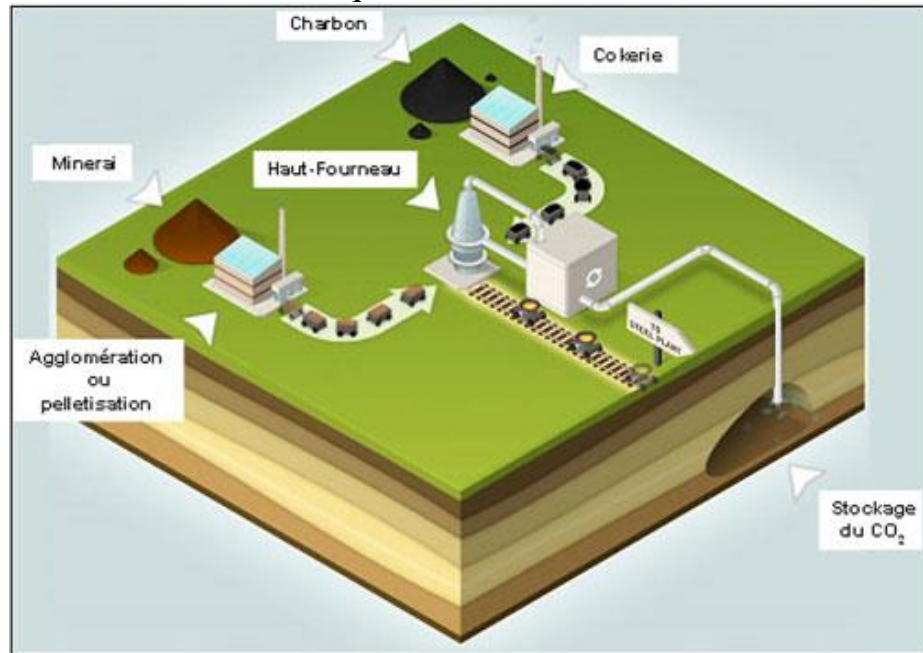
« ULCOS est l'abréviation d'Ultra-Low Carbon dioxide (CO2) Steelmaking, ce qui signifie « Processus sidérurgiques à très basses émissions de CO2 ». Il s'agit d'un consortium de 48 entreprises et organisations issues de 15 pays européens, réunies au sein d'une initiative de coopération en R&D afin de réduire de manière drastique les émissions de dioxyde de carbone liées à la production d'acier. Ce consortium regroupe toutes les principales entreprises sidérurgiques de l'Union européenne, ainsi que des partenaires du secteur de l'énergie et de l'ingénierie, des instituts de recherche et des universités. Il est soutenu par la Commission européenne. **L'objectif du programme ULCOS est de réduire les émissions de CO2 d'au moins 50 % par rapport aux méthodes de production actuelles les plus performantes.** »

En 2010 quatre solutions potentielles sont arrêtées. L'idée générale est de coupler des techniques innovantes de production d'acier moins émettrices à des systèmes de captage et de stockage de CO2. L'une d'entre elles, le recyclage des gaz de gueulard, semble particulièrement prometteuse. ArcelorMittal annonce donc qu'elle sera mise en

œuvre dans le cadre d'un programme baptisé Ulcos II. C'est un haut-fourneau de Florange qui est choisi pour la réalisation éventuelle d'un futur démonstrateur.



Le CO₂ serait capté lors de la production d'acier par les hauts-fourneaux de Florange, puis transporté et stocké dans des aquifères salins à 100 km environ au sud de Verdun.



De la sorte, la "filère chaude" du site regagnerait en compétitivité grâce à d'importantes économies réalisées sur le coût des quotas d'émissions de CO₂ que doivent verser les industries. Et si cette technologie s'avère concluante, le dispositif de captage et stockage de CO₂ pourrait *"en principe être déployé dans des sites de production d'ici quinze à vingt ans"*, selon le site Internet du projet.

La mise en œuvre de ce projet nécessite de vaincre plusieurs obstacles :

- **Son financement** : les fonds nécessaires (environ 600 M€) seraient apportés par Mittal, le gouvernement français et les collectivités territoriales (180 M€) et la Commission Européenne (250 M€). Plusieurs projets sont en compétition dans le cadre d'un appel d'offres pour bénéficier de ce financement européen. La Commission européenne avait fait de Florange-Ulcos l'un de ses projets prioritaires et son aide financière était presque acquise. Mais en Novembre 2012 l'instance de l'UE a annoncé que le site d'ArcelorMittal se retirait de l'appel d'offre et renonçait à cette aide financière, en raison de «problèmes techniques». Ce retrait pourrait n'être que temporaire. Selon plusieurs commissaires européens et le gouvernement français, le site lorrain est susceptible de concourir au prochain appel d'offres qui sera lancé par la Commission européenne en 2013.
- **La réalisation du gazoduc** à travers un grand nombre de communes : problème classique d'acceptation
- **La réalisation du stockage**, nécessitant le choix d'un site puis son acceptation par la population. On trouve dans cette région peu éloignée de Bure des associations entrainées depuis longtemps à s'opposer aux solutions de stockage géologique !

Le calendrier et même l'avenir de ce projet sont donc encore loin d'être finalisés.

5- Suffit-il de séquestrer le CO₂ pour limiter l'effet de serre?

On a vu plus haut que les sources concentrées de CO₂ représentent 50% de l'émission du CO₂ d'origine fossile, qui, elle-même, représente 50% des émissions actuelles de gaz à effet de serre.

Les autres rejets de CO₂ d'origine fossile sont dispersés : transports, usage domestique, ...

Les émissions de gaz à effet de serre qui ne sont pas d'origine fossile (CO₂ de la biomasse, agriculture et élevage, autres GES) sont également diffuses et ne peuvent pas être raisonnablement captées.

Par ailleurs

- la consommation d'énergie est malgré tout appelée à croître (développement nécessaire des pays émergents et des pays en voie de développement) avec pour conséquence, au moins pendant encore de nombreuses années l'augmentation potentielle de la quantité de CO₂ rejetée dans l'atmosphère.
- la mise en place d'installations nécessaires à la séquestration du CO₂ en quantité suffisante pour influencer sur l'évolution de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère, ne se fera pas en un jour, ni même en 10ans compte tenu des moyens à mobiliser et de la complexité des problèmes à résoudre (politiques, réglementaires, financiers...) : selon l'Agence internationale de l'énergie, près de 20 % des rejets mondiaux de CO₂ dans l'atmosphère pourraient être évités à l'horizon 2050 grâce au captage et à la séquestration du CO₂. **Mais pour limiter la hausse du réchauffement de la planète à 2 °C, il faudrait que 130 installations industrielles fonctionnent d'ici à 2020, calcule l'agence.**

Il est donc indispensable de développer simultanément et très rapidement les moyens permettant d'économiser l'énergie et de substituer à l'énergie d'origine fossile partout où cela est possible par des énergies non émettrices de gaz carbonique.