

Le captage et le stockage géologique de CO₂ : une des solutions pour lutter contre le changement climatique

L'utilisation d'énergies fossiles apparaît nécessaire pendant encore de nombreuses années. Dans ces conditions, comment éviter que le CO₂ généré par l'usage de ces énergies ne se dilue dans l'atmosphère ? Le captage et le stockage géologique du CO₂ constituent une solution prometteuse.

par **Jean-Michel GIRES***

Lutter contre l'accumulation des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère en captant le CO₂ pour le stocker dans le sous-sol, par exemple, semble tellement simple que l'on se demande pourquoi on n'y avait pas pensé plus tôt ! « Simple » ? C'est vite dit ! Encore faut-il trouver les technologies permettant une application concrète, à un coût acceptable et dans de bonnes conditions de sécurité, pour aujourd'hui comme pour demain... Mais, au-delà même de la technicité du processus, une réflexion s'impose, afin d'éviter d'y recourir à tort et à travers.

Commençons par un bref rappel de la situation. La combustion d'énergies encore majoritairement fossiles, pour l'agriculture, l'habitat, l'industrie et les transports, émet actuellement 29 milliards de tonnes (Gt) par an de gaz carbonique, au plan mondial. La concentration de CO₂ dans l'atmosphère est ainsi passée de 280 ppm en moyenne à la fin du XVIII^e siècle, avant la révolution industrielle, à 380 ppm en 2005 et elle continue d'augmenter, chaque année, de 1 à 3 ppm. Cette augmenta-

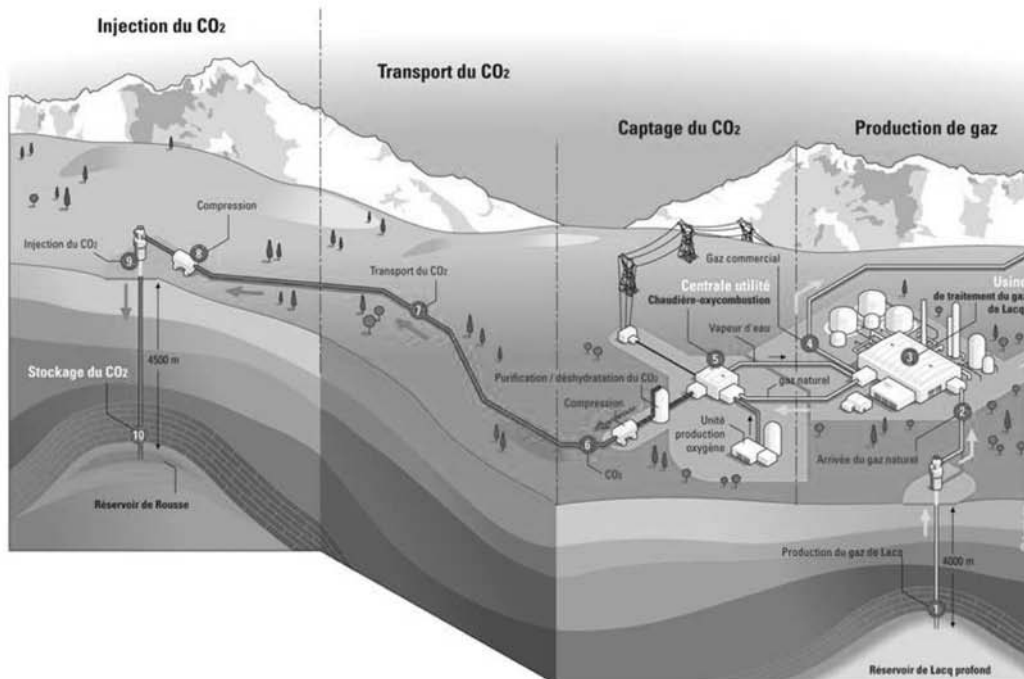
tion rapide de la concentration atmosphérique en CO₂ est telle que la moitié seulement des émissions générées par les activités humaines en une année semble pouvoir être absorbée par la planète, c'est-à-dire par les océans et les écosystèmes terrestres, qui agissent comme de véritables 'puits de carbone'.

Conséquence : d'ici à 2100, la température pourrait augmenter de 1,5°C à 4°C (1) selon les scénarios du Groupement d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). La lutte contre ce changement climatique appelle, dès lors, trois questions.

* Directeur Développement durable et Environnement de Total.
Pour en savoir plus : www.total.com

(1) Cette fourchette large s'explique, d'un côté, par les incertitudes sur les scénarios d'émissions du XXI^e siècle, dépendant des futures décisions politiques ainsi que des avancées technologiques, et de l'autre, par la complexité des phénomènes à prendre en compte pour prévoir l'évolution du climat.

Pilote CO₂



1 - Captage - Stockage CO₂ - Février 2007



CONSOMMATION D'ÉNERGIE : TROIS QUESTIONS

A-t-on besoin d'autant d'énergie qu'on en consomme actuellement sur la planète ?

La réponse est non. Sans entraver le développement économique, on peut agir, à la fois par la conservation et par l'efficacité énergétiques. La conservation, que d'aucuns appellent plus communément les « *économies d'énergie* », consiste à utiliser des applications moins consommatrices d'énergie : en matière de transport, par exemple, substituer le vélo à la voiture, ou le train à l'avion. L'efficacité, que certains nomment « *performance* », vise à rendre la même application moins consommatrice d'énergie : pour reprendre l'exemple du transport, préférer une voiture consommant 5 litres/100 km à une autre exigeant 10 litres/100 km. Ce qui vaut pour le transport vaut également pour l'habitat, pour l'agriculture et bien sûr pour l'industrie, qui améliore déjà de 1 % par an son efficacité énergétique. Au-delà des efforts en cours, d'énormes progrès restent à faire dans le domaine de la conservation et de l'efficacité énergétiques. Là se situe le premier levier pour réduire les émissions de GES.

Est-on capable de satisfaire les besoins énergétiques de l'humanité avec des énergies autres que carbonées ?

La question revêt une double importance puisqu'elle ne soulève pas seulement le problème du changement climatique, mais aussi celui de l'épuisement progressif des réserves d'hydrocarbures. La solution d'un « *mix* » énergétique, composé de sources complémentaires, s'impose donc, à ce double titre. Parallèlement aux énergies carbonées, nous devons recourir aux énergies renouvelables et alternatives, ainsi qu'au nucléaire.

Les énergies renouvelables (biomasse, éolien, hydraulique, solaire...) ont besoin de gagner en termes d'efficacité économique... et même d'efficacité écologique, car certaines d'entre elles ne présentent pas que des atouts en la matière. Les biocarburants de première génération deviennent l'objet de polémiques, car les cultures nécessaires à leur production s'effectuent au détriment d'autres besoins, notamment alimentaires, dans l'usage des terres agricoles. L'hydroélectricité, longtemps promue, pose dorénavant problème quand il s'agit d'ériger de gros barrages, qui envoient des régions entières...

Cela, sans nous appesantir sur le débat économique, ni sur celui concernant les effets de taille : il est difficile, aujourd'hui, d'aligner, avec les énergies renouvelables, des effets quantitatifs aussi importants que ceux que

l'on obtient avec les énergies fossiles. Certes, les énergies renouvelables se développent (la capacité de production d'électricité photovoltaïque croît ainsi de 40 % par an dans le monde) mais cette croissance ne peut pas déboucher sur une substitution significative à des énergies fossiles avant plusieurs décennies.

Les énergies alternatives en sont, quant à elles, pour la plupart, au stade de la R&D ou de la démonstration. Les travaux sur la production d'hydrocarbures liquides *via* la conversion chimique – autrement dit le « X To L » (Biomass To Liquids, Coal To Liquids, Gas To Liquids) – se révèlent prometteurs, mais ils en sont encore au niveau des pilotes. Plus avancé, car déjà utilisé pour l'alimentation des appareils portables et – à titre d'expérimentation – pour les véhicules automobiles, le système hydrogène-pile à combustible ne pourra être étendu à grande échelle dans le transport avant plusieurs décennies. Qui plus est, l'hydrogène n'est pas une énergie primaire, mais un vecteur énergétique, né du reformage d'hydrocarbures, de gaz de synthèse ou de l'électrolyse de l'eau à partir de toute forme d'électricité (éolienne, hydraulique, nucléaire, etc.).

Bien qu'appelées à prendre une part croissante dans le « mix » énergétique, les énergies nouvelles et alternatives ne sont pas encore parvenues à maturité et, en attendant qu'elles le soient, on continue à utiliser largement les énergies fossiles et, donc, à émettre du CO₂ dans l'atmosphère.

Le nucléaire, qui présente précisément l'avantage de ne pas émettre de CO₂, deviendra, demain, un acteur incontournable de la diversification énergétique. Mais il demeure jusqu'ici limité à la production d'électricité et son acceptabilité ne fait pas toujours l'unanimité.

Si on ne peut se passer des énergies fossiles et si la plupart d'entre elles sont condamnées à générer du CO₂, que faire, pour éviter que celui-ci ne se dilue dans l'atmosphère ?

Au-delà des progrès possibles, grâce à la conservation et à l'efficacité énergétiques ou à l'utilisation des énergies non carbonées, il faut travailler à des solutions qui permettent de diminuer drastiquement les émissions de CO₂ émanant des énergies fossiles. C'est de cette nécessité qu'est né le concept du captage et stockage géologique de CO₂ (CSC).

Même si, à la lumière de ce qui précède, le CSC apparaît comme une solution parmi d'autres pour lutter contre le changement climatique, et non comme une panacée, les chiffres avancés par les experts du GIEC soulignent l'importance de l'enjeu : cette technologie serait susceptible de capter de 80 à 90 % du CO₂ émis par une centrale électrique et de traiter, d'ici à 2050, de 20 à 40 % (2) des émissions mondiales de CO₂. Afin d'explorer cette voie, il est donc nécessaire de réaliser dès à présent des projets pilotes, comme celui du bassin de Lacq, dont Total a annoncé le lancement, le 8 février

2007. Nous y reviendrons, bien sûr, mais, auparavant, faisons ensemble un tour d'horizon des différentes technologies existantes ou à l'étude.

Le CSC comporte trois étapes : le captage, le transport et le stockage.

LE CAPTAGE-STOCKAGE DE CO₂ : UNE DES RÉPONSES POSSIBLES

Les techniques de captage

La première phase du CSC consiste à capter le CO₂ émis dans les fumées de combustion et à le séparer des autres composants principaux, notamment la vapeur d'eau et l'azote. Il existe trois techniques, compatibles avec les différents types d'installations de production d'énergie.

- **Le captage par précombustion** : il permet de produire, par un processus chimique, un gaz de synthèse à partir du combustible carboné, puis d'en séparer le CO₂, avant de fabriquer les produits de synthèse ou de brûler l'hydrogène pour produire l'énergie. Cette combustion ne génère alors plus que de la vapeur d'eau. Avec cette technique, le captage du CO₂ s'effectue donc en amont des installations de production d'énergie.

- **Le captage par postcombustion** : le CO₂ est extrait des fumées issues de la combustion classique du charbon, du gaz, du pétrole ou encore de la biomasse, donc en aval des opérations. Les procédés mis en œuvre sont physiques ou chimiques, selon les types de solvants utilisés. Cette technique est la mieux maîtrisée mais, au stade actuel de son développement, elle demeure coûteuse et consommatrice d'énergie.

- **Le captage par oxycombustion** : il consiste à remplacer l'air par de l'oxygène, dans la chaudière, pour obtenir, à la sortie, une fumée très concentrée en CO₂ (à 90 %, voire à 95 %). La combustion à l'oxygène est utilisée avec succès depuis de nombreuses années pour améliorer les performances de certains procédés industriels, dans l'industrie du verre en particulier, mais elle demeure en phase de démonstration dans les opérations de captage du CO₂.

Le transport

Après son captage, le CO₂ est dirigé vers son lieu de stockage, soit par voie maritime, soit par gazoduc. Dans les deux cas, le transport s'effectue le plus souvent en

(2) Cette fourchette est calculée en fonction de la volonté politique des pays concernés et des moyens technologiques mis en œuvre.

phase « dense », forme comprimée ou refroidie du CO₂ (pour en réduire le volume).

- la voie maritime : les bateaux sont du même type que ceux transportant du GPL (gaz de pétrole liquéfié) ;
- le gazoduc : son utilisation est également bien rodée, puisque les premiers gazoducs de transport de CO₂ sont entrés en service, aux Etats-Unis, au début des années 70. Ils s'y étirent aujourd'hui sur plus de 4 000 km, acheminant plus de 40 millions de tonnes de CO₂ par an (3).

Les techniques de stockage

L'objectif est de stocker géologiquement le CO₂ pendant des centaines, voire des milliers d'années, pour qu'il ne contribue pas à l'effet de serre dans l'atmosphère. La technologie est déjà connue dans l'industrie pétrolière et gazière, où le CO₂ est injecté dans les gisements en cours d'exploitation pour améliorer le taux de récupération du pétrole. Concernant le CSC, le stockage géologique est l'axe retenu par la majorité des pays industrialisés. Trois sortes de formations géologiques souterraines se révèlent aptes au stockage.

- **Les gisements d'hydrocarbures épuisés ou en phase de déclin** : les réservoirs de pétrole ou de gaz épuisés (« déplétés ») offrent l'avantage d'avoir prouvé leur étanchéité pendant plusieurs millions d'année. Les capacités mondiales de stockage y seraient, selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), de l'ordre de 900 milliards de tonnes de CO₂.
- **Les formations salines profondes** : ces nappes souterraines d'eau très salée, impropre à la consommation ou

(3) Il s'agit de CO₂ principalement extrait de gisements pour améliorer le taux de récupération sur des champs de pétrole.



© Paul Langrock/ZENITH-REA

Projet européen CO₂ SINK.

travaux de recherche doivent être menés pour étudier la porosité et la perméabilité des veines de charbon, qui risquent d'être trop faibles pour permettre au CO₂ de se fixer en quantités importantes.

LA BAISSÉ DU COÛT DES OPÉRATIONS DE CSC : UN ENJEU ESSENTIEL

Le coût des opérations de captage, transport et stockage du CO₂ dépend de nombreux paramètres : technologies de captage employées, infrastructures industrielles concernées (puissance, rendement, type et prix du combustible utilisé, etc.), distances à parcourir pour le transport et méthodes de stockage sélectionnées.

Au stade actuel des programmes en cours à travers le monde, le coût de l'ensemble de la chaîne varie entre 60 et 100 euros par tonne de CO₂ captée (« abattue »). Pour les installations de combustion, la phase du captage représente, à elle seule, les deux tiers de ce coût. Par ailleurs, elle génère, par elle-même, une consommation

à l'irrigation, sont présentes un peu partout dans le monde, sous la terre ou sous la mer. Les capacités mondiales de stockage y seraient de 400 à 10 000 milliards de tonnes de CO₂. Mal connus à ce jour, ces sites nécessitent un effort de recherche pour caractériser et préciser leur comportement à long terme.

- **Les veines de charbon non exploitables**, car trop profondes ou trop peu épaisses : le CO₂ est absorbé, c'est-à-dire retenu, par le charbon. Ce mécanisme provoque en outre la libération du méthane qui, naturellement fixé à la surface du charbon, peut être ainsi récupéré. Les capacités mondiales de stockage y seraient de l'ordre de 40 milliards de tonnes de CO₂. Là encore, des

de 10 à 40 % d'énergie supplémentaire par rapport à une infrastructure équivalente mais dénuée de système de captage. De nombreuses études économiques, dont celles du GIEC, estiment que le CSC pourra prendre une place significative, si son coût est réduit à un niveau voisin de 40 euros par tonne de CO₂ stockée. La baisse des coûts du CSC est donc un enjeu essentiel pour les programmes expérimentaux actuels.

DE NOMBREUX PROGRAMMES EXPÉRIMENTAUX

De multiples programmes internationaux sont menés pour tester les technologies de captage et les sites de stockage, avec le soutien de partenaires (publics et privés). Depuis le milieu des années 90, Total est engagé dans une dizaine de projets de R&D, ainsi que dans trois réalisations pétrolières et gazières : Weyburn au Canada, Sleipner et Snohvit en Norvège. Le Groupe a franchi une nouvelle étape en lançant un projet pilote dans le bassin de Lacq, qui permettra de tester la chaîne complète du processus, depuis l'installation émettrice de CO₂ dans une chaudière jusqu'au lieu de stockage, *via* le transport par gazoduc (voir encadré). Un des objectifs de ce projet pilote est de parvenir à une réduction substantielle des coûts, évoqués ci-dessus, et de la surconsommation d'énergie jusqu'alors inhérente aux procédés utilisés, afin de permettre la diffusion de cette technologie. Celle-ci pourrait, à terme, concerner toutes les installations industrielles produisant plus de 500 000 tonnes de CO₂ par an, soit environ 8 000 sites dans le monde (en particulier, des centrales électriques).

LE DÉFI DE L'ACCEPTABILITÉ

Si le stockage géologique du CO₂ semble une piste intéressante pour lutter contre le changement climatique, de nombreuses parties prenantes ont néanmoins besoin de s'assurer que « *le remède n'est pas pire que le mal* » et que le fait de vivre avec du CO₂ sous les pieds ne présente pas de risque significatif.

Ici, le groupe pétrolier et gazier qu'est Total a un rôle important à jouer, en liaison avec l'expertise technique de l'État, de ses établissements publics et du monde universitaire. Habitué à réinjecter des fluides dans le sous-sol à travers nos activités d'exploration-production, nous semblons bien placés pour remplir les conditions nécessaires à une bonne maîtrise des opérations d'injection et de surveillance à long terme des stockages de CO₂. Cela ne nous dispense pas d'un dialogue constructif avec les riverains de nos opérations. Depuis l'origine à l'écoute des questions que peuvent se poser ceux du projet pilote lancé dans le bassin de Lacq, nous avons eu à cœur de mettre une large information à leur disposition et d'organiser un processus de concertation publique à leur intention.

Le fonctionnement du pilote du bassin de Lacq

Pour la première fois, un programme va tester en France la chaîne complète du processus de captage et stockage du CO₂, depuis l'installation émettrice (une chaudière) jusqu'au stockage souterrain, *via* le transport par gazoduc (4).

Il s'agit de convertir en oxycombustion l'une des cinq chaudières de vapeur existantes de la centrale du site de Lacq, d'une puissance de 30 MW thermiques, de capter et de comprimer les émissions de CO₂ pour les transférer ensuite par gazoduc (5) sur 27 km, et les injecter ensuite dans un réservoir en fin de vie du gisement de gaz de Rousse, à une profondeur de 4 500 m.

Le pilote, qui produira environ 40 tonnes par heure de vapeur utilisée par les industries du site, émettra sur deux ans jusqu'à 150 000 tonnes de CO₂, qui seront captées et stockées. Le site du puits de Rousse fera l'objet d'une surveillance particulière, avec des capteurs répartis à la surface et en fond de puits pour mesurer l'injection, la température et la concentration de CO₂.

Ce projet pilote, qui devrait démarrer en mars 2009, après plus de deux ans d'étude et de préparation, vise trois objectifs principaux :

- améliorer la maîtrise de la filière oxycombustion, notamment en vue de son utilisation pour la production des huiles extra-lourdes ;
- réduire de 50 % le coût de captage du CO₂, par rapport aux procédés existants ;
- développer une méthodologie et des outils de surveillance afin de démontrer, à grande échelle, la fiabilité et la pérennité du stockage de CO₂ à long terme.

Son coût est entièrement pris en charge par le groupe Total.

(voir schéma, page 57)

Au-delà même de l'acceptabilité, c'est le défi de la sécurité et de la responsabilité des installations industrielles qui imprègne aujourd'hui la culture de l'entreprise, défi qui se traduit très concrètement par un maximum de prévention, en termes d'études, d'expériences, de simulations, d'évaluation, d'écoute, préalables à toute décision.

(4) Total est opérateur de ce projet, dans le cadre d'un partenariat technologique avec Air Liquide et de plusieurs collaborations, dont celles d'Alstom, de l'Institut français du pétrole (IFP), du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) et du Centre national de recherche scientifique (CNRS).

(5) Le projet pilote bénéficiera du gazoduc existant, qui transporte le gaz naturel (exploité depuis trente ans), du champ de Rousse vers l'usine de Lacq.

D'AUTRES PISTES

En l'état, le CSC représente une voie très prometteuse dans la lutte contre le changement climatique. Mais il n'est pas interdit d'imaginer d'ores et déjà l'étape suivante : ne pas se contenter de stocker le CO₂ dans le sous-sol de façon passive, mais trouver des façons de le valoriser dans des produits utiles au développement des activités humaines.

Lorsqu'il n'est pas émis en quantités excédentaires, le CO₂ joue un rôle positif dans le cycle de vie de la planète : il est utilisé par les plantes, *via* la photosynthèse chlorophyllienne, et l'on sait déjà accélérer la pousse de fleurs sous serre, en enrichissant l'atmosphère avec du CO₂. Peut-être que, demain ou après-demain, on saura

aussi favoriser la croissance de micro-algues en les stimulant, elles aussi, avec du CO₂? Peut-être que l'on saura, un jour, transformer le CO₂ par des réactions chimiques en des produits carbonés, qui seront, de nouveau, employés pour répondre à nos besoins énergétiques ?

Néanmoins, ces hypothèses restent encore à démontrer. On ne possède que quelques pistes de réflexion, très en amont. Mais ce n'est pas parce qu'il n'existe encore aucune solution industrielle ni économique qu'il ne faut pas y travailler, en rêvant que, d'ici à quelques décennies, voire quelques siècles, l'humanité saura faire quelque chose d'utile du CO₂ stocké.

C'est là, en tout cas, un domaine complémentaire de R&D, que nous souhaitons explorer, avec nos partenaires, dans le futur.