

sujet, dans le cadre du programme de recherche sur les gaz à effet de serre de l'Agence internationale de l'énergie et dans le cadres de programmes nationaux et industriels.

Une nouvelle approche en Norvège

La première opération de stockage de dioxyde de carbone dans une formation géologique a commencé en octobre 1996, en mer du Nord, à 240 kilomètres des côtes norvégiennes. Sur l'une des plates-formes pétrolières du site de Sleipner, on injecte chaque semaine 20 000 tonnes de dioxyde de carbone dans les pores d'une couche de grès, à 1 000 mètres sous le fond de la mer.

Comment cette opération a-t-elle commencé? Le gaz naturel extrait sur cette plate-forme contient neuf pour

cent de dioxyde de carbone : pour qu'il soit vendable, l'usine chimique de la plate-forme le purifie, mais, au lieu de rejeter le dioxyde de carbone dans l'atmosphère, les sociétés exploitantes (*Statoil, Exxon, Norsk Hydro et Elf*) ont décidé de le stocker. Elles le compriment, puis l'injectent à travers un puits de 200 mètres de profondeur, dans la couche de grès sous-jacente initialement remplie d'eau salée (formation aquifère saline). La quantité de gaz ainsi stocké cette année à Sleipner (un million de tonnes) représente trois pour cent des émissions totales de dioxyde de carbone de la Norvège.

Dans ce pays, c'est une taxe sur les émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère qui a décidé les pétroliers à stocker ce gaz : en 1996, cette taxe s'élevait à environ 300 francs par tonne de gaz émis (aujourd'hui, elle n'est plus

que de 230 francs environ). L'investissement correspondant à l'achat du matériel de compression et au forage du puits s'est élevé à 480 millions de francs environ. Le rejet du dioxyde de carbone dans l'atmosphère aurait coûté environ 300 millions de francs par an entre 1996 et 1999 : les propriétaires de la plate-forme ont donc amorti leur investissement en un an et demi.

Dans d'autres régions du monde, des pétroliers ont des projets similaires. En mer de Chine, le champ pétrolier de Natuna contient du gaz naturel et 71 pour cent de dioxyde de carbone : l'exploitant prévoit de stocker ce dernier. Aujourd'hui, on étudie les possibilités de stockage de ce gaz dans le sous-sol, notamment sous les installations de gaz naturel liquéfié des sites de Gordon (Australie), de Snøhvit (Norvège) et sous les champs pétroliers de la Pente (Alaska).

Les pétroliers doivent séparer le gaz naturel du dioxyde de carbone pour le vendre ; le dioxyde de carbone est donc prêt pour le stockage. Toutefois, dans d'autres industries, sa récupération représente une étape coûteuse à mettre en place avant le stockage. Les industriels concernés seront plus difficiles à convaincre que les pétroliers, à cause du coût supplémentaire.

En sous-sol

La technique d'injection du dioxyde de carbone dans le sous-sol est au point : c'est la même que pour extraire du pétrole ou du gaz naturel, mais on pompe vers le bas. On l'utilise même sur de nombreux champs de pétrole pour rendre les puits d'extraction plus productifs : en injectant du dioxyde de carbone dans le pétrole, on fait remonter ce dernier jusqu'à la surface.

Les formations géologiques du monde entier, telles les formations aquifères salines (site de Sleipner), les gisements houillers non exploitables, les réservoirs de pétrole et de gaz épuisés, les cavernes rocheuses et les dômes de sel, pourraient contenir des centaines, voire des milliers, de gigatonnes de carbone.

Bien que les formations géologiques soient de bons sites de stockage, le réservoir potentiel le plus important est l'océan, qui contient 40 000 gigatonnes de carbone dissous (l'atmosphère n'en contient que 750) et dont la capacité est bien supérieure. Même si l'on injectait dans les

L'enfouissement du dioxyde de carbone : quelle technique employer?

• En quoi consiste le stockage du carbone?

Au lieu de laisser le dioxyde de carbone (un gaz à effet de serre) produit par les activités humaines se dégager dans l'atmosphère, on envisage de le stocker dans des réservoirs naturels, afin de limiter les risques de réchauffement de l'atmosphère. La plantation d'arbres est l'un des moyens de stockage. Nous en étudions un autre : la récupération du dioxyde de carbone dégagé par des sources fixes, par exemple par les centrales électriques, et son injection dans l'océan ou dans le sol.

• Où sera stocké le dioxyde de carbone?

Dans des formations géologiques, tels les gisements houillers non exploitables, les puits de pétrole ou de gaz naturel épuisés et les formations géologiques qui contiennent de l'eau salée. Le procédé employé serait le pompage, comme pour l'extraction du pétrole, mais en sens inverse (vers le bas). On étudie aussi les possibilités de stockage dans la mer, en répandant le dioxyde de carbone en petites gouttelettes, de sorte que sa concentration reste faible et modifie peu les écosystèmes environnants, et en choisissant une profondeur telle que le gaz reste dans la mer.

• Comment évaluer les risques que présente ce stockage?

L'évaluation des risques est l'un des principaux objectifs des recherches. En 1986, l'énorme bulle de dioxyde de carbone qui s'est dégagée du lac Nyos (au Cameroun), asphyxiant près de 2 000 personnes, a posé le problème de la sécurité de façon dramatique. Toutefois, la situation dans le lac Nyos était totalement différente de celle que nous envisageons dans la mer. L'éruption y était inéluctable, étant donné la petite taille du lac et la grande quantité de dioxyde de carbone stocké. En revanche, la capacité de l'océan est bien supérieure. Dans le cas d'un stockage souterrain, la nature a fait ses preuves : des réservoirs naturels, tel celui du McElmo Dome (Colorado), retiennent d'énormes quantités de dioxyde de carbone depuis des siècles.

• Le stockage du dioxyde de carbone a-t-il déjà commencé?

Oui. La plate-forme *off-shore* de gaz naturel de Sleipner, au large de la Norvège, injecte chaque jour du dioxyde de carbone dans un aquifère salin à 1 000 mètres sous le plancher océanique. C'est le seul projet qui vise à réduire les risques de réchauffement de l'atmosphère, mais d'autres projets démontrent la faisabilité d'un tel stockage. Plus d'une dizaine de centrales électriques collectent le dioxyde de carbone de leurs rejets gazeux, notamment la centrale de Shady Point (Oklahoma), qui le revend. Aux États-Unis, dans plus de 65 puits d'extraction de pétrole, on injecte du dioxyde de carbone sous terre pour augmenter le rendement du forage.

océans le double de la quantité de dioxyde de carbone présente dans l'atmosphère en 1850, la concentration de ce composé augmenterait de moins de deux pour cent. Pendant les siècles prochains, 85 pour cent des émissions actuelles se dissoudront naturellement. Pour préserver le climat, nous proposons d'accélérer le processus.

Pour un stockage efficace, on devrait injecter le dioxyde de carbone sous la thermocline, une couche d'eau dont la profondeur varie de 100 à 1 000 mètre et où la température diminue rapidement avec la profondeur. L'eau qui se trouve sous la thermocline, plus froide et plus dense que l'eau de surface, remonte très lentement. Elle met des siècles à se mélanger avec elle. En général, plus le dioxyde de carbone est injecté profondément, plus il devrait mettre de temps à atteindre l'atmosphère. On injecterait le gaz soit à des profondeurs de 1 000 à 2 000 mètres, afin de former une solution diluée, soit à plus de 3 000 mètres, afin de créer un «lac» de dioxyde de carbone. La première méthode préserve davantage l'environnement local que la seconde, qui permet un stockage plus long.

ronnement local que la seconde, qui permet un stockage plus long.

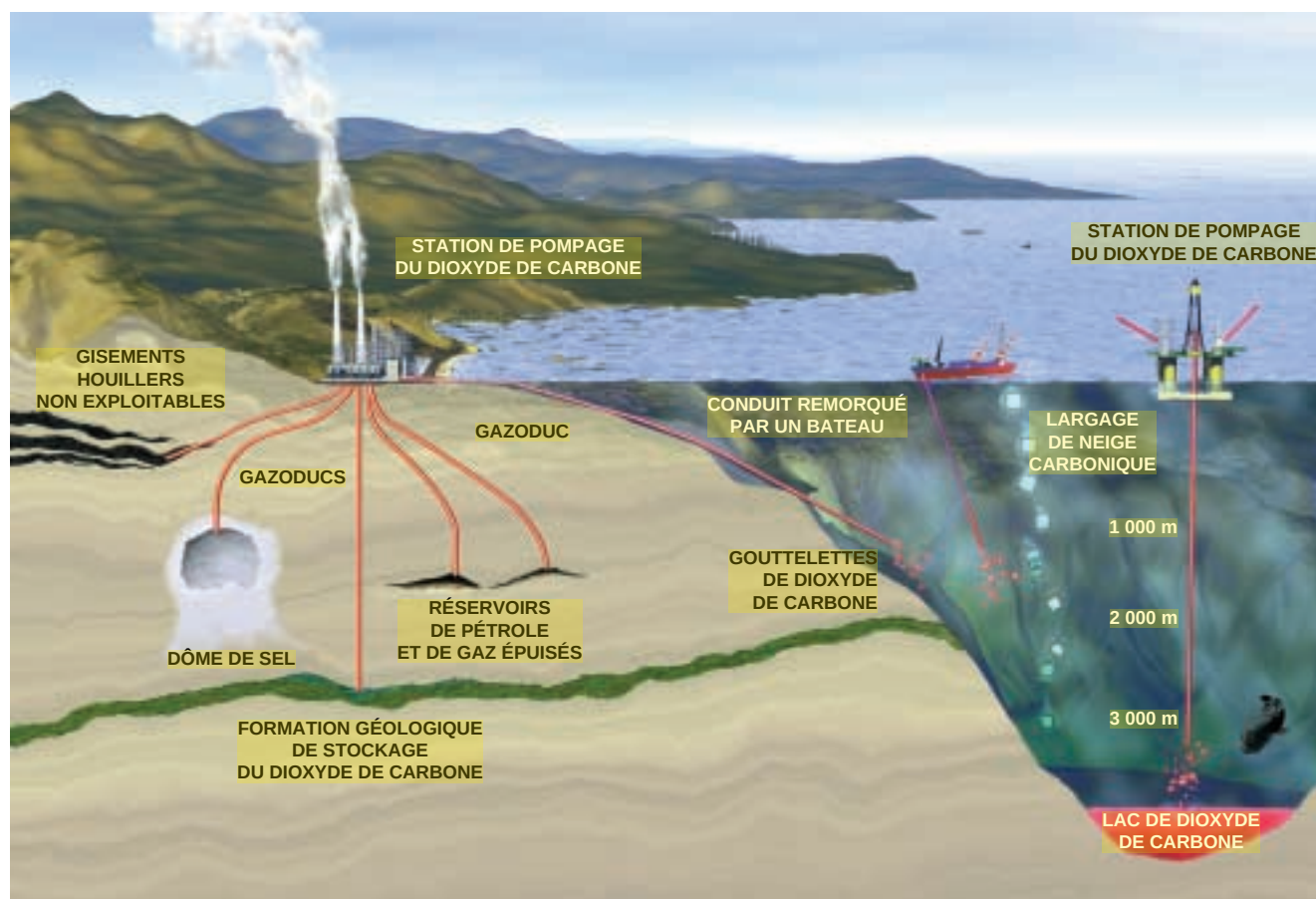
L'idée du stockage dans les océans a été proposée pour la première fois en 1977 par Cesare Marchetti, de l'Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués de Laxenburg (Autriche). C. Marchetti proposa que des pipelines acheminent le dioxyde de carbone jusqu'à Gibraltar, pour qu'il s'écoule ensuite naturellement vers les eaux profondes de l'océan Atlantique. D'autres solutions ont ensuite été proposées : le largage de neige carbonique dans l'océan, à partir de bateaux, ou l'injection du dioxyde de carbone, soit à 1 000 mètres de profondeur à travers un conduit remorqué par un bateau, soit plus profond (4 000 mètres et plus), par un tuyau qui descendrait dans les dépressions du plancher océanique.

Sécurité et respect de l'environnement

Quelles seront les conséquences sur l'environnement du stockage du dioxyde de carbone dans le sol ou dans la mer ? Le stockage est-il préférable à

l'émission dans l'atmosphère ? Dans le cas du stockage souterrain, on doit évaluer la stabilité des formations géologiques qui serviraient de réservoirs, afin que le gaz ne retourne pas progressivement dans l'atmosphère : la libération soudaine et massive de dioxyde de carbone dans l'air formerait une couche de ce gaz, plus lourd que l'air, qui asphyxierait les êtres vivants. Toutefois, les réservoirs naturels de dioxyde de carbone dans le sol, tel celui de McElmo Dome (Colorado), vieux de plusieurs millions d'années, montrent que le stockage du carbone est réalisable dans de bonnes conditions de sécurité.

En revanche, le stockage océanique pose le problème de l'acidité de l'océan. Le pH de l'eau de mer au voisinage d'un site d'injection serait compris entre 5 et 7 (l'eau serait acide), alors qu'il est normalement de 8 (l'eau de mer est basique). Cette modification importante de l'acidité risquerait de nuire au zooplancton, aux bactéries et aux animaux des fonds sous-marins, incapables de se déplacer vers des eaux moins acides. Avec notre collègue Eric



2. LE STOCKAGE DU DIOXYDE DE CARBONE sous terre ou dans la mer éliminerait l'émission des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Pour chaque site envisagé, on étudie le coût du stockage, les risques qu'il présente et ses éventuels effets sur l'environnement.

Des mesures politiques pour protéger le climat

par David Keith et Edward Parson

En 200 ans, les activités humaines ont augmenté de 35 pour cent la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Cette augmentation modifiera les climats. De combien ? Quand ? Comment ? Quelles en seront les conséquences écologiques, économiques et sociales ? Nous n'avons pas de réponses précises à ces questions, mais l'ensemble des États conviennent qu'on doit aujourd'hui réduire les émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Pour stabiliser la concentration de ce gaz à 550 parties par million, soit deux fois sa concentration préindustrielle, on devrait réduire les émissions de moitié, par rapport aux prévisions pour 2050. C'est un objectif ambitieux qui ne sera atteint que, dans le meilleur des cas, grâce à la réorganisation complète des systèmes mondiaux de production d'énergie.

Comment réduire les émissions de gaz à effet de serre ? En augmentant les rendements énergétiques ? En utilisant d'autres sources d'énergie (solaire, éolienne, de la biomasse, nucléaire) ? Howard Herzog, Baldur Eliasson et Olav Kaarstad proposent une autre solution : continuer à brûler des combustibles fossiles, mais sans rejeter de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, c'est-à-dire en le stockant dans le sol ou dans la mer.

Même si l'objectif des 550 parties par million est atteint, cette concentration provoquera des changements climatiques. Les problèmes d'environnement qui en découleront n'auront probablement que des conséquences limitées sur l'économie mondiale. En particulier, les pays riches seront peu affectés. En revanche, à l'échelle régionale, les effets seront plus marqués : certaines régions en tireront profit, alors que d'autres en souffriront. Par exemple, aux États-Unis, le Nord du pays pourrait connaître des hivers plus doux, mais des écosystèmes continentaux entiers pourraient disparaître, telles les forêts des montagnes du Sud-Ouest, les forêts du littoral et les prairies alpines. En outre, la menace de changements climatiques imprévus, ajoutés aux risques précédents, incite fortement à stabiliser la concentration de dioxyde de carbone.

Aujourd'hui, le coût de la réduction des émissions ou les problèmes que pose cette réduction. Les autres sources d'énergie restent chères. Quant aux énergies renouvelables, elles ont une faible densité d'énergie : elles sont peu rentables par rapport à la surface de terrain nécessaire à leur mise en œuvre, ce qui limiterait les possibilités d'utilisation à grande échelle. Leur coût diminuera probablement grâce aux progrès techniques, mais leur densité énergétique est une caractéristique intrinsèque immuable.

La réduction des émissions de carbone portera-t-elle un coup à l'économie ? Pas nécessairement. Tout dépendra du temps

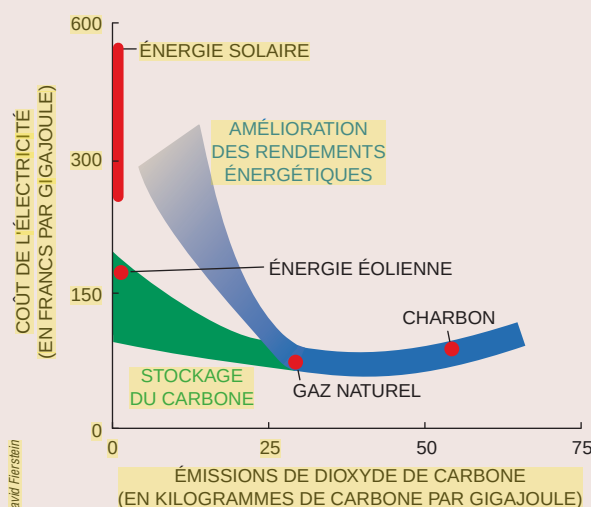
nécessaire à la mise au point de techniques bon marché, directement lié aux taxes qui seront instaurées sur le dioxyde de carbone émis dans l'atmosphère. Pour évaluer le coût de la réduction des émissions, les théories classiques n'ont pas pris en compte l'accélération de l'innovation technique due à d'éventuelles incitations politiques et financières. Dans cette hypothèse, en retardant la réduction des émissions, on se donne le temps de trouver des solutions techniques moins coûteuses. Toutefois, nous avons plutôt le sentiment qu'une action politique rapide pour prévenir les changements climatiques stimulerait l'innovation et abaisserait le coût de la réduction des émissions.

Le stockage du carbone est une des innovations attendues. Il est déjà techniquement possible et semble moins cher que l'exploitation d'énergies renouvelables. Cependant, la réduction massive des émissions passe par l'abandon de l'essence et du gazoil au profit de carburants sans carbone, tel l'hydrogène. Grâce au stockage du carbone, l'utilisation des combustibles fossiles poserait moins de problèmes d'environnement, ce qui résoudrait peut-être du même coup quelques conflits politiques : si le stockage du carbone se généralisait, l'industrie des combustibles fossiles pourrait continuer à fonctionner, avec son marché actuel, plus le nouveau marché du stockage du carbone ; elle ferait donc moins obstacle aux politiques de réduction des émissions.

Avant de stocker le carbone, on étudiera les réservoirs potentiels afin de déterminer ceux qui ne présentent pas de risque. À cause des erreurs passées dans la gestion des déchets toxiques et nucléaires, les experts en stockage du carbone n'ont pas la confiance du public. Les écologistes restent convaincus que les combustibles fossiles nuisent à la qualité de l'environnement. Ils se méfient du stockage du carbone, car il relève de la «géo-ingénierie», c'est-à-dire de l'intervention sur le climat à l'échelle planétaire, tout comme la solution qui consisterait à refroidir la planète par injection d'aérosols dans la stratosphère afin de réfléchir les rayonnements solaires.

En somme, le stockage du carbone est prometteur, mais ses conséquences incertaines imposent la prudence. Des mesures politiques et économiques sont nécessaires pour soutenir la recherche fondamentale sur l'énergie et pour inciter les sociétés à innover, afin de réduire les émissions de dioxyde de carbone à moindre coût. Le stockage de ce gaz est aujourd'hui la meilleure alternative parmi celles qui sont proposées pour les prochaines décennies.

David KEITH, Université de Carnegie Mellon
Edward PARSON, Université Harvard



Remplacer le charbon par du gaz naturel réduirait les émissions de dioxyde de carbone et les coûts. Pour diminuer encore les émissions, le stockage du carbone (en vert) serait moins cher que l'énergie solaire ou l'amélioration des rendements énergétiques (en bleu). Bien que l'énergie éolienne soit relativement bon marché, les grandes surfaces de terrain qu'elle utilise compromettent la généralisation de son utilisation.