

La séquestration du CO₂

La réduction des émissions de gaz à effet de serre, en particulier le CO₂, constitue un défi technologique et sociétal majeur dans la lutte contre le changement climatique. Parmi l'ensemble des mesures susceptibles de réduire les émissions anthropiques de CO₂, la capture et le stockage géologique constituent une approche très prometteuse pour les années à venir.

Les enjeux

Les risques de changement climatique ont fait l'objet de nombreux débats au cours de ces dernières années. Actuellement, la plupart des experts estiment que ces risques sont réels et directement reliés aux émissions de gaz à effet de serre, et tout particulièrement de CO₂. Les émissions de CO₂ ont fortement augmenté au cours des récentes décennies. Elles entraînent une augmentation de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère. Cette augmentation de la concentration serait responsable de la tendance au réchauffement climatique déjà observée, et pourrait avoir dans l'avenir des conséquences beaucoup plus dramatiques, si aucune mesure n'est prise.

Les scénarios établis par le GIEC⁽¹⁾ (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) montrent que la teneur en CO₂ pourrait passer d'une valeur de l'ordre de 360 ppm actuellement, à une valeur qui, en l'absence de mesures, dépasserait 1000 ppm d'ici à la fin du siècle, avec des risques considérables de changement climatique.

Les conférences telles que les sommets de Rio et de Johannesburg et les conférences des Parties marquent un premier pas vers une volonté internationale de limiter les rejets de gaz à effet de serre. C'est dans le cadre de l'une de ces conférences qu'a été défini, en 1997, le **Protocole de Kyoto**, qui impose à 38 pays développés de réduire de 5,2 % en moyenne leurs émissions de gaz jugées responsables du réchauffement de la planète⁽²⁾. Un accord entre les Parties pour l'entrée en vigueur de ce protocole a ensuite été signé en juillet 2001 à la conférence de Bonn, et si le protocole est ratifié par la Russie, il pourrait être opérationnel en 2003.

Dans ce contexte, l'Union européenne a proposé une **directive sur les échanges de quotas d'émission**, adoptée le 22 juillet 2003. Cette directive prévoit des engagements de la part des industriels concernés, avec leurs gouvernements respectifs, sur leurs émissions de GES⁽³⁾ pour la période 2005-2012, ainsi que des pénalités en cas de dépassement de ces engagements.

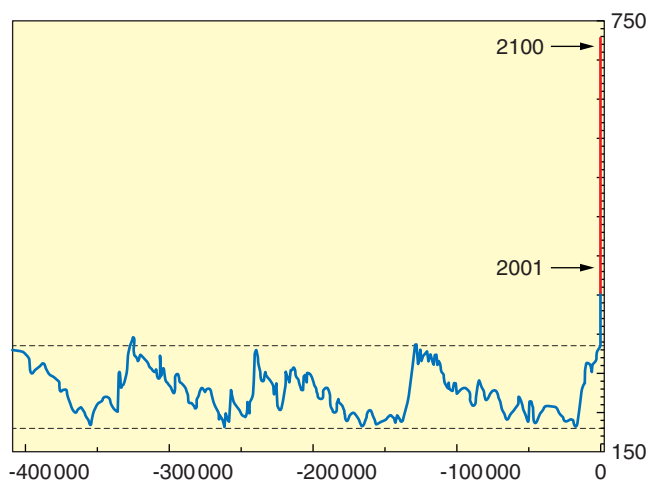
(1) Ou IPCC (International Panel On Climate Change).

(2) L'objectif français est de maintenir les émissions de gaz à effet de serre au niveau de celles de 1990, à l'horizon 2012.

(3) Gaz à effet de serre.

Fig. 1

Variation de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère (en ppm)



Source : IPCC

Quelles solutions ?

La production d'électricité (pour 39 %), l'industrie (22 %) et les transports (23 %) constituent les principales émissions anthropiques de CO₂. Pour limiter ces émissions, trois types d'action peuvent être envisagés :

- Réduction des consommations d'énergie. La maîtrise de la consommation d'énergie représente un premier moyen d'action. Une réduction de la consommation peut être le résultat d'une modification des habitudes de consommation. Elle peut également être obtenue à travers des engagements négociés dans un secteur économique. Le cas de l'industrie automobile illustre bien une telle démarche. Les constructeurs automobiles européens ont ainsi pris des engagements, qui dans l'avenir devraient se traduire par une réduction sensible des émissions de CO₂ au kilomètre parcouru, passant de 190 g/km en 1997 à 160 g/km en 2003, et à 140 g/km en 2008, avec un objectif de 120 g/km en 2012.
- Un deuxième mode d'action consiste à mettre en œuvre des combustibles ou des carburants émettant moins de CO₂

La séquestration du CO₂

par unité d'énergie produite. Ainsi, la substitution du gaz naturel au charbon comme combustible dans une centrale thermique permet une réduction sensible des émissions de CO₂. Un recours accru au nucléaire ainsi qu'aux énergies renouvelables peut constituer un autre moyen, avec à chaque fois les limitations propres à chacune de ces filières. L'utilisation de biomasse comme combustible et de biocarburants peut également contribuer à améliorer le bilan CO₂, dans la mesure où la production de biomasse permet de capturer du CO₂ présent dans l'atmosphère.

- Un troisième mode d'action, et c'est celui qui va être analysé par la suite, consiste à capturer et à stocker le CO₂ dans des formations géologiques souterraines. Cette option est applicable à des installations fixes de production concentrée d'énergie. Elle peut également être appliquée à la production d'hydrogène à partir de combustibles fossiles, cet hydrogène pouvant être ensuite utilisé dans des applications décentralisées, pour produire de l'énergie sans émission de CO₂.

Parmi ces grandes options conduisant à réduire, voire à éliminer, les émissions anthropiques de CO₂, la filière capture-stockage possède de multiples avantages tels que :

- permettre une poursuite de l'utilisation de sources de carbone fossile ;
- donner le temps nécessaire aux énergies renouvelables pour une réduction importante des coûts et pour les avancées technologiques nécessaires.

Le stockage géologique du CO₂ constitue une filière largement étudiée depuis quelques années au niveau international, et notamment aux États-Unis, au Japon et en Europe. Le principe en est le suivant : il s'agit de capter le CO₂ provenant d'une source importante (fumées industrielles ou gaz naturel brut riche en CO₂ en sortie de gisement), de le concentrer, et de le transporter vers un site géologique adéquat pour son stockage.

Une approche prometteuse : la capture et le stockage géologique du CO₂

La capture du CO₂

La capture de CO₂ à partir de fumées de combustion peut être effectuée en faisant appel à des techniques qui sont en principe connues. On utilise pour cette opération des installations de lavage par solvant, et en particulier des amines telles que la MEA (monoéthanolamine), qui sont employées pour le traitement de gaz naturel.

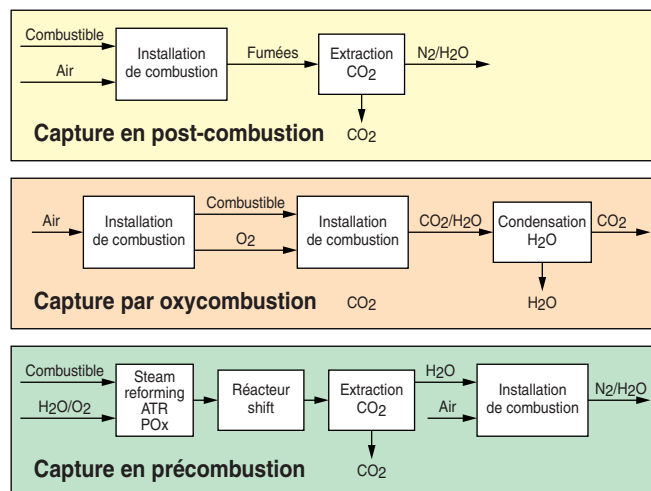
Dans le cas d'un lavage des fumées, ces installations présentent toutefois l'inconvénient d'être très encombrantes, très coûteuses et de consommer des quantités importantes

d'énergie, ce qui peut conduire dans certains cas à doubler pratiquement la quantité d'énergie nécessaire. Par ailleurs ces installations doivent travailler dans des conditions peu favorables : grands volumes de fumées à faible pression et diluées en CO₂. C'est pourquoi, dans le cas de nouvelles installations, d'autres options sont considérées.

Sur la figure 2 sont présentées les principales options de capture du CO₂. Le lavage des fumées est adapté aux installations existantes et représente dans ce cas la seule option qui est directement applicable, sans avoir à transformer complètement l'installation.

Dans le cas d'une installation nouvelle, on peut envisager les deux autres options schématisées sur la figure 2.

Fig. 2 Principales options de capture du CO₂



Le combustible peut être converti en gaz de synthèse, constitué par un mélange de CO et d'hydrogène, soit par vaporeformage (gaz naturel) en présence d'eau, soit par oxydation partielle en présence d'oxygène. Le CO présent dans le mélange réagit avec l'eau au cours de l'étape de *shift-conversion* pour former du CO₂ et de l'hydrogène. Le CO₂ est alors séparé de l'hydrogène dans de bonnes conditions (capture en précombustion) et l'hydrogène peut être utilisé pour produire de l'énergie (électricité et ou chaleur) sans émission de CO₂.

Dans le cas du schéma avec oxycombustion, la combustion est réalisée en présence d'oxygène pur, ce qui permet d'obtenir des gaz de combustion concentrés en CO₂, qui est facilement séparé de la vapeur d'eau avec laquelle il est mélangé.

Le stockage géologique

Après sa capture, il faut pouvoir séquestrer le CO₂ pour des durées importantes, pouvant au minimum couvrir la période pendant laquelle le problème des émissions de CO₂ risque de

La séquestration du CO₂

demeurer critique, période qui ne devrait pas dépasser un à deux siècles. Par mesure de précaution, on envisage des solutions qui permettent d'effectuer cette séquestration sur des périodes pouvant atteindre des milliers d'années. **C'est principalement en cela que la problématique du stockage géologique du CO₂ diffère considérablement de celle du stockage de déchets tels que les éléments radioactifs.**

Le stockage au fond des océans fait partie des options qui ont été envisagées, mais une telle solution présente deux inconvénients majeurs : d'une part, le devenir à long terme d'un tel stockage demeure difficile à modéliser et incertain. D'autre part, on connaît mal l'impact d'une augmentation de la concentration en CO₂ sur les écosystèmes marins.

La séquestration géologique dans le sous-sol constitue donc la solution généralement préférée. Les principales options possibles sont alors les suivantes :

- *Stockage dans des gisements de pétrole et de gaz épuisés.* Cette option est particulièrement intéressante. En effet, lorsque le CO₂ est injecté dès la phase de production, son injection peut être mise à profit pour effectuer de la récupération assistée de pétrole. Il est évidemment essentiel que le CO₂ pouvant s'échapper avec les fluides de production soit récupéré et renvoyé dans le réservoir. Mais l'aspect le plus attractif en matière de stockage est certainement le confinement naturel qu'offrent de telles structures : elles ont en effet constitué des pièges à hydrocarbures pendant plusieurs millions d'années.
- *Stockage dans les veines de houille non exploitées.* La capacité des charbons à adsorber préférentiellement le CO₂ au méthane initialement présent constitue un mécanisme de piégeage tout à fait intéressant. De plus, ce mécanisme provoque la libération du méthane qui peut ainsi être récupéré dans des puits producteurs, offrant un attrait économique potentiellement attractif. Le paramètre clé de ce type de stockage est certainement la perméabilité de ce type de formation. Elle est en général très faible comparée aux roches constituant les gisements d'hydrocarbures et les aquifères adaptés au stockage du CO₂. Dans ce cas, la possibilité d'injecter des quantités importantes de CO₂, sans multiplier les puits injecteurs, n'est pas garantie. Les travaux de recherche en cours devraient mieux préciser l'injectivité réelle de ces formations⁽⁴⁾.
- *Stockage dans les aquifères salins profonds.* Cette solution présente le plus gros potentiel en termes de capacité de stockage. La profondeur de ces formations et leur contenu élevé en sel les rendent tout à fait inadaptées en tant que ressources en eau potable ou en eau d'irrigation.

Ces aquifères sont de deux types : ouverts ou fermés. Les aquifères fermés⁽⁵⁾ ont une configuration identique aux gisements d'hydrocarbures et offrent de bonnes garanties de

confinement, tant vertical que latéral. Il s'agit d'une option certainement plus « sûre » pour un stockage sur le continent, mais offrant toutefois des capacités limitées. Les aquifères ouverts ont une structure plane ou peu inclinée. Du fait de leur absence de confinement latéral, le CO₂ peut migrer. Cependant, leur faible vitesse d'écoulement et leur taille importante favorisent le confinement du CO₂. Cela suppose cependant la présence d'une couverture de qualité suffisante. Le mécanisme principal de piégeage est ici la dissolution du gaz dans l'eau. Le « point faible » de cette solution réside dans le peu de connaissance de ces objets qui, n'offrant aucune ressource particulière, n'ont quasiment pas été étudiés. Un effort de caractérisation important devra être mené afin de qualifier de tels sites pour le stockage géologique, en particulier pour des stockages à terre. Il apparaît clairement que les stockages en aquifères fermés, comme en réservoirs d'hydrocarbures sont **réversibles** : le gaz stocké pourra y être récupéré (au moins en grande partie). Cela ne sera évidemment pas le cas dans les aquifères non confinés.

Le tableau 1 présente le potentiel de stockage de CO₂ dans différentes structures géologiques (données AIE). Malgré l'imprécision des estimations actuelles, on observe que le potentiel de stockage est en principe tout à fait à la mesure des quantités de CO₂ émises.

Tableau 1
Capacité potentielle de stockage
pour différents modes de stockage

Options de stockage	Capacité totale	
	Gt CO ₂	Part des émissions cumulées en 2050 (%)
Gisements d'hydrocarbures déplétés	920	45
Aquifères profonds	400-10 000	20-500
Veines de charbons inexploitées	40	2

Situation actuelle et perspectives d'avenir

Différentes opérations de séquestration du CO₂ ont déjà été réalisées ou sont en cours de montage. On peut citer notamment l'opération du champ de Sleipner, en mer du Nord, où la compagnie norvégienne Statoil récupère un million de

(4) Projet européen RECOPOP, visant à réaliser un pilote d'injection de CO₂ dans des veines de charbon en Pologne, coordonné par TNO. La France y est représentée par IFP, Air Liquide, Gaz de France et GAZONOR.

(5) C'est ce type d'aquifères qui est utilisé pour le stockage du gaz naturel, notamment en France.

La séquestration du CO₂

tonnes de CO₂ par an à partir de gaz naturel et le réinjecte dans un aquifère salin à 1000 m de profondeur sous le plancher océanique. L'IFP a participé au suivi de cette opération dans le cadre d'un programme mené avec le soutien de l'Union européenne. L'IFP participe également au projet Recopol, visant à étudier l'injection de CO₂ dans les veines de charbon et qui a abouti à la réalisation d'un pilote de démonstration en Pologne. À l'heure actuelle, de nombreux projets sont à l'étude en Europe et dans le monde.

Des travaux de R&D sont nécessaires pour développer de nouvelles techniques plus économiques et plus sûres de capture et de séquestration du CO₂. L'IFP s'implique activement dans ces travaux. Sur le plan national, l'IFP anime aux côtés du BRGM le Club CO₂, sous l'égide de l'ADEME, qui regroupe les acteurs majeurs concernés du monde industriel et de la recherche. L'IFP coordonne également un important projet français, cofinancé par le RTPG, sur l'optimisation du stockage dans les différentes formations géologiques.

Au niveau européen, l'IFP coordonne le projet CASTOR, qui regroupe trente partenaires de l'industrie et de la recherche, pour l'étude de la capture et de la séquestration géologique du CO₂. L'IFP participe également au projet ENCAP qui vise le développement de systèmes de production d'électricité avec séquestration du CO₂, à partir de différents combustibles : charbon, gaz naturel ou combustibles pétroliers.

Les obstacles à l'heure actuelle sont avant tout d'ordre économique : les coûts de capture et séquestration sont aujourd'hui de l'ordre **d'au moins 50 € par tonne de CO₂ évité** et des actions de réduction des coûts sont indispensables pour assurer la diffusion de ces techniques. Des actions visant à assurer **l'acceptabilité sociale** de ces solutions sont également essentielles. Il s'agit notamment d'étudier aussi précisément que possible l'impact de tels stockages souterrains sur l'environnement : risques de fuites de CO₂ et impact sur

l'eau potable, les écosystèmes et les populations humaines. Il s'agit également de développer les moyens de mesure et de contrôle des sites de stockages et de leur environnement. Par ailleurs, les nouvelles opérations de démonstration sur sites réels, prévues notamment en Europe, vont constituer un élément essentiel pour la validation de cette filière, tant sur le plan industriel qu'environnemental, et seront un élément déterminant pour la communication avec les autorités et le public.

L'adoption en juillet 2003 de la directive européenne concernant la mise en place d'un marché de permis négociables devrait favoriser la réalisation de nouvelles opérations dans le futur.

Conclusion

La capture et la séquestration géologique du CO₂ représentent une option nouvelle, qui pourrait contribuer dans l'avenir de manière significative à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Les travaux de R&D devraient permettre dans le futur de réduire les coûts et d'assurer la sûreté à très long terme de ce type de stockage. Ces programmes nécessitent une large concertation au niveau français, européen et même international. À ces éléments d'ordre technique, il faut bien évidemment ajouter la perception de ce concept par le public, ce qui constitue l'un des points clés concernant l'acceptabilité de cette technique de réduction des émissions de CO₂.

*Pierre Le Thiez
pierre.le-thiez@ifp.fr*

Manuscrit définitif remis le 15 décembre 2003

