

Pour relever le défi du réchauffement planétaire, un ensemble de mesures s'impose d'urgence : économies d'énergie, transports propres, développement des énergies renouvelables... Vient s'y ajouter aujourd'hui la capture du CO<sub>2</sub> au niveau des sources d'émissions industrielles massives et son stockage dans les couches géologiques profondes. Recours nécessaire pour parvenir à diviser par deux les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> à l'horizon 2050 et éviter un bouleversement climatique majeur, la filière capture et stockage géologique du CO<sub>2</sub> est en plein développement. Les projets de recherche et les pilotes industriels se multiplient dans le monde.

**Tête de puits de production de gaz carbonique à Montmiral (Drôme) : ce gisement naturel de CO<sub>2</sub> à une teneur de 97 % est étudié par le BRGM et des équipes de recherches européennes pour comprendre le comportement à long terme du CO<sub>2</sub> dans le sous-sol.**  
*Head of the carbon-dioxide production well at Montmiral in the Drôme Département: this natural deposit of 97% pure CO<sub>2</sub> is being studied by the BRGM and European research teams in order to understand the long-term behaviour of CO<sub>2</sub> in the subsurface.*

© BRGM im@gé

# Capture et stockage géologique du CO<sub>2</sub> :

## un recours nécessaire pour lutter contre le réchauffement planétaire



**Isabelle Czernichowski-Lauriol**

CHEF DE PROJET SUR LE STOCKAGE GÉOLOGIQUE DE CO<sub>2</sub>  
 SERVICE EAU – BRGM  
 i.czernichowski@brgm.fr

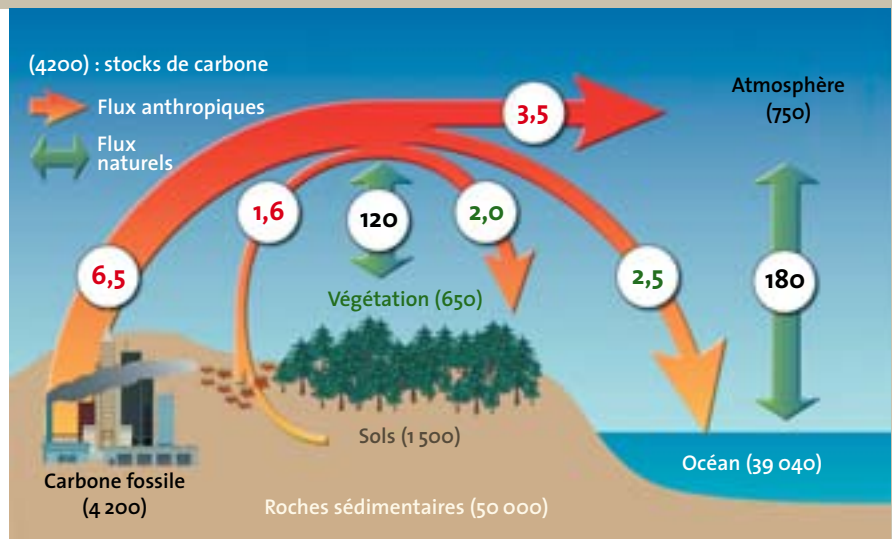
avec la collaboration de

**Martine Castello**

**E**n 1895, le savant Arrhenius, prix Nobel de chimie, explique à ses collègues de l'Académie des Sciences de Suède que la vapeur d'eau et le gaz carbonique jouent un rôle majeur dans l'équilibre thermique de la Terre. Il en déduit logiquement que l'utilisation intensive des énergies fossiles pourrait augmenter l'effet de serre. Aujourd'hui, la prédiction d'Arrhenius s'est accomplie : la Terre chauffe anormalement, le climat se dérègle, et les coupables identifiés par la grande majorité des experts de la planète sont effectivement les gaz dits "à effet de serre" (GES). Parmi eux le gaz carbonique, ou dioxyde de carbone, engendre environ les deux tiers de l'effet de serre anthropique. Les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> n'ont cessé de croître depuis le début de l'ère industrielle du fait de deux composantes essentielles de nos modes de développement : les profonds et rapides changements dans l'affectation des terres avec une colonisation de plus en plus importante d'espaces naturels,

et surtout la dominance écrasante des combustibles fossiles (charbon, pétrole ou gaz) dans notre approvisionnement énergétique. La problématique de l'énergie est en effet la question centrale du dossier du changement climatique. 80 % des émissions sont dues à l'utilisation des combustibles fossiles et 20 % à la déforestation et aux changements de pratiques agricoles. Heureusement ces émissions anthropiques ont pour l'instant été résorbées pour moitié par les puits de carbone naturels que sont les océans et la biosphère terrestre. Mais l'autre moitié s'est accumulée dans l'atmosphère.

Depuis le début de l'ère industrielle, la concentration du CO<sub>2</sub> atmosphérique est passée d'une valeur quasiment stable de 280 ppm<sup>(1)</sup> (0,028 % en volume) à une valeur de 365 ppm, jamais atteinte dans les derniers 400 000 ans. Très fortement corrélée à la teneur en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, la température moyenne mondiale à la surface de la Terre s'est élevée de 0,6 °C au cours du XX<sup>ème</sup> siècle. Les experts du GIEC<sup>(2)</sup> prévoient qu'en l'absence de mesures fortes pour limiter les émissions de gaz à effet de serre, la température moyenne du globe pourrait s'élever de 1,4 à 5,8 °C supplémentaires entre 1990 et 2100. L'écart dans les prévisions reflète les différents scénarios envisagés, basés sur des hypothèses socio-économiques diverses (démographiques, sociales, économiques et technologiques) et prenant en compte les incertitudes quant au comportement des systèmes naturels. Quelques degrés de plus en 100 ans, comparés à quelques degrés de plus sur 10 000 ans caractérisant le passage entre ères glaciaires et interglaciaires, c'est prendre la mesure du bouleversement climatique qui nous attend si nous ne prenons pas d'urgence des mesures spécifiques. L'espoir est de limiter le réchauffement planétaire à 2 °C afin d'éviter des catastrophes majeures, ce qui implique de stabiliser les concentrations de CO<sub>2</sub> atmosphériques à 450 ppm. Il faut pour cela parvenir à diviser par 2 (- 50 %) à l'horizon 2050 les émissions mondiales annuelles de CO<sub>2</sub> par rapport à leur niveau de 1990 - soit une division par 4 (- 75 %) ou 5 dans les pays industrialisés. La France s'est engagée sur le «Facteur 4» dans sa Loi d'orientation sur la politique énergétique adoptée en 2005. Le Protocole de Kyoto, signé en 1997 et ratifié en 2005, n'est qu'un tout petit



▲ **Schéma des flux nets de dioxyde de carbone terre/atmosphère en 1997 (exprimés en milliards de tonnes de carbone/an) : 3,5 milliards de tonnes de carbone de trop ! Les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> liées aux activités humaines atteignent 30 milliards de tonnes (Gt) par an, ce qui correspond à 8,1 Gt de carbone : 6,5 Gt (soit 80 %) proviennent de la combustion d'énergies fossiles et 1,6 Gt (20 %) de la déforestation et des pratiques agricoles. Ces émissions anthropiques ne sont qu'à moitié résorbées par les puits de carbone : 2,5 Gt par les océans et 2 Gt par la végétation et les sols. Et donc, chaque année, 3,5 Gt de carbone viennent s'accumuler dans l'atmosphère et perturber le climat.**

*Net Earth-to-atmosphere carbon dioxide fluxes in 1997 (in billions of metric tons of carbon per year): 3.5 billion tons of surplus carbon. Global CO<sub>2</sub> emissions linked to man's activities amount to 30 billion tons (Gt) per year, corresponding to 8.1 Gt of carbon: 6.5 Gt (or 80%) are derived from burning fossil fuels, while 1.6 Gt (or 20%) are the result of deforestation and agricultural practices. These man-induced emissions are only partially absorbed by CO<sub>2</sub> sinks: 2.5 Gt by the oceans and 2 Gt by vegetation and soils. And so, each year, 3.5 Gt of carbon end up accumulating in the atmosphere and upsetting the climate.*

Source : BRGM

“ Le dioxyde de carbone issu de l'exploitation intensive des énergies fossiles depuis la révolution industrielle est le principal responsable du réchauffement climatique. ”

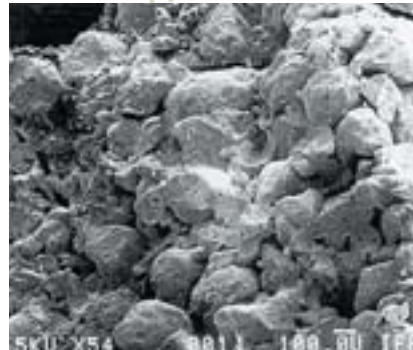
pas vers une nécessaire réduction des émissions, puisqu'il fixe pour les pays développés des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre de 5,2 % à l'horizon 2008-2012 par rapport au niveau de 1990. Mais il a le mérite d'enclencher une mobilisation internationale. Elle devrait se renforcer à l'occasion des négociations post-2012 qui ont déjà démarré.

(1) ppm = parties par million.

(2) Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

## Mesures préventives et curatives

La lutte contre le changement climatique impose en premier lieu « d'agir à la source » pour contrôler les émissions de CO<sub>2</sub>. Il s'agit principalement de réduire la consommation d'énergie et d'améliorer l'efficacité dans la conversion ou l'utilisation de l'énergie dans le logement, le bâtiment, les transports ou l'industrie; d'opérer un transfert depuis des énergies fortement émettrices de CO<sub>2</sub> à des énergies en générant peu ou



◀ Échantillon de roche gréseuse réservoir prise au microscope électronique à balayage avec un grossissement de 54 fois : on y distingue les vides de la roche dans lesquels peuvent circuler l'eau, le pétrole ou le gaz. SEM image (X54) of a reservoir sandstone: note the interstices where water oil or gas can circulate.

© Minefi

sphérique) mais surtout à recueillir le CO<sub>2</sub> émis par les sources massives industrielles pour le stocker à l'abri de l'atmosphère (capture et stockage de CO<sub>2</sub>), la voie privilégiée étant le stockage en couches géologiques profondes. Seule cette deuxième option peut permettre un stockage immédiat et permanent de grandes quantités de CO<sub>2</sub>.

Le recours à la capture et au stockage géologique de CO<sub>2</sub> s'avère être indispensable, en complément d'autres moyens, pour atteindre les objectifs de réduction d'ici à 2050. Il s'agit en fait de remettre dans le sous-sol, sous forme de CO<sub>2</sub>, une partie du carbone qu'on y a extrait sous forme d'hydrocarbures ou de charbon. La filière, aujourd'hui en plein développement, offre une solution de transition en attendant l'arrivée de nouvelles formes d'énergie non polluantes et des changements dans les modes de vie. Elle ne s'applique pour l'instant qu'aux émissions massives localisées (centrales thermiques, cimenteries, raffineries, usines sidérurgiques...), qui représentent tout de même la moitié des émissions liées à l'énergie. Mais elle possède aussi d'autres avantages. Elle devrait permettre le développement de la filière « charbon propre » et assurer un nouvel avenir au charbon dont les réserves mondiales sont importantes et bien réparties. Ce qui devrait faciliter considérablement le développement des pays les plus pauvres comme la Chine et l'Inde. De même l'utilisation des énergies non conventionnelles dont le potentiel est énorme (huile lourde et extra lourde, bitume, schiste bitumineux, hydrates de gaz) pourrait se développer. La capture et le stockage du CO<sub>2</sub> ouvrent également la voie à l'introduction de l'hydrogène comme nouveau vecteur énergétique, lequel peut ensuite être utilisé pour produire de l'électricité via des turbines ou des piles à combustibles. L'hydrogène n'existe pas à l'état naturel et sa production massive ne pourra se faire dans un premier temps qu'à partir de combustibles fossiles, comme c'est déjà le cas pour certains usages industriels.

“ La capture et le stockage géologique de CO<sub>2</sub> s'avère être un recours indispensable, en complément d'autres moyens, pour atteindre les objectifs de réduction d'ici à 2050. Il s'agit en fait de remettre dans le sous-sol, sous forme de CO<sub>2</sub>, une partie du carbone qu'on y a extrait sous forme d'hydrocarbures ou de charbon. ”

quasiment pas (gaz de préférence au charbon, nucléaire, énergies renouvelables : solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, biomasse) ; enfin, d'améliorer la gestion des stocks naturels de carbone (forêts, sols). Mais ces mesures préventives seront insuffisantes pour diviser par deux les émissions annuelles mondiales d'ici à 2050, dans un contexte de forte croissance démographique mondiale, d'augmentation de la demande énergétique des pays en développement (qui devrait être multipliée par un facteur 3 à 5 d'ici 2050), et de la place incontournable qu'occuperont encore les combustibles fossiles dans les prochaines décennies. Il sera donc également nécessaire d'agir en aval sur les émissions que l'on ne peut éviter grâce à des mesures que l'on pourrait qualifier de curatives. Elles visent à augmenter les réserves de carbone organique des forêts, des sols et des océans (séquestration dans la biomasse à partir de CO<sub>2</sub> atmo-

“ La filière, aujourd’hui en plein développement, offre une solution de transition en attendant l’arrivée de nouvelles formes d’énergies non polluantes et des changements dans les modes de vie. ”

Le passage à l’hydrogène permettra de résoudre aussi les émissions du transport, qui représentent 23 % des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>. En effet la capture de CO<sub>2</sub> ne peut pas s’appliquer aux sources d’émission mobiles et diffuses, mais pourra être mise en œuvre plus en amont dans les gros centres de production d’hydrogène qui permettront de substituer le litre d’essence par de l’électricité. Enfin le recours à la capture et au stockage de CO<sub>2</sub> peut favoriser le développement de nouveaux carburants, toujours carbonés mais plus propres et permettant de s’affranchir des hydrocarbures. Ainsi, la production de carburants synthétiques à partir de charbon pourrait se développer, avec capture et stockage de la moitié du carbone contenu dans le charbon. Par ailleurs, la production de biocarburants associée à la capture et au stockage de CO<sub>2</sub> aurait même l’avantage inouï d’épurer l’atmosphère puisque les trois quarts du carbone contenu dans la biomasse pourraient être stockés dans le sous-sol.

## Capter le CO<sub>2</sub>

La principale difficulté est liée à la faible concentration de CO<sub>2</sub> dans les fumées. Selon l’industrie concernée, cette teneur peut aller de quelques pour cent à 20 % des effluents. D’autres gaz, tels l’oxygène, la vapeur d’eau ou l’azote, se retrouvent dans le panache des fumées. Il serait impensable de vouloir tous les compresser pour les stocker, pour des raisons d’énergie et de place. Des méthodes de séparation sont donc nécessaires pour pouvoir capturer essentiellement le gaz carbonique. Des procédés industriels de séparation existent déjà sur le marché, puisque certaines industries comme la production d’ammoniac ou la production de gaz naturel doivent éliminer le CO<sub>2</sub>, sous-produit indésirable traditionnellement renvoyé à l’atmosphère alors qu’il pourrait être facilement stocké aujourd’hui.

Mais ces procédés induisent une surconsommation énergétique de 10 % et leur coût est très élevé (actuellement de l’ordre de 50 euros la tonne de CO<sub>2</sub> évitée, soit 80 % du coût total de la chaîne capture-transport-stockage). Des efforts de recherche et développement intensifs sont en cours avec pour objectif d’améliorer les technologies de capture pour les rendre plus efficaces et plus rentables. Ils explorent trois voies. La première récupère le CO<sub>2</sub> dilué dans les fumées de combustion (capture post-combustion). La seconde consiste à réaliser une combustion à l’oxygène pur et non pas à l’air, de manière à obtenir des fumées



concentrées en CO<sub>2</sub> (capture par oxy-combustion). La troisième vise à transformer le combustible fossile en CO<sub>2</sub> et hydrogène, lequel sera utilisé pour produire de l’énergie tandis que le CO<sub>2</sub> pourra être facilement récupéré (capture pré-combustion).

## Transporter le CO<sub>2</sub>

Après sa capture, le gaz carbonique doit être dirigé vers son lieu de stockage. Compte tenu des volumes, les seules solutions possibles à grande échelle passent par l’usage des pipelines ou des navires. Dans les canalisations terrestres et maritimes, le CO<sub>2</sub> sera transporté essentiellement en phase dense sous une pression supérieure à 74 bars (état supercritique). 3 000 km de pipelines de CO<sub>2</sub> sont déjà opérationnels dans le monde (depuis 1980), essentiellement en Amérique du Nord, car le CO<sub>2</sub> est utilisé pour la récupération assistée de pétrole. Des réseaux pourraient être construits sur le modèle de distribution du gaz naturel. Dans le cas du transport maritime, avec des bateaux du même type que ceux utilisés pour le gaz de pétrole liquéfié (GPL), le CO<sub>2</sub> peut être transporté sous phase liquide à pression modérée (7 bars) et

▲ **Le premier pilote industriel de capture sur fumées sera installé dans la centrale au charbon d’Esbjergværket au Danemark. Capacité prévue 1 tonne de CO<sub>2</sub> par heure.**

*The first industrial pilot for flue-gas capture is to be installed at the coal-burning Esbjergværket power station in Denmark. Expected capacity is one ton of CO<sub>2</sub> per hour.*

© Elsam



basse température. Depuis 1989 en Norvège, quatre navires transportent du CO<sub>2</sub> entre des sites de production (usines d'ammoniac) et des villes portuaires où le CO<sub>2</sub> est utilisé pour la production alimentaire. Mais des navires de capacité beaucoup plus importante devront être construits pour transporter du CO<sub>2</sub> à des fins de stockage. Les coûts du transport dépendent essentiellement de la distance et sont de l'ordre de 0,5 à 10 euros la tonne de CO<sub>2</sub> pour 100 km de transport. Ils représentent de 0 à 25 % du coût total de la chaîne capture-transport-stockage, sachant qu'ils peuvent être nuls dans les conditions favorables où le stockage peut se faire sur le site d'émission.

## Stocker le CO<sub>2</sub>

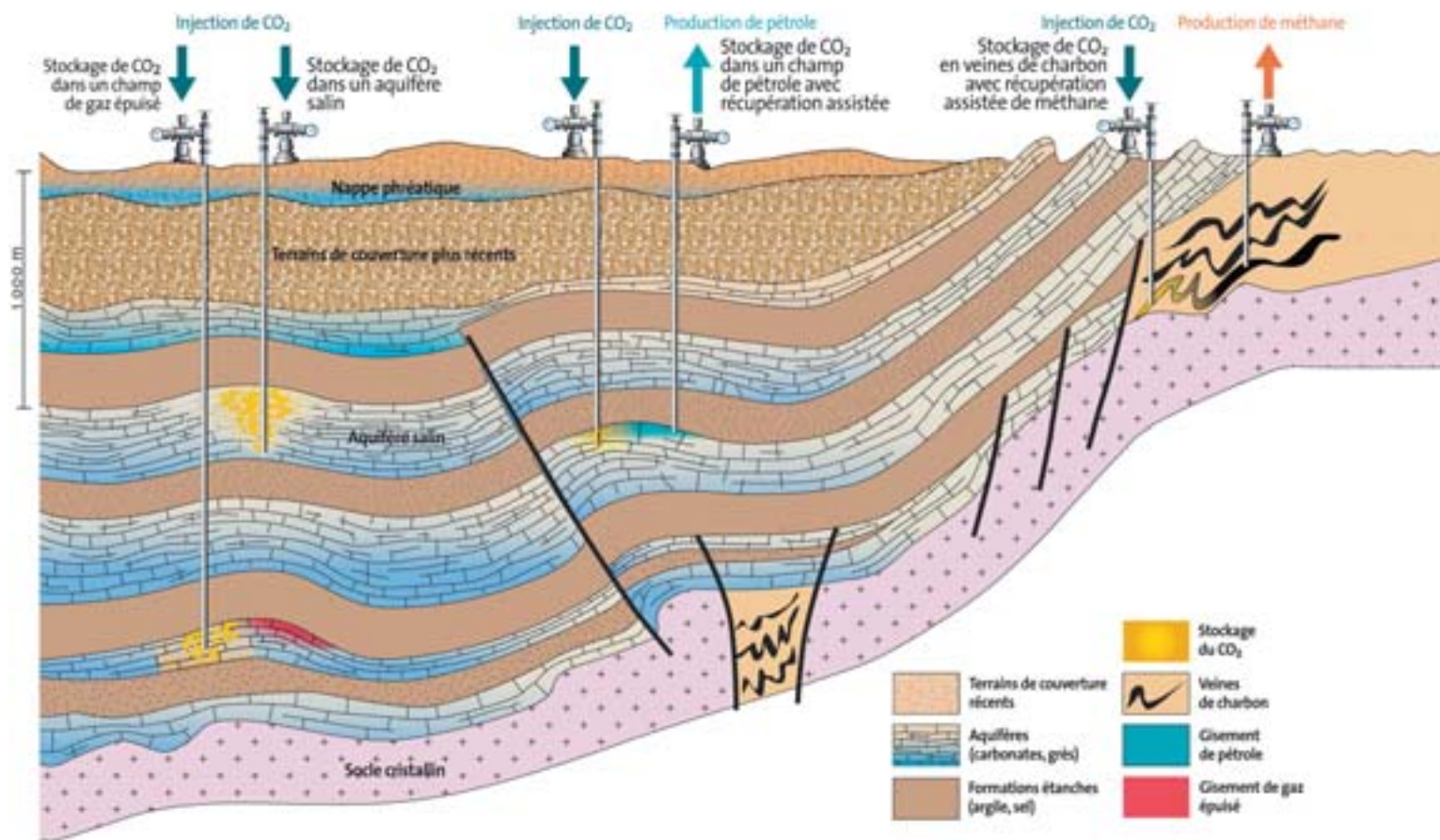
Le CO<sub>2</sub> doit pouvoir être stocké en grandes quantités et pendant au moins plusieurs siècles si l'on veut résoudre le problème climatique. Les formations géologiques profondes s'y prêtent parfaitement. Trois options sont privilégiées. Les aquifères profonds offrent les capacités de stockage les plus importantes (de l'ordre de 10 000 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub>) et sont bien répartis et très étendus géographiquement. Constitués de roches perméables et poreuses remplies d'eau salée impropre à la consommation, le CO<sub>2</sub>

peut être piégé dans les pores des roches en chassant l'eau. Localement ces aquifères contiennent des gisements d'hydrocarbures qui sont la preuve d'une structure de piège, d'où la deuxième option qui est le stockage dans des gisements de pétrole et de gaz naturel épuisés (capacités de l'ordre de 1 000 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub>). La troisième option est le stockage dans des veines de charbon profondes inexploitées, qui bénéficie de l'affinité du CO<sub>2</sub> pour le charbon (capacités de l'ordre de 100 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub>). Ces deux dernières options offrent des potentiels de stockage beaucoup plus limités, en terme de capacité et en terme de répartition géographique, mais elles permettent la récupération supplémentaire de pétrole ou de gaz naturel qu'on pourra commercialiser. L'injection de CO<sub>2</sub> dans les réservoirs d'hydrocarbures est une méthode de récupération assistée, et dans le cas du charbon, permet de chasser le gaz naturel qui y est souvent piégé (grisou).

Les capacités de stockage dans le sous-sol sont donc considérables quand on les compare aux 23 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> émises annuellement dans le monde par les activités humaines liées à l'énergie. La technologie de capture et de stockage de CO<sub>2</sub> est donc bien de nature à jouer un rôle significatif dans la lutte contre le réchauffement climatique.

**Les différents types de stockage géologique du CO<sub>2</sub>.**  
*Various possibilities for the geological storage of CO<sub>2</sub>.*

Source : BRGM



## Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs

Établissement public industriel et commercial, placé sous la tutelle des ministères chargés de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement

Trois missions



### Industrie

Gestion, sûreté, mémoire

### Recherche

Expérimentations, partenariats, projets

### Information

Dialogue, clarté, inventaire

Certifications ISO 9001 et 14001



Parc de la Croix Blanche  
177, rue Jean-Monnet  
92238 Châtigny-Malabry Cedex  
Tél: 01 48 11 80 00  
www.andra.fr

## A long terme, en toute transparence

Case de stockage: Centre de l'Atelier / Crédits photos: André - Ph. Demal / D. Gros / Films R. Leffrand



◀ Installation de capture du CO<sub>2</sub>, centrale de Warrior Run (Etats Unis).  
CO<sub>2</sub> capture at the Warrior Run plant (USA).

© AES



## ► LE DÉFI CARBONE DE L'INDUSTRIE MINÉRALE :

François Clin - francois.clin@technologie.gouv.fr

Les filières industrielles de valorisation des ressources minérales (hors combustibles fossiles) sont responsables de près de 10 % des émissions de gaz à effet de serre sur le territoire français. Ce secteur présente de réelles opportunités pour l'optimisation d'un développement raisonné de la gestion du cycle du carbone.

Tout d'abord ses unités comptent parmi les premières en consommations d'énergie n'ayant pas à la redistribuer autrement que sous forme de matériaux plus ou moins élaborés. Il sera donc l'un des premiers secteurs industriels à réellement payer la taxation environnementale locale de l'énergie sans la transférer à un consommateur final, ses produits étant de plus mondialisés sur les marchés internationaux. Pour assurer sa compétitivité, il aura recours à ses

talents tout particuliers dont il a déjà fait démonstration dans certaines démarches pionnières :

> maîtrise du cycle du carbone comme il en a été des cycles des matériaux (règle des 3R : réduction, récupération, mais aussi recyclage du carbone qui peut aussi bien s'imaginer qu'une filière hydrogène),

> connaissances des corrélations géochimiques entre produits carbonatés du sous-sol et ressources à diversifier et économiser en alcalins et alcalino-terreux face à l'acidification de l'oxydation biologique vitale :

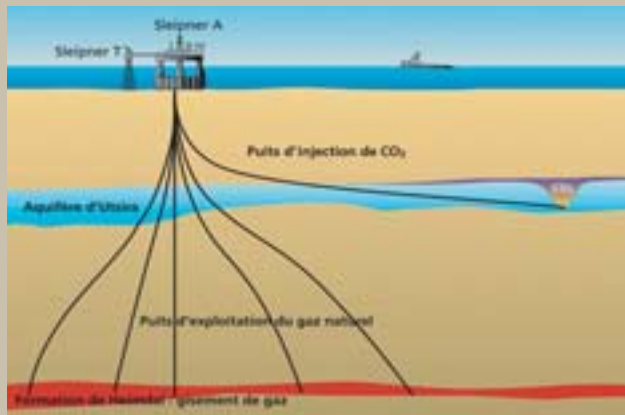
- économie du calcium des liants hydrauliques,
- tris physiques non destructifs des gangues carbonatées des minerais notamment de phosphate,
- séquestrations par carbonatations secondaires de résidus de valorisation

des métaux dans les roches basiques, ou «recarbonatation» des cendres..., > génie géologique proposant les volumes considérables du sous-sol non seulement en stockage mais aussi en réacteurs susceptibles de tirer bon profit de l'énergie (thermique ou chimique) des roches, biomasse du milieu souterrain pouvant s'imaginer mis en culture...

Ainsi, même pour des industries parfois perçues à tort comme traditionnelles, les barrières de l'utopie technologique reculeront vite devant l'ampleur des enjeux du changement climatique. ■

### François Clin

DIRECTEUR ADJOINT - DÉPARTEMENT  
ÉNERGIE, TRANSPORTS, ENVIRONNEMENT ET  
RESSOURCES NATURELLES  
MINISTÈRE DÉLÉGUÉ À L'ENSEIGNEMENT  
SUPÉRIEUR ET À LA RECHERCHE



**Premier site mondial de stockage de CO<sub>2</sub> en aquifère profond à Sleipner, en mer du Nord (Norvège). Le gaz naturel est extrait à 2 500 m de profondeur depuis la plate-forme de forage et fait l'objet d'une séparation du CO<sub>2</sub> qu'il contient sur la plate-forme de traitement du gaz (Sleipner T).**

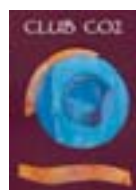
**Le CO<sub>2</sub> est alors injecté dans l'aquifère sableux d'Utsira situé à 1 000 m de profondeur.**

*The world's first site of CO<sub>2</sub> storage in a deep saline aquifer, the Norwegian Sleipner site in the North Sea. The natural gas is tapped at a depth of 2500 m beneath the drilling platform and separated from CO<sub>2</sub> on the gas-processing platform (Sleipner T). The CO<sub>2</sub> is then injected into the sandy Utsira aquifer at a depth of 1000 m.*

Source : Statoil

Le CO<sub>2</sub> doit être injecté au-delà de 800 m de profondeur afin d'atteindre les conditions de pression et de température qui déterminent son passage à l'état supercritique (plus de 31 °C et 73 bars). Dans cet état, le CO<sub>2</sub> est dense et occupe beaucoup moins de volume qu'à l'état gazeux. Il est donc stocké essentiellement sous forme dense dans la porosité de la roche ou adsorbé sur le charbon. Pour garantir l'étanchéité du stockage, il faut s'assurer de la présence, au-dessus de la roche réservoir, d'une couche écran imperméable composée d'argiles ou de sels empêchant toute remontée du CO<sub>2</sub> vers la surface. Au cours du temps, une partie du CO<sub>2</sub> peut se dissoudre dans les eaux interstitielles et entraîner des réactions géochimiques avec les minéraux des roches. Ces processus, bien que lents, engendrent un piégeage de CO<sub>2</sub> sous forme dissoute, et même sous forme minérale si les conditions sont propices à la formation de minéraux carbonatés. Cela accroît la capacité du stockage et sa sécurité. Toutefois il faut vérifier que ces réactions géochimiques n'aient pas de conséquences géomécaniques indésirables.

## ► L'IMPLICATION DE LA FRANCE



La France joue en Europe un rôle important dans la recherche sur la capture et le stockage du CO<sub>2</sub>, et ceci depuis le premier projet européen "The underground disposal of carbon dioxide" (Joule II Project 1993-1995) qui a permis de démontrer la préfaisabilité de cette technologie et auquel le BRGM a participé. Depuis plus de dix ans, des équipes françaises participent ainsi à la plupart des projets européens et à certains projets internationaux, en particulier ceux liés aux premières applications industrielles (Sleipner, Weyburn). Le

BRGM, l'IFP et quelques industriels (Gaz de France, Alstom, Total, Air Liquide, Schlumberger) sont membres de CO<sub>2</sub>Net, réseau thématique européen sur la capture et le stockage de CO<sub>2</sub>. Le BRGM et l'IFP font aussi partie de CO<sub>2</sub>GeoNet, réseau d'excellence sur le stockage géologique de CO<sub>2</sub> qui a pour but de favoriser l'intégration et la coordination de 13 instituts de recherche européens dont l'expertise est reconnue au niveau international.

A l'échelle nationale, les efforts ont commencé à se structurer à partir de 2001. Le Club CO<sub>2</sub> est né en 2002 à l'initiative de l'ADEME, avec l'appui de l'IFP et du BRGM qui assurent son

secrétariat. Réunissant les acteurs majeurs du monde industriel et de la recherche concernés par la capture et le stockage du CO<sub>2</sub>, il répond à la nécessité de mieux fédérer les actions nationales, tout en leur donnant une meilleure visibilité. La France participe au programme de l'Agence Internationale de l'Energie sur la réduction des gaz à effet de serre (IEA GHG). Elle est également membre du CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum), un forum intergouvernemental créé sur initiative américaine pour promouvoir les technologies performantes et économiques de capture, transport et stockage du CO<sub>2</sub>. ■



## CO<sub>2</sub> capture and geological storage

The carbon dioxide given off during the intensive exploitation of fossil energy since the industrial revolution is the main culprit for global warming. The temperature of planet Earth could rise by 1.4 to 5.8 degrees during the 21<sup>st</sup> Century. It is thus imperative that we reduce our greenhouse gas emissions if major disasters are to be averted.

There are no miracle solutions to be had to win this battle, only an assortment of channels to explore that call upon precautionary and treatment measures: energy savings, renewable energy, clean transport, the fight against deforestation, etc. In a context of booming world population, growing energy demands by developing countries, and in view of the unavoidable role that fossil fuels are yet to play over the coming decades, the capture and storage of CO<sub>2</sub> constitutes a vital approach if we are to succeed in cutting our worldwide emissions in half between now and 2050. Since year 2000, a true momentum has been developing on the international scene in support of finding technological solutions. Research programmes and industrial pilot projects are proliferating the world over. Their aim is to overcome the economic and technical stakes associated respectively with CO<sub>2</sub> capture and CO<sub>2</sub> storage in geological formations, thus guaranteeing the efficiency and security of this technology over centuries to come. Such technologies could begin to unfold from year 2010.

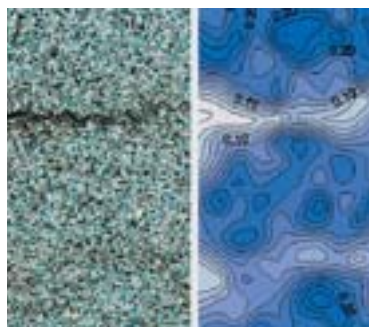
“ Les gisements naturels de CO<sub>2</sub> qui existent dans le sous-sol de nombreux pays nous montrent que les formations géologiques peuvent stocker efficacement du CO<sub>2</sub> pur pendant des milliers et millions d’années. ”

Le stockage du gaz carbonique est un domaine bénéficiant déjà d’acquis technologiques et scientifiques importants, même s’il reste à opérer un transfert d’échelle pour garantir la sécurité du stockage sur de grandes surfaces et sur le long terme.

Des expériences pionnières de stockage de CO<sub>2</sub> de taille industrielle ont vu le jour ces dernières années : Sleipner en aquifère profond offshore en Norvège (1 Mt CO<sub>2</sub> par an depuis 1996), Weyburn en réservoir pétrolier onshore au Canada (1,8 Mt CO<sub>2</sub> par an depuis 2000), In Salah en aquifère profond onshore en Algérie (1 Mt CO<sub>2</sub> par an depuis 2004). Les gisements naturels de CO<sub>2</sub> qui existent dans le sous-sol de nombreux pays nous montrent que les formations géologiques peuvent stocker efficacement du CO<sub>2</sub> pur pendant des milliers et millions d’années. Le gisement de Montmiral dans la Drôme est étudié par le BRGM et les chercheurs européens pour comprendre le comportement à long terme du CO<sub>2</sub> dans le sous-sol. Les coûts du stockage sont faibles ramenés à la tonne de CO<sub>2</sub> : de 1 à 10 euros par tonne de CO<sub>2</sub>, soit actuellement 1 à 15 % du coût total, de la chaîne capture-transport - stockage.

## Une mobilisation internationale

Depuis l’année 2000, une dynamique s’est enclenchée au niveau international en faveur de la capture et du stockage géologique du CO<sub>2</sub>. Les projets de recherche et les pilotes industriels se multiplient dans le monde (Europe, Australie, Canada, Etats-Unis, Japon). Ils ont pour but de relever les enjeux économiques de la capture et les enjeux techniques du stockage, c’est-à-dire de garantir son efficacité et sa sécurité pendant plusieurs siècles. Les aspects juridiques et réglementaires sont à l’étude. La communication avec le public a été engagée. Le rapport spécial du GIEC (Voir J. Varet, ce numéro, p. 72 à 76) sur la capture et le stockage du CO<sub>2</sub> paru fin 2005 va permettre une prise en compte de la technologie au niveau politique dans le cadre de la Convention Cadre sur les changements climatiques des Nations-Unies. Des incitations économiques sont en train de voir le jour par le biais du système européen d’échange de quotas d’émission de CO<sub>2</sub>, qui a démarré en janvier 2005, puis du marché international prévu par le Protocole de Kyoto à l’horizon 2008. Grâce aux efforts de R&D et de standardisation, le coût moyen actuel de la chaîne capture-transport-stockage devrait diminuer, passant de 60 euros la tonne de CO<sub>2</sub> évitée, à 15 euros. Progressivement, un consensus à l’échelle planétaire se fait jour autour de la nécessité de mettre en œuvre le plus rapidement possible la filière de capture et de stockage du dioxyde de carbone. Elle pourrait se déployer à partir de 2010, recours indispensable en complément à d’autres moyens si l’on veut avoir divisé par deux par rapport à leur niveau de 1990 en 2050 les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> et espérer ainsi écarter la menace d’un bouleversement climatique de grande ampleur dont les conséquences pourraient être catastrophiques pour les populations. ■



▲  
**Carte de répartition de la porosité à l’échelle centrimétrique dans une lame mince de grès.**  
 (Sur la photo de gauche, la porosité apparaît en bleu).  
*Map of porosity distribution at cm-scale and the corresponding sandstone thin section.*  
*(On the left-hand photo, porosity is shown in blue).*

© CO<sub>2</sub> capture project