

Réduire les émissions de gaz à effet de serre

La capture et

le stockage géologique du CO₂



ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Collection

Les enjeux des Géosciences

Directeur de collection :

Jacques Varet

Comité de rédaction :

ADEME : Agnès Heyberger, Arnaud Mercier.

BRGM : Isabelle Czernichowski, Pierre Vassal.

IFP : Pierre le Thiez, Patrick Boisserpe.

Avec le concours des services et directions de l'ADEME, du BRGM et de l'IFP.

Rédaction : Martine Castello, Michel Bouchi-Lamontagne.

Conception et réalisation : BL Communication.

Impression : Imprimerie Nouvelle

ISBN ADEME : 2-86817-799-9 • ISBN BRGM : 2-7159-0969-1 • ISBN IFP : 2-901638-09-0

Tous droits réservés. Reproduction partielle sur autorisation expresse.

Dépôt légal, septembre 2005.

A D E M E



Avant-propos



Sur notre planète Terre, le cycle du carbone joue – comme celui de l'eau – un rôle majeur, pour les systèmes vivants en général et l'espèce humaine en particulier. Dans ces conditions, une humanité responsable doit considérer avec attention les effets de ses choix de développement, notamment lorsqu'ils deviennent assez significatifs pour peser sur les grands équilibres naturels du "système Terre".

Au cours de son histoire géologique mouvementée, notre planète a stocké dans son enveloppe solide la plus périphérique (appelée lithosphère) une grande quantité de composés du carbone, principalement sous deux formes : les carbonates d'une part, qui sont omniprésents et fort utilisés (pierres de construction, minéraux industriels, ciments...) et les combustibles fossiles d'autre part. Présents sous forme solide (charbon, lignite, tourbe, schistes bitumineux), liquide (pétrole) ou gazeuse (gaz naturel), ces derniers sont massivement exploités depuis les débuts de l'ère industrielle.

La fin du XX^e siècle marque une étape. Le développement de l'humanité est devenu tel que son impact sur les milieux naturels, tant biologiques que physiques, devient significatif. Parallèlement, la connaissance de la planète et des interactions entre ses enveloppes solides, liquides et gazeuses a progressé grâce aux travaux de recherche géologiques, géophysiques, atmosphériques et spatiaux. En même temps qu'elle parvient à exploiter une part importante des ressources fossiles, l'humanité en vient à réaliser que les gaz émis dans l'atmosphère par ce déstockage massif de carbone sont la cause de dérèglements climatiques importants.

La Convention Climat signée par 166 pays à la suite du Sommet de la Terre à Rio en 1992 traduit la réalité politique de la prise de conscience de ces risques climatiques. Sur le principe, un accord s'est fait sur la nécessité pour l'humanité de réduire globalement les émissions atmosphériques de gaz à effet de serre. On connaît

les débats soulevés par le protocole de Kyoto qui n'a pas été ratifié par les USA, mais est néanmoins entré en vigueur. Dans le même temps, les pays émergents, comme la Chine, l'Inde ou le Brésil, ainsi que les pays en voie de développement vont tendre à augmenter leurs propres émissions.

Dans ces conditions, la poursuite du développement de l'humanité, pour être soutenable et durable, nécessite la mise en œuvre de toutes les options technologiques assurant des formes de production et de consommation d'énergie à la fois sobres et non émissives en gaz à effet de serre. Dans la mesure où l'utilisation des ressources fossiles, y compris pour la production d'hydrogène, risque de s'avérer inévitable encore pendant plusieurs décennies, notre société va devoir faire appel à des formes d'exploitation "propres" des hydrocarbures ainsi que du charbon.

À côté des indispensables mesures de réduction des consommations d'énergie et de développement des énergies renouvelables, nous sommes persuadés que le stockage géologique – dès lors que les conditions de sécurité seront validées et les sites de stockage identifiés – s'imposera comme une option incontournable. Tant que les combustibles fossiles seront exploités, il faudra qu'ils le soient selon des techniques compatibles avec des conditions climatiques propices à l'humanité.

L'ADEME, le BRGM et l'IFP, par la réalisation de cette brochure, ont souhaité présenter l'état des connaissances déjà acquises, ainsi que les défis technologiques à relever, pour que la capture et le stockage géologique de CO₂ apportent une réponse concrète permettant de faire face aux risques de changement climatique.

*Michèle Pappalardo
Présidente de l'ADEME*

*Philippe Vesseron
Président du BRGM*

*Olivier Appert
Président de l'IFP*

SOMMAIRE

La réduction des émissions de CO₂ : une nécessité, des solutions3

- La Terre chauffe4
- Une mobilisation planétaire indispensable6
- La volonté d'agir8
- Capturer et stocker le CO₂10

De la cheminée au lieu de stockage13

- Où capturer le CO₂ ?14
- Comment capturer le CO₂ ?15
- Transporter le CO₂17

Quelles options pour le stockage du CO₂ ?19

- Où stocker de telles quantités ?20
- Des acquis, des expériences22
- Stockage en aquifères profonds24
- Stockage en réservoirs pétroliers et gaziers26
- Stockage en veines de charbon28
- La séquestration minéralogique30
- La maîtrise des impacts à long terme31

Perspectives et grands projets33

- Performances et coûts des technologies34
- Développement d'outils d'aide à la décision34
- Une filière à développer35
- L'engagement de la France40

Le Club CO₂42

Glossaire44



© Météo-France



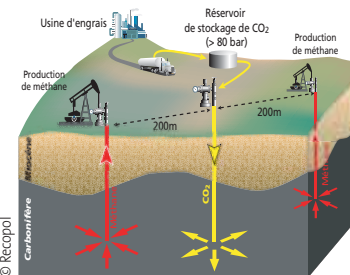
© Southern Company Services



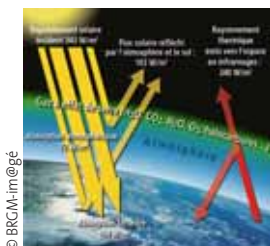
© 2002 Northern Pipeline Projects



© Vrin Hagen



© Recopol



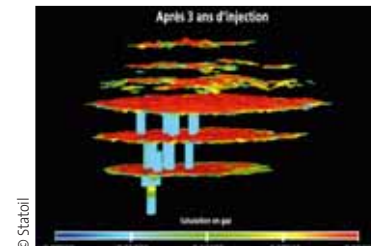
© BRCM-im@ge



© AES



© Médiathèque Gaz de France / B. Porte



© Statoil



© Burlington Resources



© Advanced Resources International



I

La réduction des émissions de CO₂ : une nécessité, des solutions

- La Terre chauffe
- Une mobilisation planétaire indispensable
- La volonté d'agir
- **Capter et stocker le CO₂**

La réduction des émissions de CO₂ : une nécessité, des solutions

Au cours du dernier siècle, le développement rapide de l'économie a été pour une bonne part basé sur un déstockage massif de carbone fossile (pétrole, gaz, charbon) émis sous forme de CO₂ dans l'atmosphère.

La Terre chauffe

Une situation urgente

Ce n'est plus un secret pour personne, la Terre chauffe anormalement. Depuis le début de l'ère industrielle, sa température est montée de 0,6 °C en moyenne et le niveau des mers s'est élevé de 10 à 20 cm. Déjà nous subissons les premiers effets négatifs : climat désordonné, inondations, canicules, sécheresses, fonte des glaciers, élévation du niveau des mers, modification de la flore et de la faune. Les coupables identifiés par la

grande majorité des experts de la planète sont les gaz dits "à effet de serre" (GES*), dont principalement le gaz carbonique ou dioxyde de carbone qui engendre environ 55 % de l'effet de serre anthropique. Produit en grande quantité par les activités humaines (transport, habitat et industrie), ce gaz s'échappe essentiellement lors de la combustion des énergies fossiles (charbon, pétrole ou gaz). En un siècle, les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère ont augmenté de 50 % et celle du CO₂ de 31 %.

Les modèles prévoient l'élévation du niveau de la mer de 9 à 88 cm d'ici 2100 à cause de la dilatation thermique des couches supérieures de l'océan et de la fonte des glaciers.

Évolution des températures de l'air et de la concentration en CO₂ durant les 400 derniers millénaires :

la température moyenne du globe a suivi une courbe parallèle à celle de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère. Mais, depuis 1750 les concentrations en CO₂ n'ont pas cessé d'augmenter (+31 %) pour atteindre, aujourd'hui, 365 ppmv (parties par millions en volume).



© Polfoto

Certes, les quantités de gaz carbonique émises par les hommes (30 milliards de tonnes de CO₂ par an, soit 8,1 milliards de tonnes de carbone) constituent une faible part de l'ensemble du cycle annuel du carbone, mais les puits naturels de carbone* que sont la biosphère et les océans n'en résorbent que la moitié. Le surplus s'accumule année après année dans l'atmosphère terrestre en perturbant les délicats mécanismes du climat.

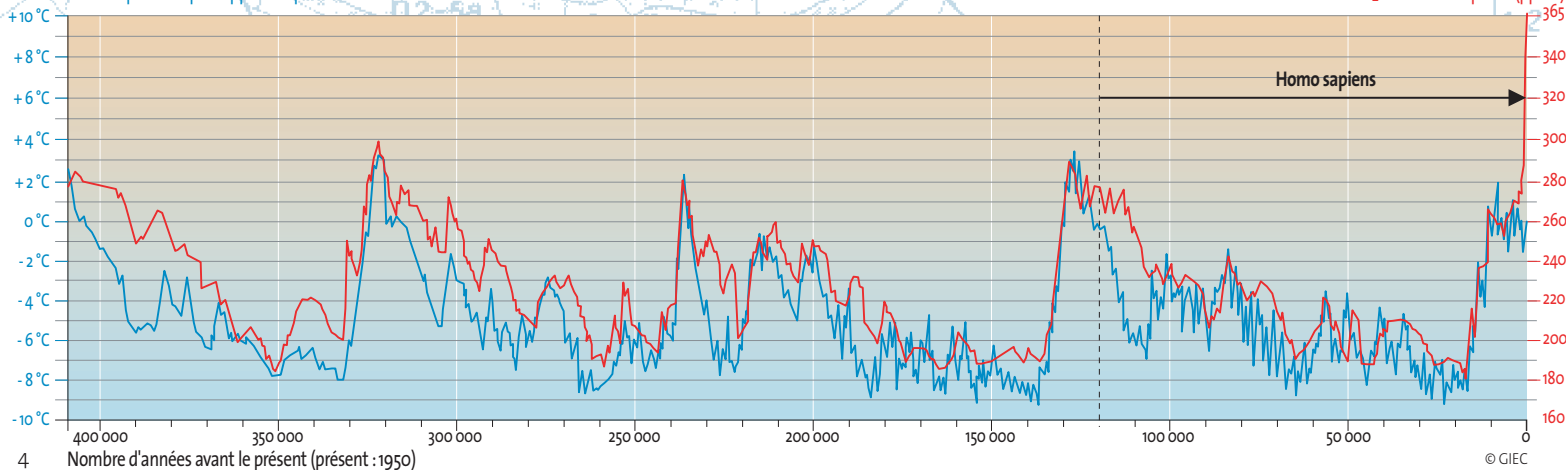
Si nous ne faisons rien ou pas suffisamment pour réduire nos émissions de CO₂ et mieux gérer notre consommation d'énergies fossiles, les experts prévoient pour 2100 une augmentation de la température moyenne de 2 à 6 °C, et une élévation de 9 à 88 cm du niveau de la mer, avec toutes les conséquences négatives qui en découlent.

L'effet de serre

Une fine couche de gaz enveloppe notre planète comme une couverture, en retenant une partie du rayonnement solaire. Ce phénomène baptisé "effet de serre" fait que la température planétaire moyenne est toujours restée, quelles que soient les époques, propice à la vie. Sans l'effet de serre, la température de la Terre ne dépasserait pas les -18 °C ! Ainsi, sur Mars où les gaz à effet de serre sont absents (mais qui est aussi située plus loin du soleil), la température est de -50 °C. La vie ne trouve pas non plus son compte avec trop d'effet de serre. Ainsi en est-il de Vénus, où l'atmosphère est très chargée en gaz carbonique et la température atteint 420 °C à sa surface. La Terre est donc une exception dans notre système solaire. Une exception propice à l'évolution de la vie et de

* Voir glossaire in fine.

Variation de température par rapport au présent



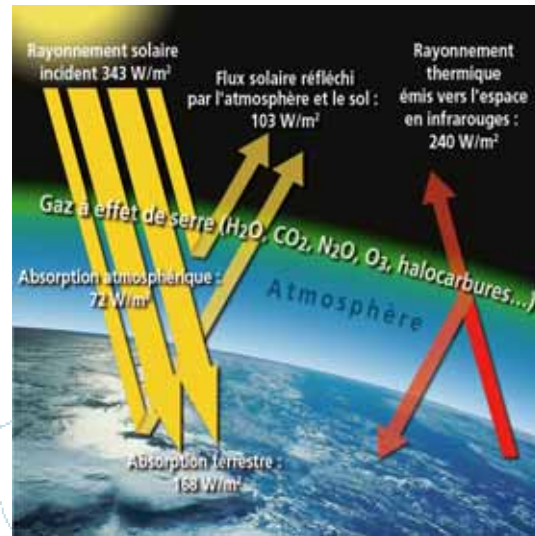
© GIEC

la conscience. Mais depuis un siècle, les activités humaines ont perturbé l'équilibre entre le rayonnement solaire entrant et sortant. Et si nous ne faisons rien, la situation va encore se dégrader : la durée de vie du gaz carbonique dans l'atmosphère étant d'une centaine d'années, les gaz produits aujourd'hui seront encore là dans un siècle !

▼ Le CO₂ engendre 55 % de l'effet de serre anthropique.



© F. Von Martens 1850 © Ed. Photo. Gabler 1910 © Ed. Otto Süssli 1985 © CNRS, X. Leroux © Polfoto ©CNRS, A.R. Devez



D'après GIEC

Le cycle naturel du carbone

Le cycle naturel du carbone joue un rôle essentiel dans l'effet de serre. Quatorzième élément constitutif de notre planète en termes d'abondance, le carbone est omniprésent dans notre environnement. De tous les éléments, il est unique pour la variété des produits qu'il peut former. Il se retrouve dans l'atmosphère sous forme de gaz carbonique ou de méthane, dissous dans les océans, stocké dans la matière organique (végétaux, bois, combustibles fossiles, etc.) et dans les roches sous forme de carbonates. Le gaz carbonique est prélevé dans l'atmosphère par les plantes, les bactéries et le microplancton grâce à la photosynthèse. Ces organismes absorbent le carbone présent dans le CO₂, et rejettent l'oxygène. Le processus inverse

se produit par le biais de la respiration ou de la décomposition de la matière organique. La respiration absorbe l'oxygène et rejette du gaz carbonique dans l'atmosphère. Le cycle lié à la vie permet, en l'absence de perturbations par les activités humaines, de maintenir un bilan carbone équilibré sur la planète car la masse de gaz carbonique envoyée dans l'atmosphère est égale à celle prélevée par les végétaux. Le système est également régulé par le phytoplancton et l'océan qui absorbe le gaz carbonique par photosynthèse ou dissolution, ce qui a permis à la Terre de conserver un bilan carbone équilibré à travers les siècles malgré les éruptions volcaniques ou la déforestation. Mais, depuis le début de l'ère industrielle, ces cycles naturels sont perturbés par les activités humaines qui puisent le carbone dans le sous-sol (hydrocarbures, charbon) et le rejettent dans l'atmosphère après combustion. Aujourd'hui, les scénarios sur l'évolution du climat sont encore incertains, car le cycle du carbone fait appel à des mécanismes complexes. Ils agissent en milieu terrestre et océanique où les réactions

3,5 milliards de tonnes de carbone de trop !

Les émissions mondiales de CO₂ 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.

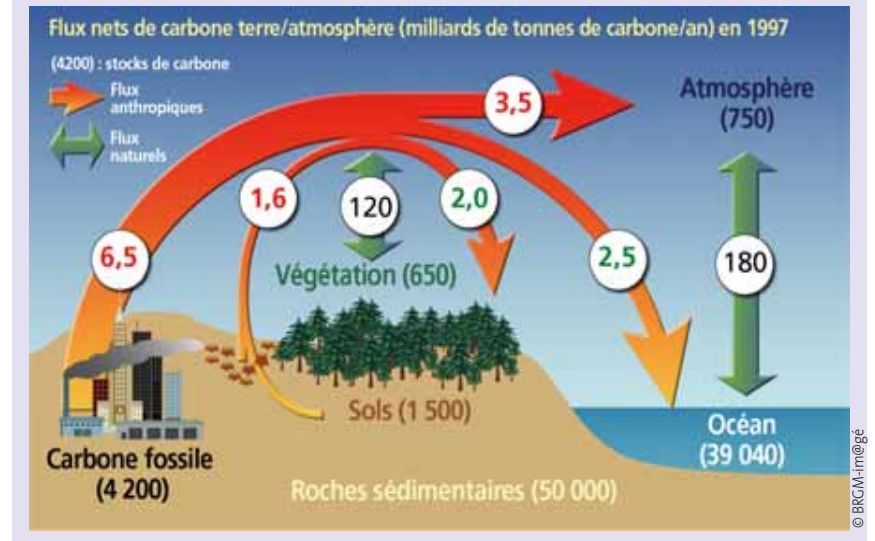
Et donc, chaque année, 3,5 Gt de carbone viennent s'accumuler dans l'atmosphère et perturber le climat.

chimiques, biologiques et inorganiques qui entrent en jeu sont très interdépendantes. Alors que l'on commence à peine à les étudier et à les comprendre, de nombreuses interrogations demeurent, notamment sur le temps de recyclage du CO₂ par les océans et la biomasse. Une certitude reste cependant : le climat se réchauffe et va se réchauffer de plus en plus si nous ne faisons rien pour maîtriser nos émissions.

L'évolution du glacier du Rhône en Suisse photographié en 1850, 1910 et 1985. Le climat se trouve également affecté (sécheresse, ouragan...).

Un équilibre précaire

La biosphère et les océans sont actuellement capables d'absorber la moitié des surplus de gaz carbonique émis par les activités humaines. Mais les puits de carbone* que sont les forêts et les océans semblent posséder des limites. Selon le GIEC*, un phénomène de saturation est possible. Associé à une augmentation de la température, il pourrait conduire à un relâchement massif et brutal de CO₂ dans l'atmosphère et finir par amplifier le phénomène au lieu de le réguler en partie.



© BRGM-Im@gé

Une mobilisation planétaire indispensable

L'intuition d'Arrhenius

Il y a plus d'un siècle que l'idée est dans l'air ! En 1895, le savant Arrhenius (1859-1927), 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. Ce n'est qu'un siècle plus tard que sa mise en garde atteindra la sphère politique sur la scène internationale. Car jusqu'à ces dernières années, le réchauffement planétaire – et tout spécialement ses causes anthropiques – ne faisaient pas consensus dans la communauté scientifique internationale. Les modèles n'étant pas assez performants pour vérifier l'intuition d'Arrhenius.

Il faudra attendre les avancées technologiques, mais aussi l'acquisition de nombreuses données sur le climat passé ou le cycle du carbone, pour lui donner raison. En 1988, la création du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC*) par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) marque un réel tournant. Ses 2 500 scientifiques dûment mandatés par les Nations unies ont pour mission de rassembler les données scientifiques pertinentes et d'en faire la synthèse. Le GIEC a aussi la délicate tâche de formuler des stratégies de prévention. Ses rapports publiés régulièrement font aujourd'hui autorité. Ils sont hélas de plus en plus alarmants.



© Nobel Fondation

▲ Dès 1895, le savant suédois Svante Arrhenius, avait prévu que l'utilisation d'énergie fossile pouvait augmenter l'effet de serre.



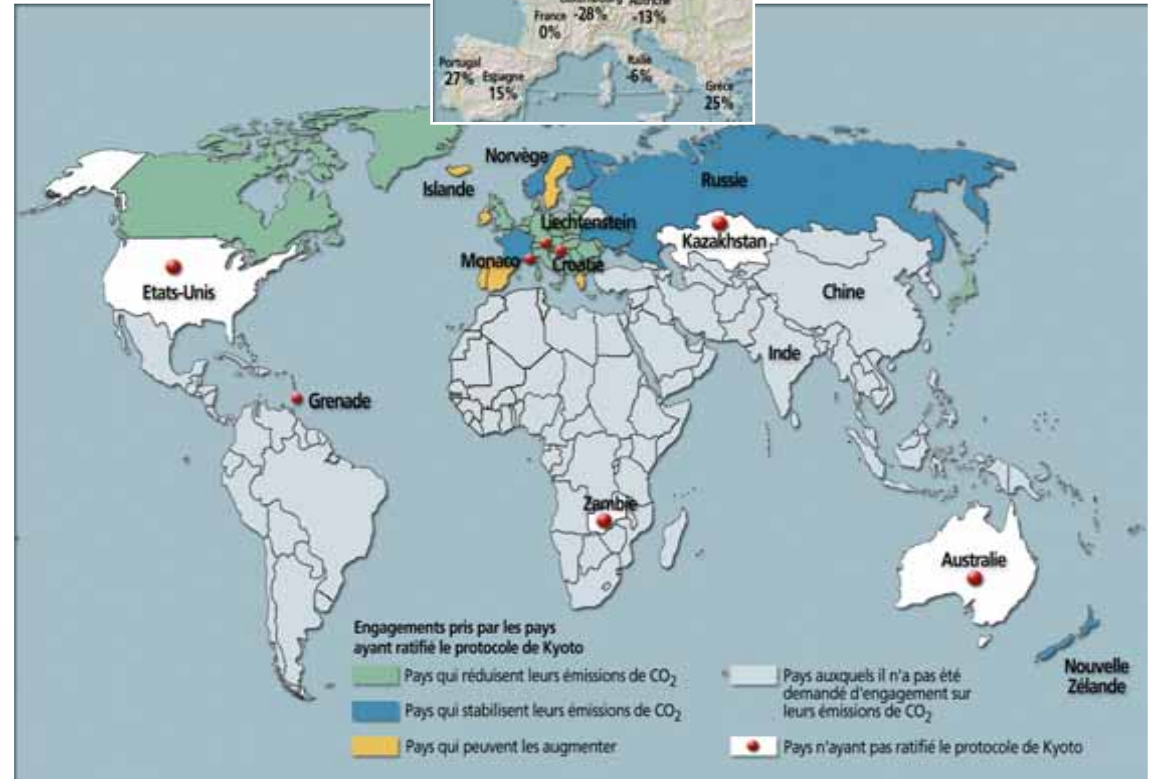
© Agence Gamma

▲ Signé le 11 décembre 1997, le protocole de Kyoto est entré en vigueur le 16 février 2005. Il est le seul cadre international existant pour lutter contre la menace de changement climatique.

Les objectifs pour les pays formant l'Europe des 15 ne sont pas uniformes : ils varient de - 21 % pour l'Allemagne et le Danemark à + 27 % pour le Portugal ou + 25 % pour la Grèce et sont stables pour la Finlande et la France.



Les engagements pris par les pays ayant ratifié le protocole de Kyoto
Une quarantaine de pays industrialisés s'engagent à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre de 5,2 % en moyenne entre 2008 et 2012, par rapport aux niveaux de 1990, qui se traduit par une baisse de 8 % pour l'Europe.

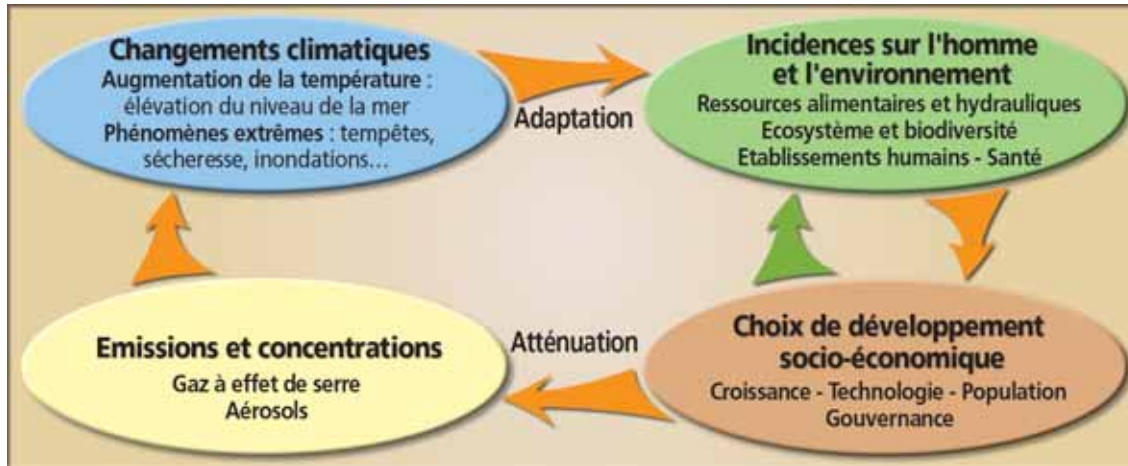


© AIE

La mobilisation internationale

En mars 1989 à La Haye, à l'initiative de la France, des Pays-Bas et de la Norvège, 24 chefs d'État s'engagent symboliquement à lutter contre le renforcement de l'effet de serre. Sur le même thème, se tient en 1992 à Rio de Janeiro le Sommet de la Terre (deuxième conférence des Nations unies sur

l'environnement et le développement). Il donne lieu à la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC), signée par 166 pays. Son objectif ultime est de stabiliser les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Mais cette belle intention ne fut suivie d'aucune mesure précise.



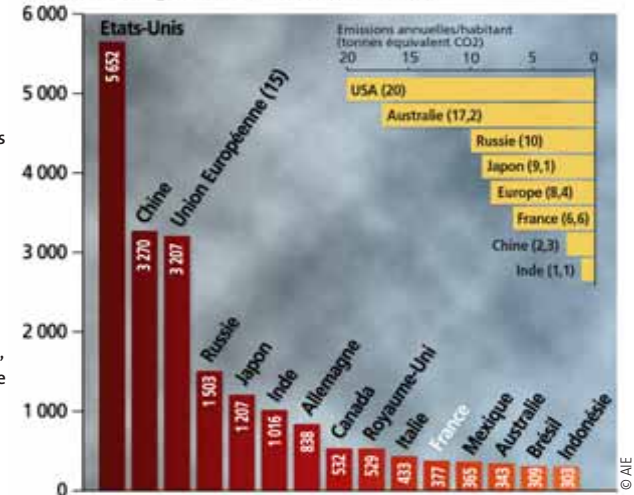
D'après GIEC et BRGM/Pour une Terre durable

◀ Schéma conceptuel de la problématique du changement climatique.

Induits par les émissions de gaz à effet de serre, les changements climatiques ont une incidence sur l'homme et son environnement. Les choix de développement socio-économique se traduisent soit par des mesures de prévention et d'atténuation (réduction des émissions : économies d'énergie, énergies renouvelables, stockage géologique du CO₂...), soit par des politiques d'adaptation (prévention des risques climatiques : lutte contre l'érosion, protection contre les phénomènes extrêmes...).

Les flèches orangées indiquent le cycle de causes et effets dans les quatre secteurs représentés, la flèche verte indique la réponse sociétale aux effets des changements climatiques.

Emissions de CO₂ en millions de tonnes (en 2002)



© AIE

▶ Les 15 premiers pays producteurs d'émissions de CO₂

Dans ce palmarès des nuisances, la France fait partie des bons élèves. Les émissions imputables à l'électricité, qui sont prépondérantes dans le bilan mondial, sont très faibles sur le territoire, où seulement 1/10 de l'électricité est produite à partir de combustibles fossiles.

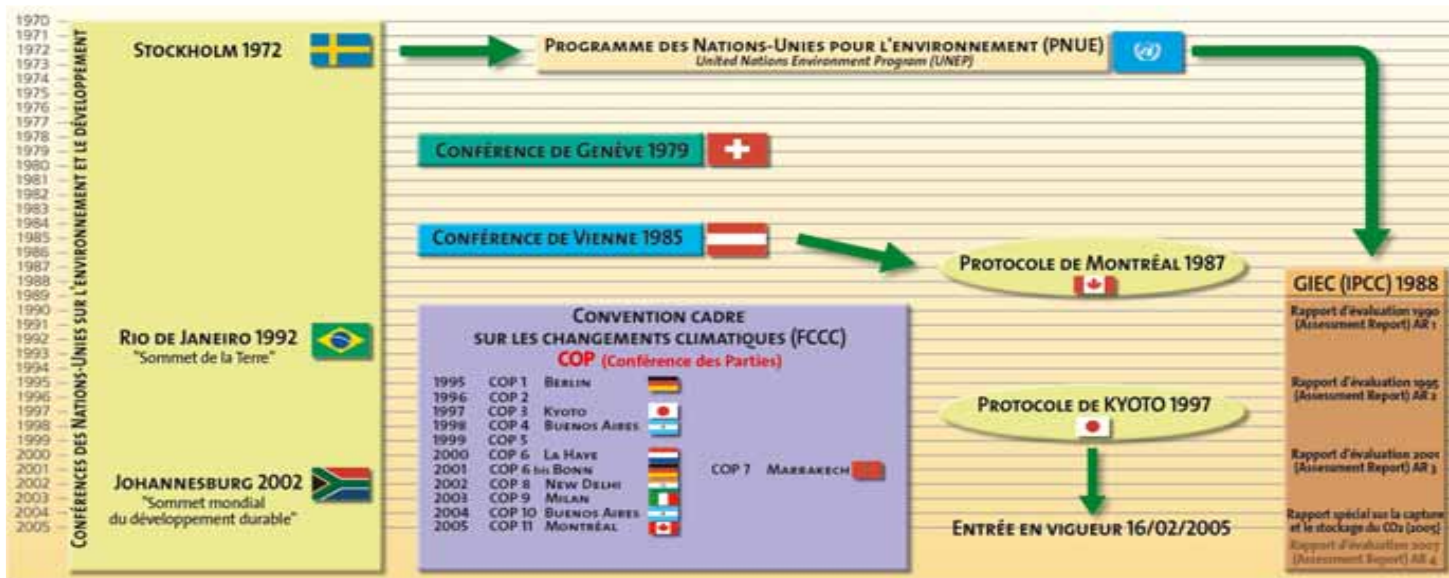
et qui prévoit pour les pays développés une réduction de 5,2 % en moyenne des émissions de gaz à effet de serre sur la période 2008-2012 par rapport au niveau de 1990. Pour entrer en vigueur, cet accord devait être ratifié par au moins 55 pays, représentant 55 % des émissions des pays développés. La défection des États-Unis en 2001 retardera le processus. La signature de la Russie, en 2004, lui redonnera de la substance. Le 16 février 2005, le Protocole de Kyoto est entré en vigueur.

Mais il faudrait aller plus loin. Le troisième rapport du GIEC* montre qu'il est nécessaire de limiter le réchauffement planétaire à 2 °C et de stabiliser les concentrations de CO₂ à 450 ppmv (parties par million en volume*) pour éviter des catastrophes majeures. Cet objectif impose de réduire de plus de la moitié les émissions mondiales, ce qui correspond pour les pays industrialisés à une division par 4 ou 5. Ce défi nécessite une forte mobilisation internationale. Il n'y a pas de solution miracle, seulement un ensemble de voies qui sont toutes à explorer d'urgence aujourd'hui.

Cependant, la Conférence des Parties, l'organe suprême de la Convention climat, doit se réunir régulièrement pour définir plus précisément les objectifs et les conditions de son application. On décide par exemple que seuls les pays développés, principaux responsables de l'effet de serre avec la

Chine, auront l'obligation de réduire leurs émissions. En 1997 à Kyoto, les Parties de la Convention se retrouvent une nouvelle fois pour négocier les objectifs quantifiés de réduction des gaz à effet de serre. À l'issue de cette conférence, est signé l'accord historique qui prendra le nom de Protocole de Kyoto

▼ Événements et dates clés du dossier "changement climatique"



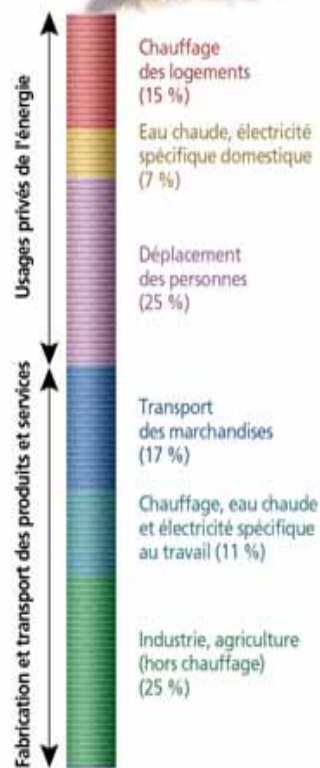
La volonté d'agir

Maîtriser la consommation d'énergie

La lutte contre le réchauffement climatique commence par une évolution des comportements aussi bien individuels que collectifs (urbanisme, aménagement du territoire, infrastructure des transports, logistique des entreprises, etc.). De véritables gisements d'économies se cachent derrière un meilleur usage de l'énergie dans le logement, le bâtiment, les transports ou l'industrie. Et dans ce domaine, il ne s'agit pas de petites économies. Dans l'habitat, des appareils électroménagers efficaces (réfrigérateurs et machines à laver de classe A ou B) permettent d'économiser jusqu'à 50 % d'énergie, la pose de vitrage isolant 7 %, une chaudière efficace de 14 à 16 %, l'isolation des murs de 10 à 15 %, de la toiture de 10 à 20 %, l'installation d'un chauffe-eau solaire individuel ou d'une pompe à chaleur jusqu'à 70 %, l'installation d'un thermostat d'ambiance programmable de 5 à 8 %... Pour l'automobile, le bon entretien du filtre à air permet une diminution de la consommation d'essence de 10 %, une conduite souple de 5 à 15 %, l'utilisation de pneus "verts" basse consommation de 4 %.

Les émissions de carbone peuvent aussi être réduites dès la conception des produits. Par exemple, dans le

▼ Émissions de CO₂ d'un ménage français (d'après Observatoire de l'énergie)



domaine de l'emballage : en réduisant les épaisseurs des feuilles d'aluminium ou de papier, on diminue l'énergie nécessaire à leur fabrication. On peut aussi remplacer, dans la construction, le ciment et l'acier par du bois, en s'assurant du renouvellement de la ressource forestière. Les calcaires utilisés pour la fabrication du ciment contiennent du carbone qui est renvoyé dans l'atmosphère pendant la combustion, et la fabrication de l'acier utilise du charbon comme réducteur du minerai de fer. Conscients de ces problèmes, les industriels de l'acier et du ciment sont aujourd'hui à la recherche de techniques nouvelles pour réduire le contenu en carbone de leurs produits.

Développer les énergies propres et renouvelables

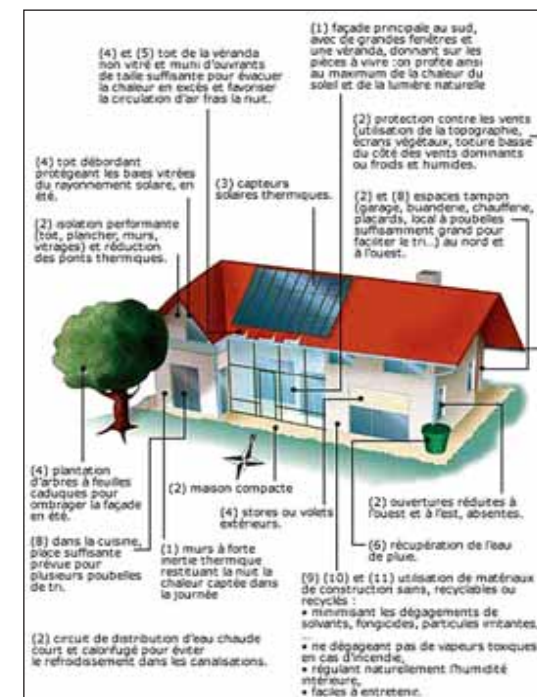
Le transfert vers des énergies fossiles plus pauvres en carbone est une solution qui est largement mise en application aujourd'hui. Le remplacement du charbon par du gaz naturel s'accompagne d'une réduction de 40 % des émissions de CO₂. Hormis le nucléaire qui ne produit pas de CO₂ et qui a un rôle important à jouer en matière de lutte contre le réchauffement planétaire, on peut recourir à plusieurs types d'énergies renouvelables. Ainsi, la transformation des énergies solaire, éolienne et hydraulique en électricité ne produit plus de gaz carbonique du tout ! La France s'est donc engagée à produire 20 % de son électricité à partir des énergies renouvelables à l'horizon 2010, contre 15 % actuellement. Il faudra aussi compter sur

la géothermie. Sa capacité est largement sous exploitée. Les pompes à chaleur ont le vent en poupe et la première centrale de production d'électricité à partir des roches chaudes fracturées entrera en service en 2006 à Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin). Dans le domaine des transports, des programmes sont lancés à l'échelle européenne et nationale pour mettre au point des carburants plus propres et des moteurs plus performants. Les constructeurs automobiles européens ont pris des engagements qui doivent se traduire dans l'avenir par une réduction sensible des émissions de CO₂ au kilomètre parcouru, passant de 190 g/km en 1997 à 140 g/km en 2008, avec un objectif de 120 g/km en 2012. Dans une trentaine de villes françaises, des véhicules de flotte captive (transport public notamment) utilisent déjà un mélange de gazole et d'esters méthyliques d'huile végétale. Ces esters, encore appelés biodiesel, sont aussi distribués sous forme banalisée dans les stations

◀ La vie quotidienne dans les bâtiments (chauffage, électricité...) est à l'origine de près du quart des émissions de gaz à effet de serre et il est possible d'agir sur nos comportements quotidiens.

La maison du futur : ▶

Une conception adaptée et la mise en œuvre d'équipements performants permettent de réduire les factures énergétiques et les dépenses liées à l'utilisation de ces équipements.





© Cegelec

services, en mélange jusqu'à hauteur de 5 % avec le gazole. Un autre biocarburant, l'éthanol, produit principalement à partir de betterave et de blé, peut aujourd'hui être directement utilisé dans les moteurs à essence sous forme d'un dérivé, l'ETBE, en mélange dans l'essence jusqu'à hauteur de 15 %. La pile à combustible, associée à l'hydrogène, est aussi chargée de tous les espoirs car la ressource est inépuisable et la combustion de l'hydrogène ne produit que de la vapeur d'eau. La difficulté est d'extraire l'hydrogène à moindre frais et sans polluer, puis de l'exploiter dans des conditions de sécurité satisfaisantes, tant au niveau de son stockage que de sa distribution.

Capter et stocker le CO₂

Malgré l'éventail des mesures alternatives proposées pour lutter contre l'effet de serre (économies d'énergie, transports propres, énergies



© ADEME

- ◀ Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en des formes d'énergie plus utiles, notamment l'énergie mécanique ou l'électricité.



© BRGM-irm@gé

- ▶ Énergie géothermique à Soultz-sous-Forêts en Alsace : de l'eau injectée dans des forages profonds de 5 000 m se vaporise dans des roches chaudes fracturées et permet la production d'électricité.



© Viessmann

- ▶ L'utilisation d'une pompe à chaleur géothermique permet d'économiser jusqu'à 60 % d'une facture de chauffage électrique conventionnel.

- ◀ Les biocarburants seront amplement développés pour parvenir à atteindre la recommandation européenne de 5,75 % d'incorporation dans les carburants d'ici à 2010.

Le Plan Climat Français

Pour renforcer le Programme national de lutte contre le changement climatique, le Plan Climat 2004 concentre aujourd'hui la politique nationale en matière de changement climatique. Élaboré avec les différents acteurs sociaux, ce plan regroupe les mesures prises pour lutter contre l'effet de serre dans tous les secteurs de l'économie et de la vie quotidienne des Français. Objectif : économiser 54 millions de tonnes équivalent carbone par an à l'horizon 2010.

Il s'articule autour de huit points forts : une campagne de sensibilisation des citoyens aux problèmes d'environnement, la promotion de l'habitat écologique, de la climatisation naturelle, de l'agriculture durable, des énergies nouvelles, la réduction des gaz à effet de serre dans l'industrie, la mise en place d'un État exemplaire et la promotion des recherches prospectives dans ce domaine.

Dans une économie de marché, le Plan compte sur la demande des consommateurs soucieux de leur environnement et sur l'offre des producteurs stimulés par les permis d'émission, les certificats d'énergie ou l'investissement rentable dans le développement durable.

À ce Plan Climat est associée la création d'un Observatoire national des effets du réchauffement climatique (Onerc), chargé d'étudier les conséquences prévisibles du réchauffement (inondation, tempête, sécheresse...) et de s'y préparer.



renouvelables...), le recours à la capture et au stockage géologique du dioxyde de carbone à la source est une mesure supplémentaire indispensable pour limiter le réchauffement de la planète. Il s'agit de fait de remettre dans le sous-sol, sous forme de CO₂, une partie du carbone qu'on en a extrait sous forme d'hydrocarbures ou de charbon. Plus d'un tiers des émissions de CO₂ dans le monde est produit par des sources concentrées (centrales thermiques, cimenteries, raffineries, usines sidérurgiques...) qui vont encore continuer à utiliser des combustibles fossiles. Limiter l'impact de ces émissions réside dans le recours aux techniques de

Depuis plus d'une dizaine d'années, de nombreuses entreprises, dans tous les secteurs d'activité, ont initié des démarches volontaires pour progresser dans tous les domaines ayant un impact sur l'environnement. L'Association des entreprises pour la réduction de l'effet de serre (Aeres) est née, en septembre 2002, de l'initiative d'entreprises françaises qui se sont engagées volontairement à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre.

À l'origine constituée de 20 sociétés, l'association en regroupe aujourd'hui 34, auxquelles s'ajoutent 4 fédérations professionnelles, qui représentent ensemble 60 % des émissions de gaz à effet de serre de l'industrie française.

capture, de transport et stockage géologique du CO₂. Cette filière aujourd'hui en plein développement offre une solution de transition en attendant l'arrivée de nouvelles formes d'énergies non polluantes.

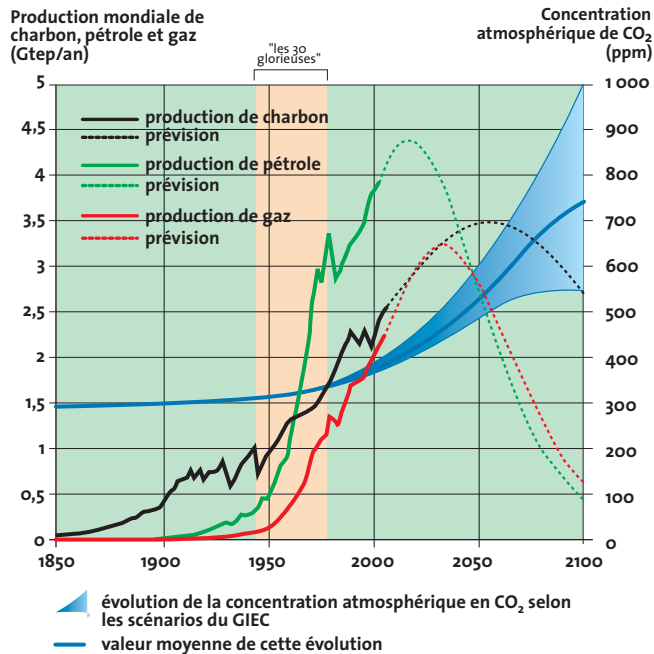


© Médiathèque Gaz de France / Philippe Dureuil - Centrale électrique DK6 à Dunkerque (59)

Capturer et stocker le CO₂ : vers une utilisation plus propre des énergies fossiles

Un monde encore dominé par les énergies fossiles

De nombreux scénarios énergétiques sont élaborés régulièrement par des organismes nationaux ou internationaux comme l'Agence internationale de l'énergie (AIE), le ministère de l'énergie des États-Unis (DOE), la Commission européenne, le Conseil mondial de l'énergie (CME) ou encore par des entreprises (Shell).



D'après J. Varet/Futuribles – sources J. Laherrere et GIEC

▼ La production mondiale d'énergies fossiles et la concentration atmosphérique en CO₂

Depuis le début de l'ère industrielle, on assiste à une forte croissance des consommations d'énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon). Entre 2010 et 2040, on passerait le "pic" au-delà duquel la production de pétrole et de gaz serait amenée à baisser inexorablement (courbes verte et rouge). Pour le charbon (courbe noire) dont les réserves sont très importantes, le pic ne serait pas attendu avant plusieurs décennies. Dans le même temps, le CO₂ émis par la combustion de ces énergies fossiles entraîne une augmentation des teneurs en gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Selon les efforts qui seront faits pour réduire le taux de croissance de ces émissions, on parviendra ou non à stabiliser ces émissions à l'horizon 2040 (courbes bleues).



© Météo-France

Tous s'accordent sur un point : à l'horizon 2020-2030, la demande en énergie va augmenter sur la planète et les énergies fossiles continueront à satisfaire plus de 80 % de la demande. Même s'il est vraisemblable que les réserves pétrolières seront plus difficiles à trouver et à exploiter, les combustibles fossiles ont encore de beaux jours devant eux, les autres énergies n'étant pas aujourd'hui en mesure de prendre le relais.

Il ne faut donc pas compter à moyen terme sur leur forte diminution pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Est-il possible que l'humanité freine son développement et s'interdise de brûler les deux tiers d'une énergie accessible et relativement bon marché. Selon l'AIE, à l'horizon 2030, les émissions dépasseront les 37 milliards de tonnes de CO₂ par an. En 2100, si aucune mesure n'est prise, d'après les projections, il faut s'attendre à une hausse de la température moyenne comprise entre 2 et 6 °C, dont il est difficile de prévoir l'étendue des conséquences écologiques et humaines.

Piéger le CO₂ à la source

Dans ce contexte, parmi l'éventail de solutions proposées, l'idée de piéger le gaz carbonique à la source d'émission chaque fois que cela est possible s'avère d'une urgente nécessité. Des recherches sur le long terme sont aujourd'hui engagées pour détourner le CO₂ de l'atmosphère : fixation en un composé stable pour former des carbonates selon un processus naturel, biofixation du CO₂ par photosynthèse de micro algues, production de méthane avec du CO₂ grâce aux bactéries méthanogènes...

Les recherches les plus prometteuses concernent la capture et le stockage géologique du dioxyde de carbone.

Il s'agit de récupérer ce gaz là où il est produit en grande quantité, comme par exemple sur les cheminées industrielles et de le réinjecter dans le sous-sol. Ce concept étant une idée neuve, les

▼ Installation de capture du CO₂, centrale de Warrior Run (États-Unis).



© AIE

véritables travaux de recherche n'ont commencé qu'au début des années 90. Mais dès le début, le stockage géologique du CO₂ s'est inscrit dans un cadre international au sein du programme "gaz à effet de serre" de l'Agence internationale de l'énergie (programme AIE GHG) et le GIEC publie un rapport sur ce sujet fin 2005. Les recherches dans le domaine se multiplient et font aujourd'hui l'objet du plus grand intérêt dans la communauté scientifique, industrielle et politique. À l'heure actuelle, on distingue plusieurs pôles importants pour cette recherche : l'Europe, l'Australie, le Canada, les États-Unis et le Japon. Les échanges sont nombreux entre ces équipes.

Capter le CO₂

Centrales thermiques, cimenteries, raffineries, usines sidérurgiques et autres installations industrielles sont responsables de plus de 60 % des émissions de CO₂ dans le monde. Ces sources concentrées de pollution sont directement intéressées par la capture du gaz carbonique. La principale difficulté est de le séparer des autres constituants (vapeur d'eau, azote...). Les techniques utilisées aujourd'hui sont relativement onéreuses. Elles explorent trois voies :

- La première récupère le CO₂ dilué dans les fumées de combustion (capture postcombustion).
- 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 CO₂ (capture par oxycombustion).
- La troisième vise à extraire le CO₂ à la source en transformant le combustible fossile avant usage en un gaz de synthèse* (capture précombustion).

Transporter le CO₂

Différentes techniques existent pour transporter le CO₂ du lieu de capture au site de stockage. Compte



© Elsam

▲ Le premier pilote industriel de capture sur fumées sera installé dans la centrale au charbon d'Esbjergværket (Elsam) au Danemark. La capacité prévue du pilote s'élève à environ 1 tonne de CO₂ par heure.

tenu des volumes à déplacer, les seules solutions possibles pour le transport de ce gaz à grande échelle sont les pipelines et les navires.

Dans le cas du transport maritime, avec des bateaux du même type que ceux utilisés pour le gaz de pétrole liquéfié, le CO₂ peut être transporté sous forme liquide à pression modérée et à basse température.

Dans les canalisations terrestres ou maritimes, il sera en phase dense, sous une pression supérieure à 74 bar (état supercritique) ; il est aussi envisagé de le transporter à l'état liquide.

Dans tous les cas, le transport du CO₂ implique de le déshydrater et de le comprimer, et la présence d'impuretés peut gêner le processus. Le transport par gazoduc est déjà couramment utilisé aux États-Unis.

Explorer toutes les voies

Pour détourner le CO₂ de l'atmosphère, d'autres voies que le stockage géologique sont aujourd'hui explorées.

La fixation en un produit stable pour former des roches carbonées par un procédé naturel de minéralisation est la plus étudiée.

La biofixation du CO₂ par la photosynthèse de micro-algues fait l'objet d'un pilote aux États-Unis et a retenu l'attention de l'Agence internationale de l'énergie (AIE). Le processus consiste à incorporer dans un bioréacteur du CO₂ d'origine industrielle et des nutriments nécessaires à la croissance des algues, produits à haute valeur commerciale.

Une autre piste de recherche a pour objectif d'utiliser les bactéries méthanogènes pour produire du gaz naturel – certaines bactéries, en effet, savent réduire le gaz carbonique en méthane.

Le CO₂ peut se transporter par gazoduc du même type ▼ que ceux utilisés pour le transport du gaz naturel, comme ici pour le renforcement de l'artère de Guyenne en France.



© Médiathèque Gaz de France / Blaise-Porte

Tête de forage du puits d'injection de CO₂ sur le site expérimental de Frio au Texas (États-Unis).



© BEG/University of Texas

Vue aérienne du méthanier Edouard LD en cours d'accostage au terminal méthanier de Montoir-de-Bretagne (44). Ce type de bateau pourrait être utilisé, après adaptation technique, pour le transport du CO₂.



© Médiathèque Craz de France / Blaise Porte

Forage de reconnaissance d'un site de stockage de CO₂ à proximité de la centrale au charbon de Mountaineer dans l'Ohio (États-Unis).



© Battelle

Mais la panoplie des infrastructures devra être considérablement augmentée pour satisfaire la demande.

Stocker le CO₂ dans le sous-sol profond

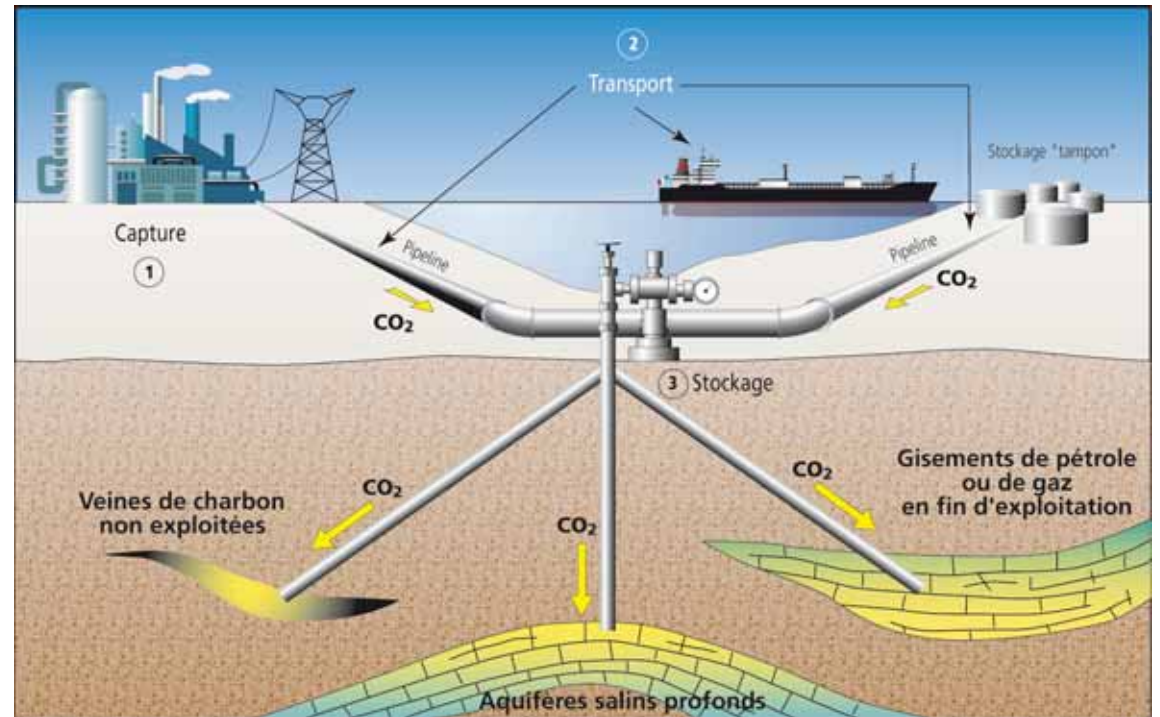
Après sa capture, le CO₂ doit être stocké dans le sous-sol profond pour des durées importantes pouvant couvrir plusieurs siècles, et ceci en toute sécurité. Les options envisagées pour le stockage géologique sont :

- le stockage dans les aquifères* profonds, première filière en termes de capacité et de répartition géographique ; les experts estiment les capacités de stockage dans les aquifères à plusieurs milliers de milliards de tonnes ;

Principales options pour la capture, le transport et le stockage géologique du CO₂.

Dans les usines émettrices de CO₂, le gaz carbonique est capturé par séparation du CO₂ des autres gaz qui se trouvent en général dans les fumées.

Il est ensuite compressé et transporté par pipeline ou bateau jusqu'à son lieu de stockage géologique : des aquifères salins profonds, des gisements de pétrole ou de gaz en voie d'épuisement ou des veines de charbon non exploitées.



© BRGM-im@gé

- le stockage dans les veines de charbon des gisements non encore exploités, l'injection pouvant s'accompagner d'une production de méthane (gaz naturel) valorisable commercialement ;
- le stockage dans des roches basiques (basaltes, péridotites...) assurant en même temps la minéralisation du CO₂ par carbonatation des silicates.

Un temps envisagé, le stockage océanique fait partie des options qui ont été abandonnées en raison des grandes incertitudes à la fois sur l'impact à long terme d'une augmentation de CO₂ sur l'écosystème marin et aussi sur le temps de résidence du CO₂ dans l'océan.

Dans tous les cas, les aspects techniques, financiers et sociétaux devront être encore traités pour que cette idée nouvelle se concrétise et accompagne efficacement la politique de réduction des gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

II

De la cheminée au lieu de stockage

- Où capturer le CO₂ ?
- Comment capturer le CO₂ ?
- **Transporter le CO₂**

De la cheminée au lieu de stockage

La capture du CO₂ auprès des sources concentrées et son transport sont déjà des technologies industrielles mais de nombreux obstacles devront être franchis pour envisager une récupération à plus grande échelle.

Où capturer le CO₂ ?

Au niveau des émissions industrielles

Stabiliser les émissions anthropiques de gaz à effet de serre afin d'éviter un dérèglement du climat nécessiterait, selon les experts du GIEC*, d'extraire de l'atmosphère une énorme quantité de gaz carbonique, de l'ordre de 3,7 milliards de tonnes de CO₂ par an d'ici 2025 et jusqu'à 14,7 milliards de tonnes de CO₂ par la suite. Ces chiffres sont considérables, pour en avoir une idée, il faut savoir que cette quantité produite chaque année correspond à un volume de gaz carbonique liquéfié qui pourrait remplir 45 fois le lac Léman. Dans l'état actuel de nos connaissances, l'objectif apparaît démesuré. Le stockage géologique n'est qu'une des options parmi un éventail de mesures à mettre en œuvre pour endiguer l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère. Cependant, il est évident que sa contribution sera d'autant plus efficace que les volumes de gaz carbonique stockés seront importants.

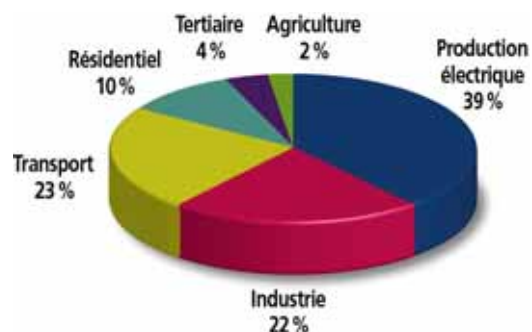
À l'heure actuelle, seules les émissions industrielles concentrées peuvent être captées.

Les plus importantes sont issues des centrales thermiques – le gaz carbonique est libéré lors de la production d'énergie à partir de ressources fossiles – et des unités de production industrielle, notamment lors de la fabrication de certains produits.

Le transport et l'habitat sont également de grands générateurs de gaz carbonique, mais leurs émissions sont diffuses. Elles devront être réduites par d'autres méthodes, notamment par l'utilisation de combustibles propres (dont l'hydrogène produit de façon non polluante) et les économies d'énergie.

Les sites industriels concernés

Les centrales électriques contribuent aujourd'hui pour 40 % aux émissions de gaz carbonique dans le monde, soit plus de 7 milliards de tonnes de CO₂ par an.



D'après AIE

◀ Répartition par secteurs des émissions de CO₂ dans le monde.

61 % des émissions de CO₂ sont dues aux activités de la production d'énergie (39 %) et de l'industrie (22 %) ; elles sont centralisées et donc plus aisées à capturer. Les autres secteurs (39 % du total) dont les transports (23 %) se caractérisent par des émissions diffuses.

Émissions de CO₂

en GtC

Production de fer et d'acier ⁽¹⁾	0,393
Production de ciment ⁽¹⁾	0,308
Raffinage du pétrole ⁽¹⁾	0,188
Pétrochimie ⁽¹⁾	0,142
Autres industries ⁽²⁾	0,360
Total industries (sauf centrales)	1,391
Centrales de production d'énergie ⁽³⁾	2,091
Total sources industrielles	3,482

Émissions de CO₂ annuelles en milliards de tonnes de carbone (GtC) pour les principales sources industrielles.

Sources : (1) : AIE GHG (1994-1996) - (2) : Données environnementales, OCDE, 1997 - (3) : World Energy Outlook, AIE, 1998.

Parmi les types de combustibles fossiles utilisés, charbon et gaz naturel arrivent en tête. Les centrales au charbon – le combustible à plus fort contenu en carbone – sont les premières concernées par la capture du gaz carbonique à la source.

La décarbonisation des combustibles fossiles prend dans ce domaine des allures de nécessité quand on sait notamment que la Chine et l'Inde, gros producteurs de charbon, ont bien l'intention d'utiliser cette ressource pour assurer leur développement. D'une manière générale, les réserves planétaires de charbon pourraient répondre au problème d'épuisement des réserves en pétrole et gaz, auquel nous serons confrontés à plus ou moins brève échéance. En parvenant à diminuer, voire à supprimer, les émissions de ce combustible, il pourrait retrouver ses lettres de noblesse et répondre plus facilement aux enjeux économiques et écologiques planétaires.

Quatre secteurs industriels pourraient également avoir recours à la capture et au stockage du CO₂ : la production de fer et d'acier (la fabrication d'une tonne d'acier engendre en moyenne 1,8 tonne de CO₂), la production de ciment, le raffinage des produits pétroliers et la pétrochimie. Ensemble, ces quatre pôles d'activité émettent plus de 3,7 milliards de tonnes de CO₂ chaque année. Enfin, dans certaines industries comme la production

Centrales thermiques et de production électrique, cimenteries, raffineries, usines sidérurgiques et autres installations industrielles constituent les principales sources d'émissions de CO₂ dans le monde et sont donc les cibles de la capture et du stockage géologique du dioxyde de carbone. ▶



© Southern Company Services

L'utilisation d'hydrogène

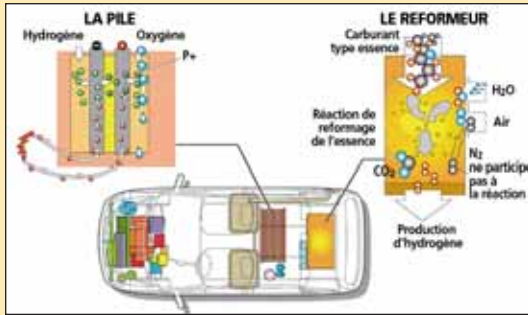
L'hydrogène est souvent considéré comme le vecteur énergétique de l'avenir. Ce combustible se trouve en abondance sur la planète mais toujours sous forme liée, notamment dans l'eau. L'hydrogène peut, par exemple, avantageusement remplacer l'essence dans les voitures et supprimer ainsi une des principales sources de gaz à effet de serre et de pollution. En s'oxydant il ne génère que de la vapeur d'eau. Dans une voiture à pile à combustible, de l'électricité est produite sans combustion grâce à une réaction électrochimique entre l'oxygène



Prototype du véhicule de pompier H₂O (Peugeot 206) utilisant une pile à combustible et schéma d'une voiture à pile à combustible (Renault).

© Peugeot/P. Sautelet

de l'air et l'hydrogène stocké dans le réservoir. Cette énergie électrique fait alors tourner le moteur. L'utilisation de l'hydrogène et de la pile à combustible, développée à l'origine pour la conquête de l'espace (vols Apollo, navette spatiale), pourrait révolutionner nos modes de vie. Néanmoins, l'hydrogène n'existant pas à l'état naturel, il doit être extrait d'une source primaire. Son bilan environnemental dépend donc de la source, de la façon de le produire et de l'utiliser. Sa production repose aujourd'hui principalement – et pour longtemps sans doute – sur les énergies fossiles.

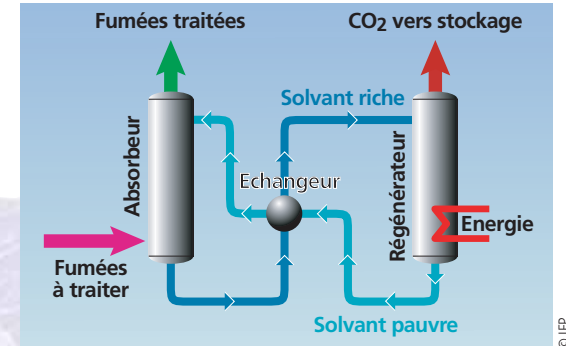


de l'air et l'hydrogène stocké dans le réservoir. Cette énergie électrique fait alors tourner le moteur. L'utilisation de l'hydrogène et de la pile à combustible, développée à l'origine pour la conquête de l'espace (vols Apollo, navette spatiale), pourrait révolutionner nos modes de vie. Néanmoins, l'hydrogène n'existant pas à l'état naturel, il doit être extrait d'une source primaire. Son bilan environnemental dépend donc de la source, de la façon de le produire et de l'utiliser. Sa production repose aujourd'hui principalement – et pour longtemps sans doute – sur les énergies fossiles.

d'ammoniac ou le traitement de gaz naturel, les procédés impliqués nécessitent déjà une séparation du gaz carbonique. Celui-ci est aujourd'hui renvoyé à l'atmosphère, alors qu'il pourrait facilement être récupéré à des fins de stockage.

Comment capturer le CO₂ ?

La capture du CO₂ est d'ores et déjà une technologie industrielle utilisée notamment aujourd'hui pour le traitement du gaz naturel. Elle est pratiquée couramment dans la fabrication d'engrais, dans l'industrie agroalimentaire et dans le secteur de l'énergie (industrie pétrolière et gazière). Le principal problème est en général la faible concentration de CO₂ 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. Un grand nombre de procédés industriels de capture existent sur le marché, chacun ayant un domaine d'application spécifique en fonction de la nature des fumées à traiter (composition, température, pression). Ils relèvent tous de trois catégories principales : la capture postcombustion, la capture par oxycombustion et la capture précombustion.



© IFP

▲ Capture du CO₂ par absorption

Dans la phase d'absorption, le CO₂ contenu dans les fumées est extrait par un solvant. Puis le solvant est régénéré par apport énergétique et le CO₂ est séparé du solvant et dirigé vers un stockage. Le solvant appauvri en CO₂ est redirigé vers l'absorbant.

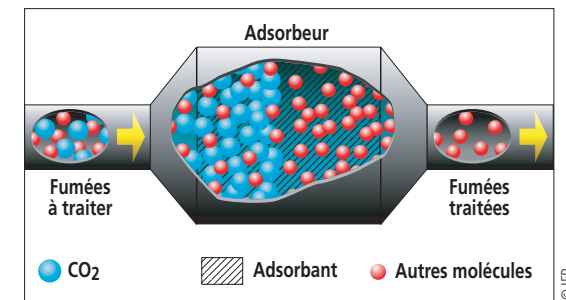
le CO₂ par de la chaux vive pour donner du calcaire ; celui-ci est porté en température, ce qui libère le CO₂ tout en redonnant de la chaux vive. Le procédé par voie cryogénique repose sur la solidification du CO₂ par givrage pour le séparer. La séparation du CO₂ peut également se faire soit au contact d'un adsorbant solide ou à travers une membrane.

La capture postcombustion



La capture postcombustion a pour objectif d'extraire le CO₂ dilué dans les fumées de combustion. Elle peut s'intégrer sans trop apporter de modifications aux installations existantes.

Le procédé le plus couramment utilisé est la capture du CO₂ par un solvant, en général des amines. D'autres procédés sont envisagés par cycle calcium et par voie cryogénique. Le premier consiste à capter



© IFP

▲ Capture du CO₂ par adsorption

Le CO₂ des fumées est adsorbé sur un solide qui est régénéré par apport énergétique ou par baisse de pression. Le CO₂ produit à la régénération est dirigé vers un stockage. Le solide régénéré est utilisé en adsorption.

La capture par oxycombustion



© BRGM-im@gé

Cette technologie n'est pas à proprement parler une capture du CO₂. La question est ici réglée à l'entrée et non à la sortie, il s'agit de produire une fumée concentrée à 90 % de CO₂ en réalisant une combustion à l'oxygène pur. Avec un recyclage d'une partie du CO₂ en substitution de l'azote de l'air, l'oxycombustion est particulièrement adaptée à une remise à niveau (*retrofit*) d'une installation existante. Cependant, la séparation de l'oxygène de l'air obtenue principalement par la voie cryogénique est coûteuse et consommatrice d'énergie. À titre indicatif, la consommation d'énergie de l'apport en oxygène pur pour une centrale à charbon d'une puissance de 500 MW fonctionnant 8 000 heures par an représenterait 15 % de sa production électrique annuelle. Pour éviter le coût de séparation de l'oxygène de l'air, une technologie prometteuse est envisagée : la combustion dite en boucle chimique (*chemical looping*

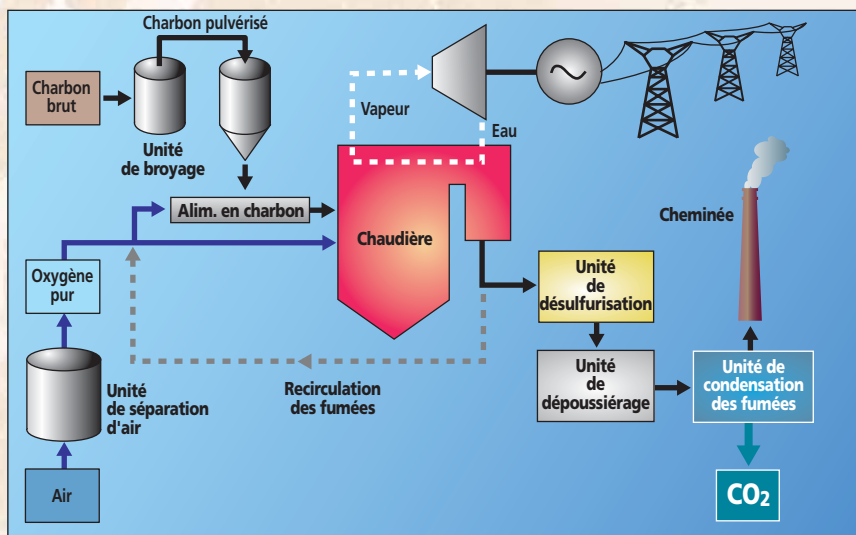
combustion). Elle consiste à apporter l'oxygène de l'air sur un support métallique qui, en circulant, transfère l'oxygène.

La capture précombustion



© BRGM-im@gé

Avec ce type de procédé, l'objectif est de capturer le carbone avant combustion, lors du processus de fabrication du combustible : il est converti en entrée d'installation en gaz de synthèse, un mélange de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène. La technique utilisée est soit le *vaporeformage** de gaz naturel en présence d'eau, soit l'*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, lequel peut être utilisé pour produire de l'énergie (électricité et ou chaleur) sans émission de CO₂.



© Air Liquide

La capture par oxycombustion

La combustion à l'oxygène est une technologie utilisée avec succès depuis de nombreuses années pour améliorer les performances des procédés industriels, dans l'industrie du verre en particulier. La combustion à l'oxygène de combustibles d'origine fossile ou biomasse dans des chaudières industrielles pour la production de vapeur ou d'électricité est une des voies majeures pour la réduction des émissions de CO₂.

Les axes de progrès

Des efforts de recherche et développement intensifs sont aujourd'hui en cours, avec pour objectif d'améliorer les technologies de capture pour les rendre plus efficaces et plus rentables. Portées par des consortiums privés internationaux comme le "CO₂ Capture Project" (CCP) ou les programmes européens Castor et Encap, les recherches portent sur tous les aspects technologiques : depuis la consommation énergétique des procédés (actuellement la capture entraîne une surconsommation d'énergie significative) jusqu'aux performances des solvants (stabilité, capacité de régénération, sélectivité), en passant par les systèmes d'élimination des éléments traces, les technologies des membranes, la mise au point de nouveaux catalyseurs ou la capture de CO₂ sous forme d'hydrate.

La recherche des meilleures possibilités d'intégration du poste de capture dans une installation de production industrielle à moindre coût énergétique est un enjeu important. Le surcoût correspond à l'énergie nécessaire au cycle de séparation et de conditionnement du CO₂. Il dépend à la fois des performances intrinsèques de la technologie de capture utilisée, mais aussi d'une bonne gestion de l'énergie au niveau de toutes les installations. À titre d'exemple, dans le procédé de postcombustion par amines, la régénération du solvant nécessite, actuellement, un apport énergétique d'environ 3 à 4 milliards de joules par tonne de CO₂, principalement sous forme de vapeur d'eau. Deux options pour la fourniture de vapeur sont possibles : soit une chaudière réservée spécialement à cet usage, soit une récupération de vapeur à partir du réseau basse pression de l'installation. Cette dernière option offre une meilleure gestion de l'énergie, avec pour défi de maintenir un rendement élevé de l'installation de production.

Les prix dépendent bien sûr de la composition des fumées, du volume d'effluents à traiter et du type d'installation de capture. Mais l'on peut déjà se faire une idée générale, à partir du prix de la capture du CO₂ par solvants chimiques et postcombustion, actuellement la solution la plus mature sur le plan industriel. Les analyses économiques, réalisées généralement dans le cadre d'unités de production d'électricité, donnent en moyenne un coût de capture incluant la compression du gaz qui va de 30 à 60 euros par tonne de CO₂ pour une centrale thermique de 500 MW, ce qui se traduit par une augmentation de 50 à 70 % du coût de production du kWh électrique. L'objectif recherché est d'atteindre un coût de capture de l'ordre de 20 à 30 euros par tonne de CO₂.

Améliorer les techniques

Intégrer la capture dans les procédés industriels

Réduire les coûts

Transporter le CO₂

Après sa capture, le gaz carbonique doit être dirigé vers son lieu de stockage. Différentes techniques existent pour le transporter. Cependant, compte tenu des volumes, les seules solutions possibles à grande échelle passent par l'usage des pipeline ou de navires.

Le transport de dioxyde de carbone est envisageable sur des bateaux du même type que ce navire de transport de GPL.

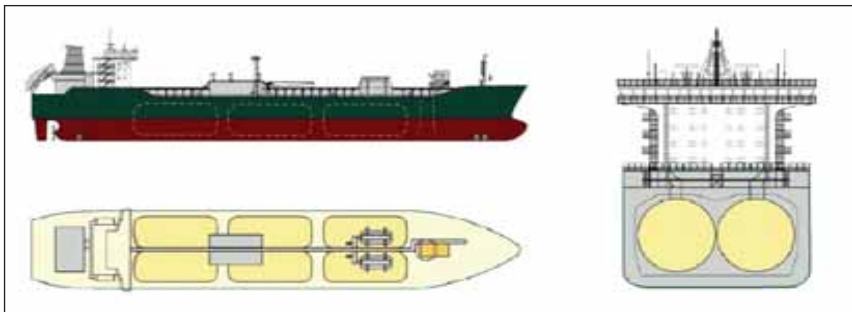


© Mitsubishi Heavy Industries

Par bateau

Des navires peuvent être utilisés pour les longues distances ou pour le stockage offshore. Le gaz remplit alors les cuves de bateaux dont les caractéristiques sont proches de celles servant au transport du gaz de pétrole liquéfié (GPL). Dans les navires, le CO₂ est transporté en phase liquide à pression modérée et basse température. Une expérience existe déjà : depuis 1989, Hydro Gas and Chemicals en Norvège utilise quatre navires pour le transport du CO₂ entre des sites de production de

▼ Coupe d'un navire pour le transport du CO₂ alimentaire en phase liquide à une pression modérée d'environ 7 bar et à basse température.



© Hydro Gas and Chemicals

gaz carbonique (usines d'ammoniac) et des villes portuaires où le CO₂ est utilisé pour la production alimentaire. Les quatre bateaux de la compagnie sont de taille modérée. Des navires de capacité plus grande devront être construits pour transporter le CO₂ à des fins de stockage.

Par canalisation terrestre et maritime

La technique du transport du CO₂ par canalisation ne pose pas de problème fondamental. Ce gaz largement inerte est déjà transporté par gazoduc pour des activités de récupération assistée de pétrole



© Energi E2



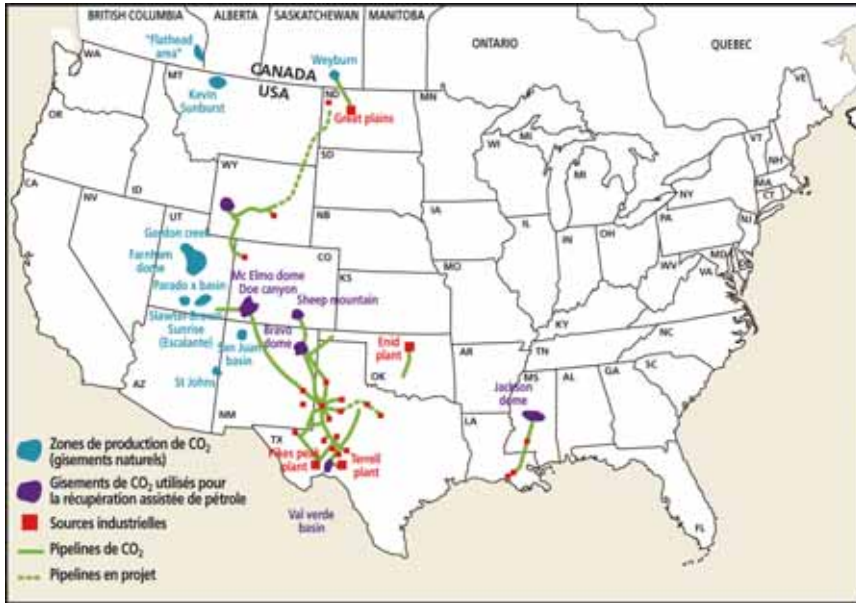
© Médiathèque Gaz de France / Noël Hautemanière

▲ A proximité de la raffinerie de Kalundborg (Danemark), à quelques kilomètres de la côte dans le sous-sol marin, se trouvent des formations géologiques sableuses susceptibles de stocker du CO₂ qui serait transporté par canalisation.

◀ Salle des compresseurs de gaz naturel de la société EEG, filiale de Gaz de France. Comme pour le gaz naturel, avant son transport, le CO₂ doit être compressé.

(environ 3 000 km dans le monde, essentiellement aux États-Unis où la méthode est employée depuis 1980 pour transporter 50 millions de tonnes de CO₂ par an). Dans le cas d'un transport par gazoduc, le CO₂ est à l'état super-critique, à une pression

supérieure à 74 bar. Ce type de transport impose éventuellement des recompressions intermédiaires, selon la distance. On étudie aussi la possibilité de transporter le CO₂ par canalisation à l'état liquide, dans des conditions de température et de pression



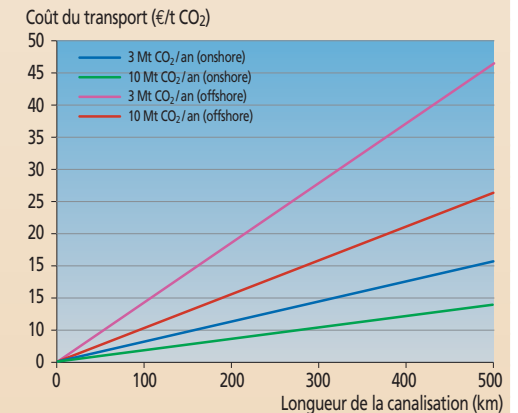
L'inconnue des impuretés

Le transport du CO₂ impose des contraintes spécifiques : il faut notamment déshydrater le gaz pour prévenir la corrosion. Selon le type de combustible ou les procédés de dépollution utilisés, différents types d'impuretés peuvent se retrouver dans le gaz à compresser. Si la capture se fait en postcombustion, le gaz carbonique peut contenir des oxydes d'azote et de soufre, à faible concentration.

Dans le cas d'oxycombustion, on y retrouve en plus de l'oxygène et de l'azote. En précombustion, de l'hydrogène et du gaz naturel viennent s'ajouter au gaz carbonique. D'autres impuretés, comme des traces d'hydrocarbures ou de solvants, peuvent encore en perturber la nature. Leur influence potentielle sur le transport et les installations de surface est encore peu connue, car les recherches sur la thermodynamique du CO₂ en présence d'impuretés sont encore émergentes. La corrosion induite par la présence d'eau peut être plus facilement résolue par une épuration et une déshydratation plus poussées et l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion.

Coût des filières

Le coût de transport du CO₂ par canalisation, depuis le site de capture jusqu'à son lieu de stockage, varie entre 0,5 euro et 10 euros pour le parcours sur 100 km d'une tonne de gaz. Cette grande différence s'explique par la nature des zones traversées par les pipelines. Le coût d'une canalisation sous-marine (*offshore*) est, par exemple, trois fois supérieur à celui d'un réseau terrestre (*onshore*). Dans le cas du transport par navire, des estimations montrent que ce type de transport pourrait être économique sur de longues distances mais qu'il nécessitera des stockages tampons importants.



Le coût du transport de CO₂ par pipeline varie en fonction de la longueur du réseau, du débit et du type de canalisation onshore ou offshore.

adéquates, par exemple 10 bar et - 40 °C. Cette dernière solution imposerait une bonne isolation des canalisations. Cependant, il reste à construire et gérer un véritable réseau permettant d'acheminer le CO₂ depuis les lieux d'émissions jusqu'aux sites de stockage.

Aux États-Unis, a été construit le plus important réseau de canalisations terrestres pour le transport du CO₂ en provenance soit de gisements naturels de gaz carbonique, soit de la capture d'émissions d'origine industrielle.

Pose de pipeline au Canada pour le transport de gaz.



© Northern pipeline projects

Risques et sécurité

Obstacles réglementaires

Le gaz carbonique pur est un gaz incolore, inodore, non combustible, non toxique sauf à concentration élevée. À une concentration de 5 %, des difficultés respiratoires surviennent, à 20 % il est léthal. En cas d'accident sur un pipeline, le CO₂ se mélangerait à l'air et ne serait pas dangereux sauf à proximité des fuites ou dans les zones en creux où il pourrait s'accumuler, étant plus lourd que l'air.

Le développement des filières de capture du dioxyde de carbone ne repose pas uniquement sur des défis technologiques. D'autres verrous d'ordre environnemental et sociétal doivent être pris en compte. Ils font l'objet de nombreuses études, parmi lesquelles on peut citer les travaux de recherche sur les obligations légales en France et à l'international et leur cadre réglementaire ou les questions de sécurité ou de proximité : passage de pipelines à proximité de zones habitées, possible syndrome *Nimby** (Not in my back yard, "pas dans mon jardin").

III

Quelles options pour le stockage du CO₂ ?

- Où stocker de telles quantités ?
- Des acquis, des expériences
- Stockage en aquifères profonds
- Stockage en réservoirs pétroliers et gaziers
- Stockage en veines de charbon
- La séquestration minéralogique
- La maîtrise des impacts à long terme

Quelles options pour le stockage du CO₂ ?

Le gaz carbonique peut être stocké dans des aquifères* profonds, dans des gisements pétroliers et gaziers en voie d'épuisement, et même dans des veines de charbon.

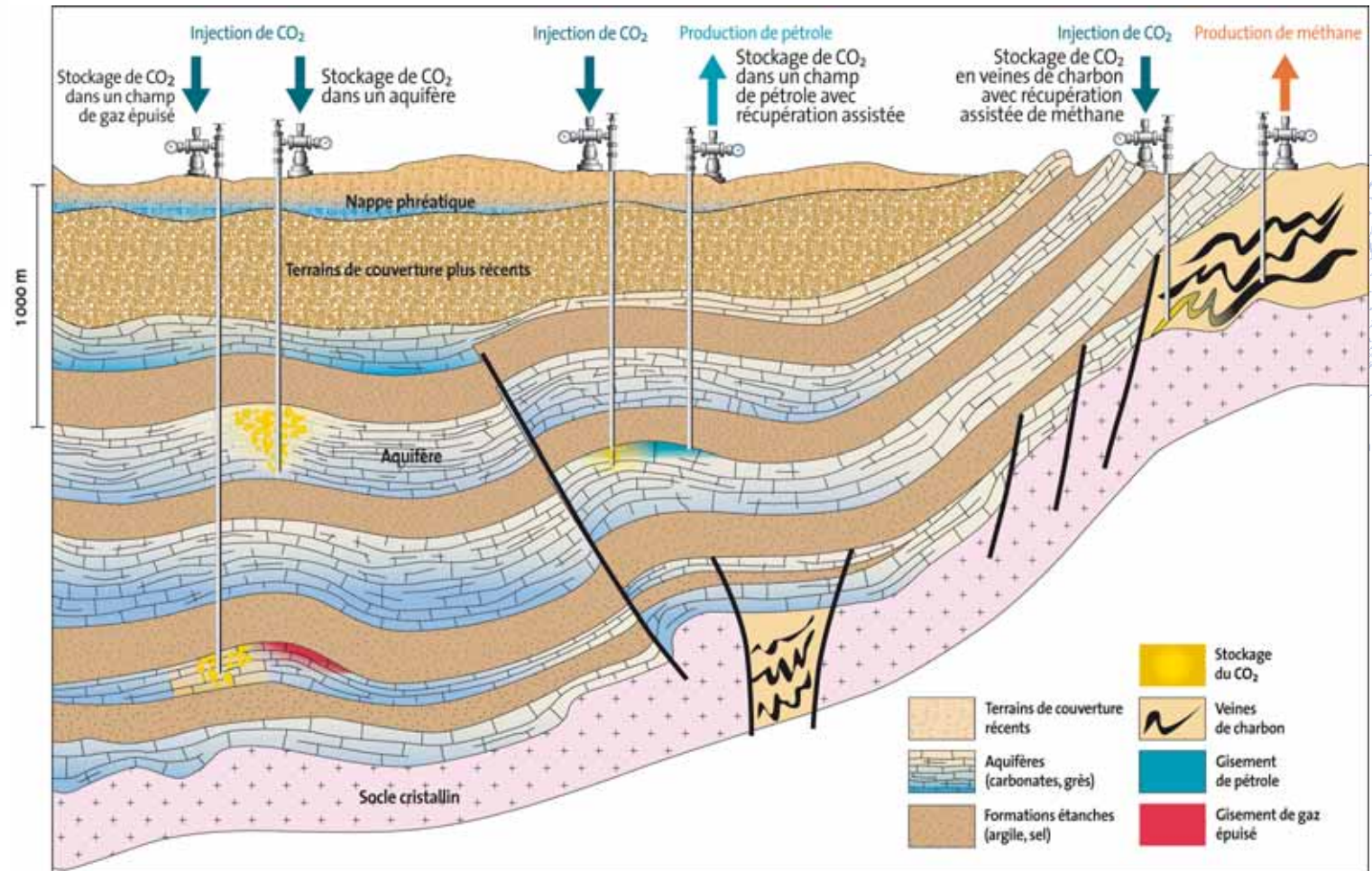
Où stocker de telles quantités ?

Il est séduisant de valoriser le CO₂ capturé en le transformant en un autre produit commercialisable : engrais, matériaux de construction, carburant (éthanol, méthanol), production d'algues, vulcanisation des pneus, matériaux composites, pigments pour les peintures... Mais dans une politique de lutte contre l'effet de serre, ces débouchés industriels ne représenteront jamais qu'une part marginale du CO₂ capturé.

Les espoirs se tournent donc essentiellement vers le stockage géologique. Il sera cependant nécessaire de prouver la faisabilité des projets, le stockage géologique du CO₂ devant garantir aux générations futures des impacts environnementaux locaux nuls ou négligeables.

Les recherches sur le stockage dans les profondeurs océaniques sont aujourd'hui pratiquement abandonnées pour cette raison. Il semble très difficile de prouver l'innocuité à long terme sur la faune et la flore marine d'un surplus anthropique de CO₂, d'autant plus que l'irréversibilité du processus ne peut être garantie.

Stocker le CO₂ dans les anciennes mines ou cavernes naturelles n'est pas non plus une bonne solution car,



▲ Les différents types de stockage géologique du CO₂

Le CO₂ peut être injecté dans des couches géologiques profondes constituées de roches poreuses et perméables souvent gorgées d'eau salée impropre à la consommation : les aquifères salins. La présence de formations étanches (argile, sel...) au-dessus des sites de stockage évite toute remontée du CO₂ en surface. Localement, ces roches réservoirs sont le siège de gisements de pétrole ou de gaz naturel qui possèdent par nature une structure de piège : le stockage de CO₂ est possible dans les gisements épuisés ou en fin d'exploitation avec la possibilité de pratiquer la récupération assistée du pétrole. Enfin, le stockage de CO₂ est envisageable dans des veines de charbon profondes inexploitées où l'affinité du CO₂ pour le charbon permet la production de méthane.

bien que très accessibles, leurs volumes sont trop limités et les risques de fuite vers l'atmosphère trop importants. En revanche, le CO₂ injecté dans des couches géologiques profondes peut venir occuper l'espace inter granulaire des roches poreuses et perméables les constituant.

Dans les roches réservoirs, l'espace disponible est immense : elles se trouvent dans les bassins sédimentaires présents partout dans le monde et peuvent s'étendre sur des centaines voire des milliers de kilomètres carrés sur plusieurs kilomètres d'épaisseur.

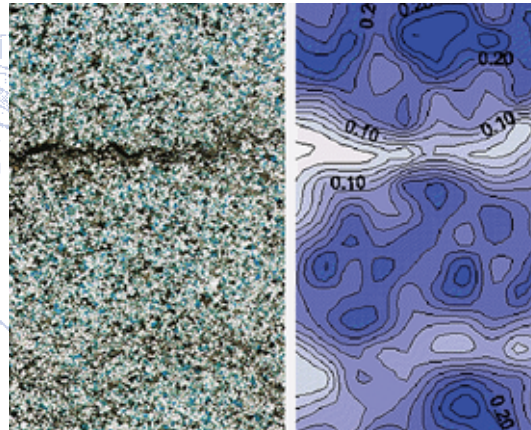
Le plus souvent, les pores des roches sont occupés par une eau très salée totalement impropre à la consommation humaine. C'est pourquoi on parle d'aquifères* salins. Localement, ces roches réservoirs peuvent être le siège de gisements de pétrole ou de gaz naturel. Le CO₂ peut aussi être piégé en grandes quantités par adsorption* sur du charbon car celui-ci présente une grande affinité pour la molécule de CO₂.

Trois types de stockage géologique sont envisageables :

- Le stockage dans des aquifères salins profonds qui offrent les capacités de stockage les plus importantes (10 000 milliards de tonnes de CO₂ !).
- Le stockage dans des gisements de pétrole et de

gaz naturels épuisés ou en phase de déclin, qui n'est que l'adaptation d'un procédé déjà largement expérimenté dans l'industrie pétrolière appelé couramment EOR* (Enhanced Oil Recovery) et destiné à améliorer la productivité des champs de pétrole.

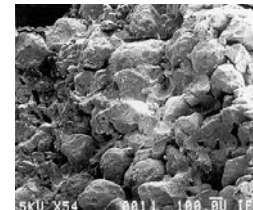
- Le stockage dans des veines de charbon profondes inexploitées, qui bénéficie de l'affinité du CO₂ pour le charbon ; il reprend la méthode dite de récupération ECBM* (Enhanced Coal Bed Methane) pour exploiter le gaz naturel piégé dans ces structures.



© Document de J.L. Potdevin Université de Lille

◀ Carte de répartition de la porosité à l'échelle centimétrique dans une lame mince de grès. Sur la photo de gauche la porosité apparaît en bleu.

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.



© Mirefi

Combien de temps faut-il stocker le CO₂ ?

Après sa capture, le CO₂ doit être stocké pour des durées importantes, couvrant au minimum la période pendant laquelle le problème des émissions de CO₂ risque de demeurer critique. Il faut aussi respecter les rythmes naturels. Le cycle du carbone est régi par les échanges entre l'atmosphère et l'océan d'une part, la biosphère et l'atmosphère d'autre part. Si les échanges avec la biosphère se font sur des échelles décennales, le cycle de l'océan s'étend sur plusieurs siècles. Une stabilisation des teneurs en CO₂ dans l'atmosphère impose donc de conserver le CO₂ dans le sous-sol sur des durées compatibles avec le cycle océanique. Par mesure de précaution, on envisage des solutions qui permettront d'effectuer ce stockage sur des périodes pouvant atteindre un à deux milliers d'années. On peut toutefois estimer qu'il suffira de dépasser l'ère d'utilisation massive des énergies fossiles, c'est-à-dire quelques siècles.

Pour garantir l'étanchéité du stockage, il faut vérifier la présence, au-dessus de la roche réservoir, d'une couche écran imperméable composée d'argiles ou de sels empêchant toute remontée du CO₂ vers la surface.

Au-delà de 800 m de profondeur

Le gaz carbonique doit être injecté à une profondeur suffisante dans le sous-sol afin d'atteindre les conditions de pression et de température qui déterminent son passage à l'état supercritique (plus de 31 °C à 74 bar de pression). Dans cet état, le CO₂ est plus dense et occupe moins de volume. La profondeur nécessaire pour atteindre l'état supercritique dépend du gradient géothermique local, elle se situe entre 700 et 900 mètres. Le CO₂ stocké à l'état supercritique dans le sous-sol 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 CO₂ sous forme dissoute et même sous forme minérale si les conditions sont propices à la formation de minéraux carbonatés. Cela accroît le potentiel de stockage de la formation et peut même immobiliser définitivement le gaz carbonique.

Les différents types de stockage

	Capacités (en Gt de CO ₂)	Avantages	Inconvénients
Gisements d'hydrocarbures	930 Gt	Structures piégeantes étanches aux gaz non réactifs. Objets bien connus. Intérêt économique via EOR.	Généralement loin des sites d'émission de CO ₂ . Capacités de stockage souvent limitées.
Aquifères salins profonds	400 à 10 000 Gt	Très large répartition géographique et grand potentiel de stockage. Facilitent la recherche de sites de stockage à proximité des sources d'émissions de CO ₂ . Eau non potable.	Peu caractérisés jusqu'à présent.
Veines de charbon non exploitées	40 Gt	Près des sites d'émissions de CO ₂ . Intérêt économique via la récupération du méthane.	Difficultés d'injection dues à la faible perméabilité du charbon. Capacités de stockage limitées.

Chiffres d'après AIE GHG, 2004

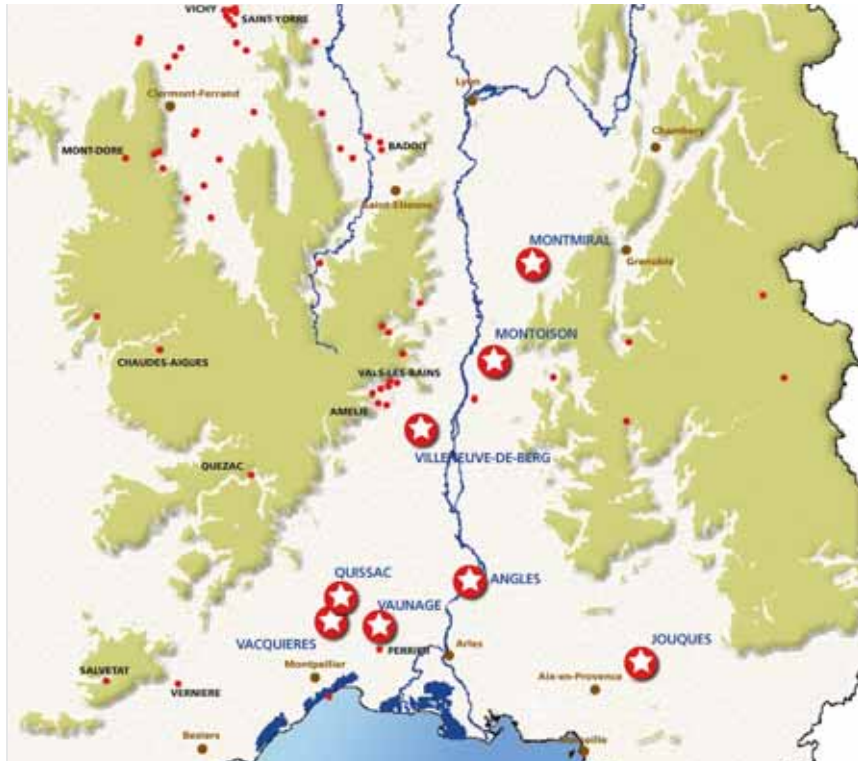
Des acquis, des expériences

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

Le modèle de la nature

Le stockage géologique du CO₂ n'est pas une invention humaine. De nombreux gisements naturels de CO₂ sont en place dans le sous-sol depuis des milliers ou des millions d'années dans certains bassins sédimentaires. Les plus grands se

trouvent aux États-Unis (Colorado, Nouveau-Mexique et Mississippi, avec parfois plus d'un milliard de tonnes de CO₂ !), en Australie (South Australia), en Chine et dans une moindre mesure en Hongrie, en Italie, en Allemagne et en Grèce par exemple. En France, on en a recensé huit dans le bassin du sud-est, trouvés lors d'explorations pétrolières dans les années 1960-70 ! Ils contiennent du CO₂ quasiment pur (jusqu'à 99 %), comme à Montmiral dans la Drôme. Ces gisements naturels peuvent servir de modèles pour comprendre le comportement à long terme du CO₂ dans le sous-sol. Ils suscitent donc l'intérêt des chercheurs



◀ **La province carbogazeuse française :** plusieurs gisements de gaz carbonique existent naturellement en France (repérés par des étoiles) et de nombreuses sources d'eau carbogazeuse sont exploitées (points rouges) pour le thermalisme ou la commercialisation d'eaux minérales.

▶ **Source romaine du Bard à Boudes (Puy-de-Dôme) :** vasque d'environ 60 cm de profondeur, la surface de l'eau est troublée par le bouillonnement lié à la présence de gaz CO₂.



© BRGM-im@gé

▶ **Fontaine pétrifiante dans la région de Digne (Hautes-Alpes) :** les eaux chargées de carbonates dissous déposent ces derniers en travertines (au premier plan).

▶ **Tête de puits de production de gaz carbonique à Montmiral (Drôme) :** ce gisement naturel de CO₂ à une teneur de 97 % a fait l'objet d'une étude de caractérisation détaillée : échantillonnages des fluides, analyses chimiques et isotopiques (forages, sources) et analyses minéralogiques.



© BRGM-im@gé

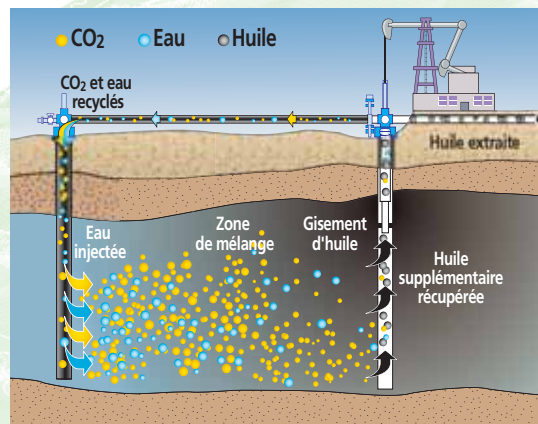


© BRGM-im@gé

internationaux. En Europe, le projet de recherche Nascent, conduit entre 2001 et 2004 et auquel le BRGM a participé pour la France, a eu pour objectif d'étudier les plus grands gisements européens, dont celui de Montmiral. Il a été riche d'enseignements sur les interactions physiques et chimiques entre les roches du réservoir et les fluides (CO₂, eau, huile, gaz). Il a fourni des données très importantes pour juger de l'efficacité des procédés de stockage sur le long terme.

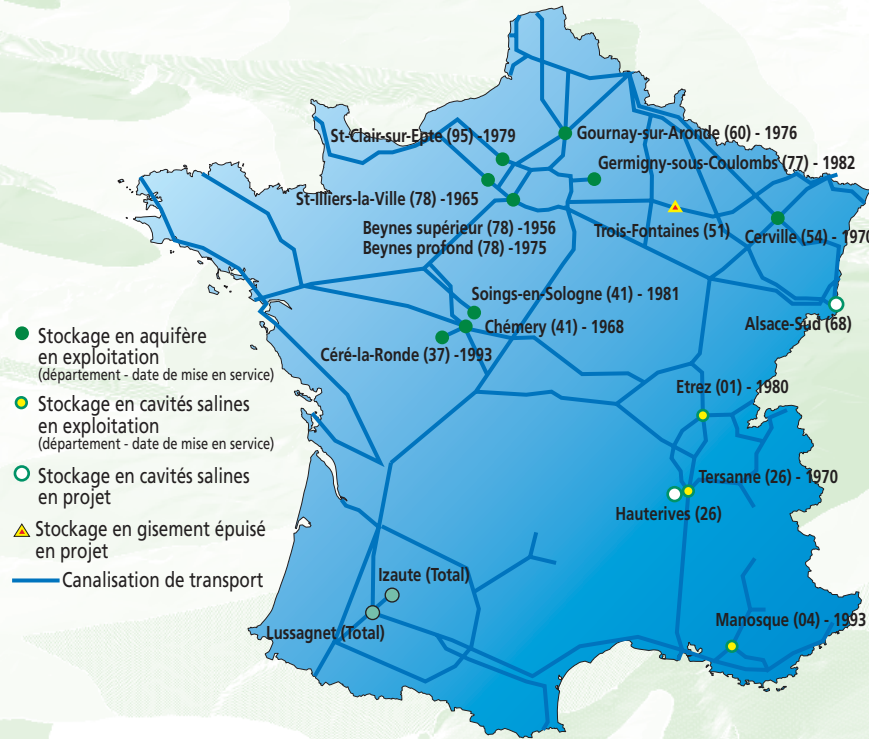
L'expérience de la récupération assistée du pétrole

Des gisements naturels de CO₂ sont exploités depuis quelques décennies par l'industrie pétrolière, qui a acquis de fait une expérience significative dans la manipulation du gaz carbonique, son transport et son injection dans le sous-sol. Les pétroliers utilisent en effet le gaz carbonique pour améliorer la récupération des hydrocarbures. Les techniques mises en œuvre depuis le début des années 50 ont permis de doubler le taux de récupération du pétrole en place dans les gisements : le gaz carbonique injecté maintient la pression du réservoir et, se dissolvant dans le pétrole, en diminue la viscosité et facilite son déplacement jusqu'au puits d'extraction. Grâce aux progrès réalisés ces dernières années, on parvient à extraire maintenant entre 30 et 60 % du gisement original. On parle alors de récupération assistée du pétrole (en anglais EOR* pour Enhanced Oil Recovery). Une partie du gaz carbonique finit toujours par remonter à la surface dans un mélange de pétrole, d'eau et de gaz. Après traitement du pétrole et séparation, on peut choisir de récupérer le CO₂ pour le réinjecter et ainsi éviter de le laisser s'échapper à l'air libre.



© BRGM-im@gé

- ▲ Principe du procédé de récupération assistée du pétrole qui permet d'améliorer la production des gisements d'hydrocarbures en voie d'épuisement.



D'après document Gaz de France

La solution du recyclage permet également de s'affranchir au moins partiellement de l'approvisionnement et de la fluctuation des prix du CO₂. Elle devrait se généraliser dans le cadre de la lutte contre l'effet de serre : avec l'utilisation plus systématique de l'injection de CO₂ comme technique de récupération assistée, l'industrie pétrolière pourrait augmenter les achats d'origine industrielle du CO₂. Aujourd'hui, le gaz carbonique qu'elle utilise provient essentiellement des gisements naturels (CO₂ moins cher) et seul 1/5 est issu de captures industrielles.

Le savoir-faire du stockage de gaz naturel

L'industrie pétrolière et gazière réalise aussi depuis longtemps des opérations de stockage de gaz dans le cadre de la gestion de sa chaîne de production.

Ces opérations ponctuelles et de courte durée, à cycles saisonniers, ont aussi des liens de parenté avec le stockage géologique. Les sites sont principalement d'anciens réservoirs de pétrole ou de gaz devenus improductifs mais également, dans une moindre mesure, de simples nappes aquifères. En France, cette dernière solution est la plus répandue. Plus de 500 sites de stockage de gaz sont en activité dans le monde, représentant un volume de 164 milliards de m³.

Des expériences pionnières de stockage de CO₂

Depuis le début des années 1990, plusieurs projets ont été conduits pour étudier la faisabilité du stockage géologique. Une première opération a vu le jour en 1996 avec injection en aquifère profond d'un million de tonnes de gaz carbonique par an sur le site de Sleipner (Norvège) en mer du Nord. Il s'agit de la première opération industrielle de stockage géologique de CO₂ à des fins environnementales, pour lutter contre l'effet de serre.

- ▲ La France compte 14 lieux de stockage de gaz naturel dont les réservoirs sont situés entre 400 et 1 600 mètres de profondeur, principalement dans des couches formées de roches saturées en eau : les aquifères.

- ▼ Plate-forme de Gaz de France Production Nederlands (GPN) en mer du Nord où une opération de stockage de CO₂ dans un gisement de gaz naturel en voie d'épuisement est étudiée.



© GPN

Stockage en aquifères profonds

Les aquifères salins profonds sont considérés comme les réservoirs géologiques les plus importants pour stocker le CO₂. En Norvège, on stocke depuis 1996 un million de tonnes de CO₂ par an dans un aquifère sableux sous la mer du Nord.

Un potentiel énorme

Les aquifères* sont constitués de roches poreuses ou perméables gorgées d'eau. Ces structures sont très communes dans les bassins sédimentaires.

Les grandes capacités de stockage recensées et la grande étendue géographique couverte par ces bassins favorisent le rapprochement entre source de CO₂ et site de stockage. Pour toutes ces raisons, le stockage du CO₂ en aquifères arrive en tête des options géologiques actuellement étudiées, les capacités d'entreposage étant, selon certaines

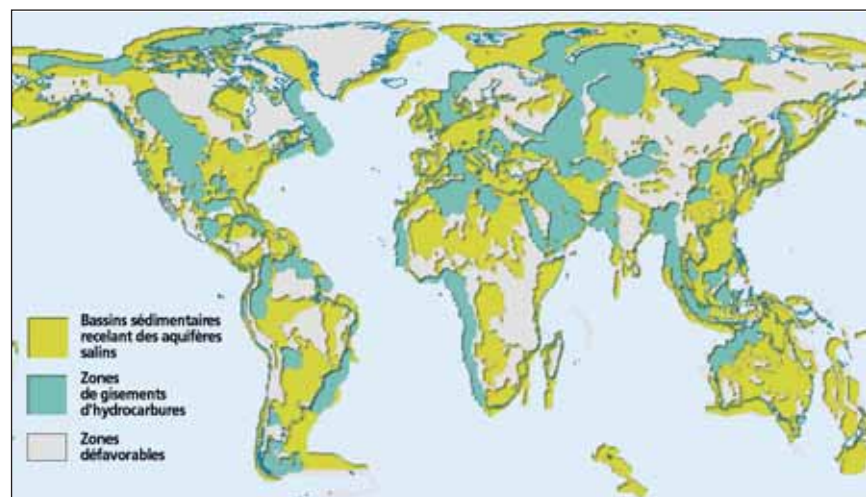


Plate-forme de Sleipner en mer du Nord (Norvège) pour la production de gaz naturel avec séparation du CO₂ qui est réinjecté dans un aquifère salin.

Injection dans les couches géologiques sous la mer du Nord

De nombreux projets d'injection de CO₂ en aquifères profonds sont à l'étude, tel celui de la compagnie Statoil en mer de Barents, en partenariat avec Gaz de France et Total sur le site de production de gaz naturel de Snøhvit. Tel est aussi le cas de Sleipner, un gisement de gaz naturel situé au centre de la mer du Nord à environ 200 km des côtes, exploité depuis 1996 par Statoil. Ce gaz est essentiellement constitué de méthane mais contient aussi de 4 à 10 % de CO₂. Pour respecter les critères de vente, le gaz naturel doit être traité pour diminuer sa teneur en gaz carbonique à 2,5 %. Cette opération est réalisée offshore. Le gaz naturel produit est acheminé sur une autre plate-forme pour en extraire le CO₂ (procédé d'absorption par des amines). Ce dernier est alors directement injecté dans le plus grand aquifère salin local, à près de 1 000 mètres sous le plancher océanique, dans la formation des sables d'Utsira. Chaque année, un million de tonnes de CO₂ est enfoui dans le sous-sol marin, au lieu d'être rejeté dans l'atmosphère comme cela se pratique habituellement. Les frais d'injection sont compensés par l'existence en Norvège d'une taxe sur les émissions de CO₂ offshore.

© Statoil



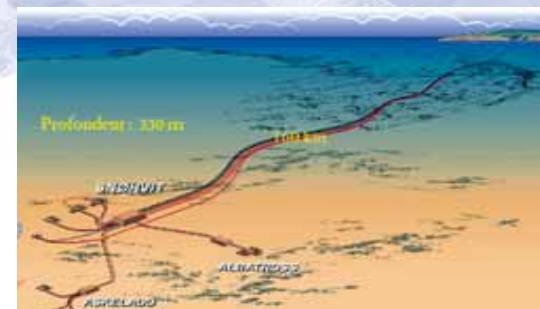
© BRGM/im@gé

évaluations, dix fois supérieures à celles des réservoirs de pétrole ou de gaz. Elles dépasseraient pour l'Europe 800 milliards de tonnes de CO₂ et seraient au niveau mondial de l'ordre de 10 000 milliards de tonnes de CO₂ (soit de quoi stocker la totalité des émissions mondiales pendant des siècles !). Le coût du stockage dans le sous-sol a été évalué à 2 ou 3 euros la tonne, mais le stockage sous le fond de la mer est cher (de l'ordre de 25 euros la tonne).

◀ Carte des principaux bassins sédimentaires et zones de gisements d'hydrocarbures

Le stockage géologique du CO₂ est envisageable dans les aquifères salins profonds des bassins sédimentaires et dans les gisements de pétrole et de gaz épuisés ou en phase de déclin.

Dispositif de réinjection de CO₂ en mer des Barents autour du gisement de gaz naturel de Snøhvit.



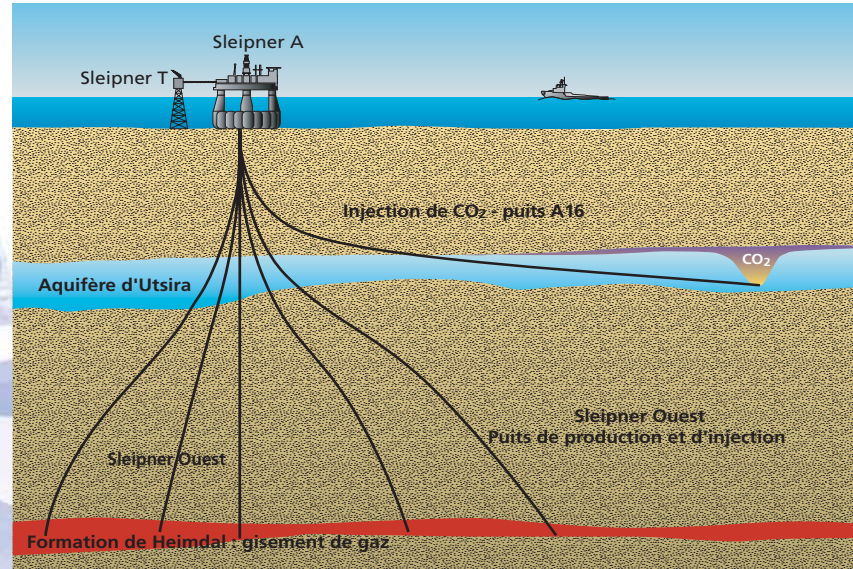
© Statoil

Le projet SACS

Le projet de recherche européen baptisé Saline Aquifer CO₂ Storage (SACS) a démarré en 1998 pour étudier le stockage géologique sur le site de Sleipner en mer du Nord (Norvège).

Financé par l'Union européenne et plusieurs industriels avec la participation d'organismes de recherche dont le BRGM et l'IFP, il a permis de recueillir des enseignements dans plusieurs domaines :

- La description géologique fine du réservoir : c'est une activité fondamentale du projet car elle permet d'assurer que le stockage dans la structure géologique étudiée est possible et sans danger.
- L'étude des aspects géochimiques, afin d'évaluer les interactions entre le CO₂ injecté et la roche hôte.



© Statoil



© Statoil

- ▲ Premier site mondial de stockage de CO₂ en aquifère salin 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 CO₂ qu'il contient sur la plate-forme de traitement du gaz. Le CO₂ est alors injecté dans l'aquifère sableux d'Utsira situé à 1 000 m de profondeur.

- ◀ Vue nocturne de la plate-forme de Sleipner.

- ▶ Le gisement de gaz de Sleipner est situé au centre de la mer du Nord à environ 200 km des côtes.

- La surveillance de l'opération : il s'est avéré possible de suivre l'évolution de la bulle de CO₂ grâce à l'interprétation de campagnes sismiques 3D répétées.
- La modélisation prédictive du devenir du CO₂ dans le réservoir.
- L'estimation des besoins de surveillance du stockage et l'évaluation des coûts nécessaires.

Un manuel des bonnes pratiques basé sur les résultats de ce projet pilote a été rédigé pour être



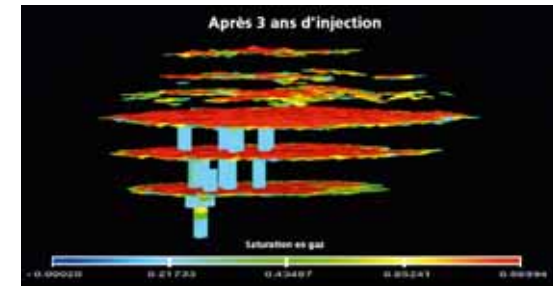
© Statoil



© Médiathèque Gaz de France / Laurent Vautrin

- ▲ Station de travail d'interprétation sismique : pour assurer la surveillance et prévoir à long terme le devenir des sites de stockage du CO₂, de nombreuses techniques et méthodologies appliquées en exploration-production sont mises en œuvre, comme ici la géophysique à Gaz de France.

- ▼ Modèle 3D pour le suivi du stockage du CO₂ dans l'aquifère après 3 ans d'injection.



© Statoil

utilisé comme guide dans toutes les futures opérations de stockage géologique dans le monde.

Faisant suite au projet SACS, le projet CO₂STORE (2003-2006) a pour objectif d'étudier le comportement à long terme du CO₂ injecté à Sleipner et d'examiner la faisabilité d'un stockage en aquifère sur quatre autres sites en Europe, deux à terre (Pays-de-Galles, Allemagne) et deux en mer (Danemark, Norvège).

Stockage en réservoirs pétroliers et gaziers

Les réservoirs pétroliers et gaziers possèdent par nature une structure de piège. D'où l'idée de stocker le CO₂ dans les gisements en fin d'exploitation. Le stockage de dioxyde de carbone dans ces réservoirs peut aussi apporter une valeur ajoutée : la récupération assistée de pétrole et de gaz. Des programmes de recherche sont en cours pour étudier le comportement sur le long terme du CO₂ injecté dans ce type de formations.

Des réservoirs bien étudiés

Après plus d'un siècle d'une exploitation intensive, des milliers de gisements de pétrole et de gaz naturel arrivent en fin de production et certains d'entre eux pourraient constituer des sites intéressants de stockage géologique. Les capacités mondiales de stockage dans les gisements d'hydrocarbures sont de l'ordre de 1 000 milliards de tonnes de CO₂. Bien que 10 fois plus faibles que celles offertes par les aquifères*, on pourrait quand même y stocker le tiers des émissions mondiales pendant un siècle.

Le choix des réservoirs pétroliers présente bien des avantages :

- Un faible coût d'exploration, la géologie étant très bien connue.
- La preuve que les réservoirs ont su piéger des liquides et des gaz pendant des millions d'années.
- Des équipements de production et, souvent, d'injection déjà en place et qui pourront être utilisés pour transporter et injecter le CO₂.
- La récupération assistée des dernières réserves en pétrole et gaz naturel des gisements.
- Des réglementations déjà existantes.

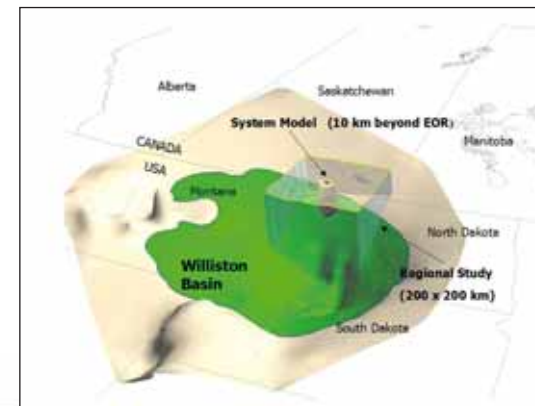
Toutefois, leur répartition mondiale très inégale, les capacités plus limitées de stockage en comparaison avec les aquifères et le besoin de contrôle des puits existants pour qu'ils ne puissent pas devenir des voies de migration privilégiées du CO₂ vers la surface sont des limites à l'utilisation de cette filière. Ce qui n'exclut pas qu'elle puisse être intéressante en fonction des contextes locaux, géographiques ou économiques.

Weyburn, un site pilote combinant stockage de CO₂ et récupération assistée de pétrole



▲ Le CO₂ injecté dans le gisement de pétrole de Weyburn (Canada) provient de l'usine de gazéification de charbon située à Beulah (États-Unis) : chaque jour, 5 000 tonnes de CO₂ transitent par un gazoduc transfrontalier long de 330 km.

Le cadre géologique du site de stockage de CO₂ de Weyburn est déterminé par un bloc d'environ 200 km de côté à une profondeur de 1,5 à 4 km. La zone de surveillance s'étend à 10 km au-delà des limites du stockage de CO₂.



© Saskatchewan Geological Survey

Depuis septembre 2000, une opération de récupération assistée de pétrole par injection de CO₂ est menée par EnCana sur le champ pétrolier de Weyburn au Canada (Saskatchewan).

En janvier 2001, un programme de recherche internationale a démarré sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), baptisé "AIE Weyburn CO₂ Monitoring and Storage Project". Son but : tirer parti de cette opération industrielle pour étudier le stockage géologique du CO₂ dans un réservoir pétrolier et examiner comment concilier récupération de pétrole et stockage à long terme.

Le gaz carbonique provient d'une unité de gazéification de charbon située dans le Dakota du Nord aux États-

Pose de canalisations destinées au transport du CO₂ au Canada.



© Northern pipeline projects

Unis. Il est acheminé jusqu'à Weyburn par un pipeline transfrontalier de 330 kilomètres conçu spécialement pour ce transport. Il est prévu d'injecter 1,8 million de tonnes de CO₂ par an pendant 15 ans, ce qui permettra de stocker définitivement 20 millions de tonnes de CO₂ tout en produisant 130 millions de barils supplémentaires de pétrole. L'Union européenne participe au financement du projet de recherche Weyburn. Les pays européens impliqués incluent le Danemark, la France (BRGM), l'Italie et le Royaume-Uni, en collaboration avec les équipes de recherche canadiennes et américaines.

La première phase du projet (2001-2004) a déjà permis d'obtenir plusieurs résultats :

- La caractérisation fine du site, depuis le réservoir situé à 1 400 m de profondeur jusqu'à la surface, aux échelles locale et régionale.
- Le développement de méthodes de prédiction et de surveillance de la migration du CO₂.
- La modélisation technico-économique du réservoir : optimisation de la production de pétrole et du stockage de CO₂, calage avec les données de production.

- Le développement de méthodologies d'évaluation des performances du stockage et des risques.

Les investigations se poursuivront avec le projet Weyburn II.

L'enjeu est considérable : l'expérience acquise dans ce domaine sera déterminante pour l'avenir du stockage géologique dans les réservoirs d'hydrocarbures.



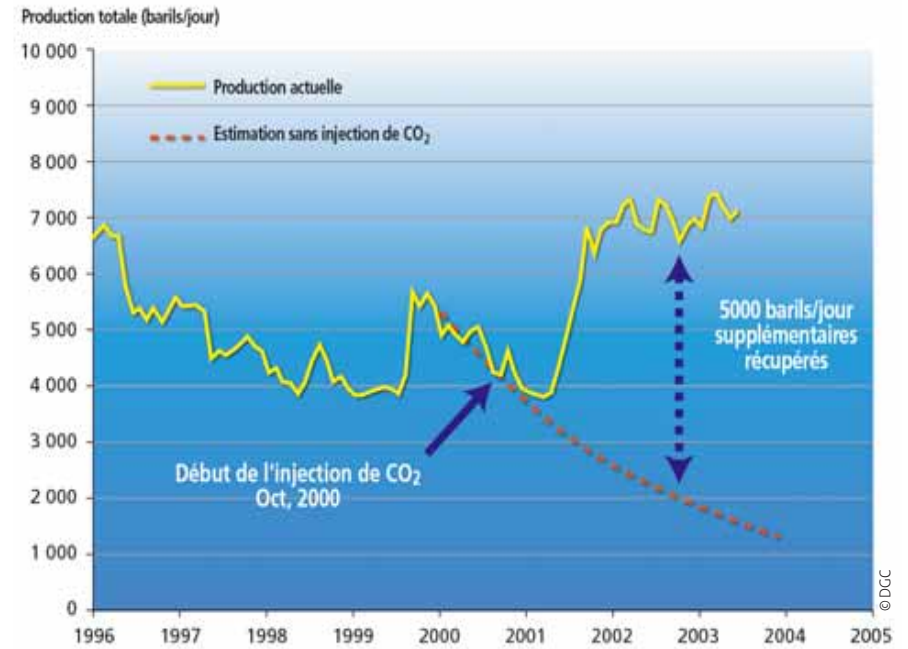
© DCC



© DCC

▲ Avant d'être conduit dans les pipelines, le CO₂ passe par l'unité de compression de l'usine de Beulah.

◀ Vue générale des installations industrielles de gazéification du charbon de Beulah dans le Dakota du Nord (États-Unis) de la Dakota Gasification Company (DGC).

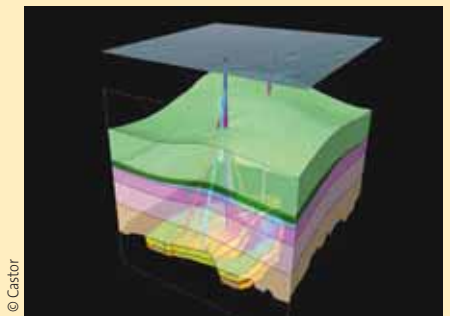


© DCC

▲ Ce graphique montre l'augmentation de la production de pétrole qu'il a été possible de réaliser sur le site de Weyburn, grâce à l'injection de CO₂ effectuée à partir d'octobre 2000.

Pilote de réinjection de CO₂ dans un gisement de gaz naturel en mer du Nord

Exploité depuis 1987 en mer du Nord hollandaise, le gisement de gaz naturel K12B arrive à épuisement. Le gaz carbonique extrait du gaz naturel est rejeté dans l'atmosphère. Gaz de France, dans le cadre d'une démarche d'étude avec les Pays-Bas (projet ORC pour Offshore Re-injection of CO₂), a installé un pilote pour réinjecter dans le gisement les dernières tonnes de CO₂ extraites : une mesure environnementale, mais aussi l'occasion de tester les capacités de stockage de ce réservoir qui pourrait recueillir par la suite le CO₂ extrait d'autres plates-formes. Le potentiel d'injection du gisement a été calculé : 480 000 t/an de CO₂ pour un coût de 8 euros la tonne.



© Castor

Modèle 3D du gisement de K12B : exploité depuis 1987, ce gisement de gaz naturel en voie d'épuisement bien connu constitue une cible de choix, parfaitement étanche pour le stockage de CO₂.

Stockage en veines de charbon

Le stockage du CO₂ dans les veines de charbon inexploitées pourrait simultanément permettre la récupération de méthane. Des programmes de recherche ont été lancés pour étudier la faisabilité de cette option.

Une affinité pour le CO₂

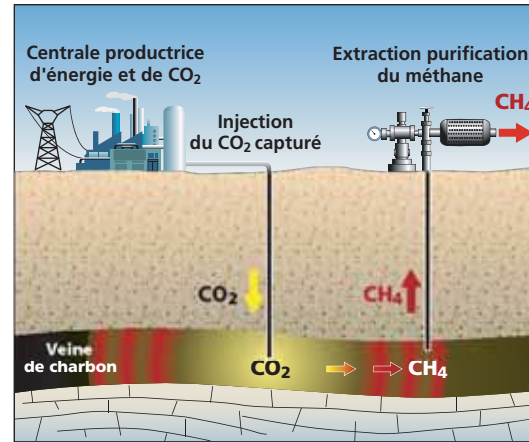
Malgré quelques handicaps caractérisant le charbon, dont notamment sa faible perméabilité qui réduit les capacités à injecter à fort débit, certains arguments militent en faveur du stockage du CO₂ dans les veines de charbon.

Leur pouvoir d'adsorption*, d'abord : les veines de charbon ont la particularité de souvent contenir une grande quantité de gaz piégés dans la structure interne du charbon. Il s'agit en général de méthane, à l'origine des coups de grisou. Or, le charbon a une affinité encore plus grande pour le gaz carbonique puisqu'il peut en adsorber deux fois plus que de méthane. D'où l'idée de stocker du CO₂ dans le charbon tout en récupérant le méthane qui peut se trouver ainsi libéré.

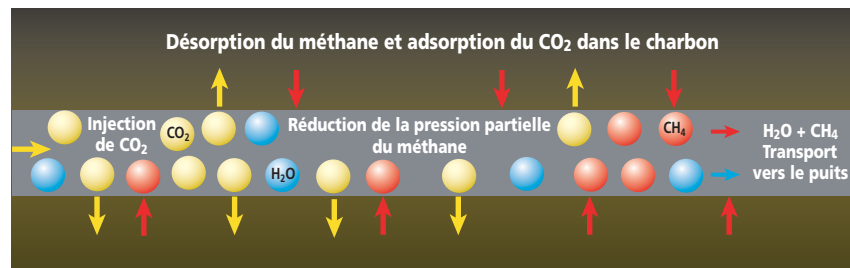
Leur emplacement ensuite : les veines de charbon sont des structures géologiques assez communes et significativement réparties sur l'ensemble des continents. Elles se trouvent aussi à proximité des installations industrielles ou des centrales électriques, sources importantes de CO₂, ce qui réduit le coût du transport.

Le dernier avantage est économique : le méthane peut être récupéré pour être commercialisé. Le méthane des veines de charbon représente une vaste ressource énergétique, très peu exploitée aujourd'hui, mais qui pourrait être plus largement

Principe du procédé de récupération assistée de méthane (en anglais ECBM pour Enhanced Coal Bed Methane) qui permet d'exploiter le gaz naturel (méthane) qui se trouve piégé dans le charbon.



© BRCM-im@gg



© BRCM-im@gg

▲ **Détail du mécanisme d'adsorption et de désorption dans les lits de la veine de charbon : par adsorption, le dioxyde de carbone se fixe sur le charbon, tandis que le méthane est désorbé ; le rapport de l'adsorption du CO₂ sur la désorption de méthane (CH₄) est de 2 pour 1.**

utilisée dans le futur grâce au recours à un procédé de récupération assistée (ECBM*, Enhanced Coal Bed Methane recovery) par injection de CO₂.

Le potentiel de stockage de CO₂ dans les veines de charbon, bien que difficile à évaluer, tourne autour d'une quarantaine de milliards de tonnes de CO₂. Seules les formations non exploitées sont concernées, car les sites ayant subi l'extraction du charbon sont truffés de galeries de mines qui constituent autant de chemins de migration rapide du CO₂ vers la surface.

Des projets de recherche internationaux ont été mis en place ces dernières années pour apporter la preuve



© Burlington Resources

▲ **Projet Coal-Seq : le site d'Allison dans le bassin de San Juan au Nouveau-Mexique (États-Unis) comporte 16 puits de production de méthane (photo), 4 puits d'injection de CO₂ et un forage d'observation. Des injections de CO₂ opérées pendant 5 ans ont permis de produire du méthane avec un taux très bas de gaz carbonique.**

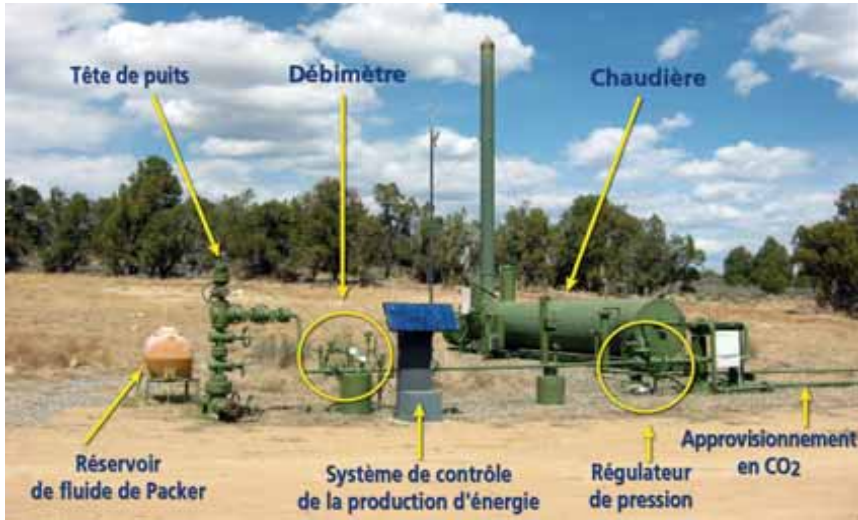
de la faisabilité à grande échelle du stockage de CO₂ dans les couches de charbon avec récupération de méthane. Le principal obstacle réside dans la perméabilité des charbons, pas toujours suffisante pour garantir une bonne injectivité du CO₂. Les mécanismes d'adsorption/désorption du dioxyde de carbone et du méthane dans les pores du charbon doivent être aussi mieux connus. Des expériences sont menées en laboratoire et sur site pour progresser dans ces domaines.

Une alternative consisterait à injecter le CO₂ dans des zones sédimentaires aquifères intercalées entre les veines de charbon et à utiliser les capacités d'adsorption* du charbon comme filtre à CO₂, en quelque sorte un filtre à charbon actif à grande échelle. Le CO₂ serait donc principalement stocké dans les aquifères* et les veines de charbon constitueraient une couverture dynamique du fait de leur affinité pour le CO₂.

Projet américain Coal-Seq

Le projet Coal-Seq a été lancé aux États-Unis en octobre 2000. Financé par le département de l'énergie (DOE), ce projet étudie des veines de charbon qui se trouvent dans le San Juan Basin, à la frontière du Colorado et du Nouveau-Mexique. C'est le bassin le plus important au monde pour la production de méthane.

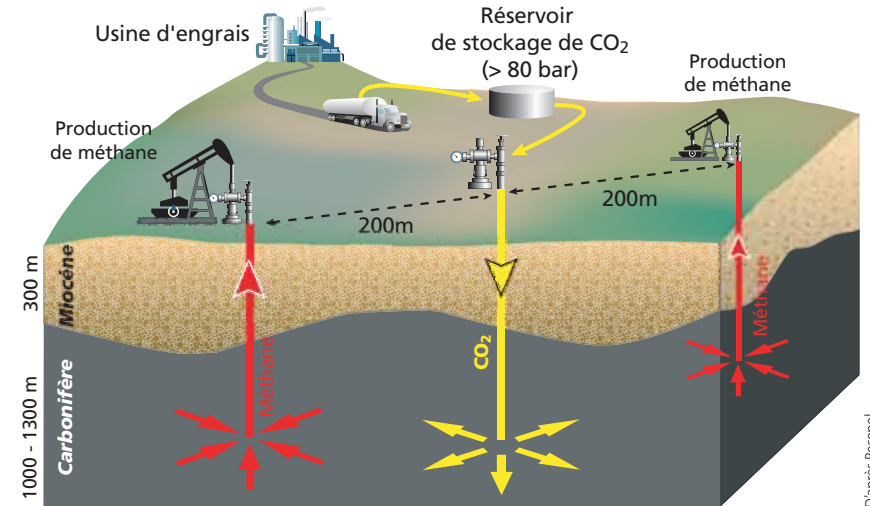
Dans l'un des sites (l'unité Allison), on a injecté du CO₂ pendant cinq ans. La libération du méthane a été conforme à la modélisation du réservoir, avec un taux très faible de CO₂ dans le gaz final. Une comparaison a pu être faite avec un autre site (unité Tiffany) où l'on a injecté cette fois de l'azote. La production de méthane a été plus importante. Cependant, l'azote augmente très vite dans le méthane récupéré et il faut alors procéder à un traitement des gaz produits qui s'avère onéreux. Le projet Coal-Seq a apporté la preuve des avantages économiques de l'injection du CO₂ pour la récupération du méthane.



© Burlington Resources

◀ L'un des 4 puits d'injection de CO₂ sur le site d'Allison dans le cadre du projet Coal-Seq.

▶ Pilote de fonctionnement du projet Recopol (Pologne) : à mi-chemin entre les deux puits de production de méthane, un puits injecte du CO₂ à raison d'une quinzaine de tonnes par jour. L'objectif de ce pilote européen est d'évaluer la capacité d'injection de CO₂ dans les veines de charbon et l'éventuelle augmentation de production de méthane qu'elle entraîne.



D'après Recopol

Projet canadien ECBM*

Initié en 1997, ce projet inclut un grand nombre d'acteurs à l'échelle nationale et internationale. Il vise à étudier la réinjection de CO₂ dans les mines de charbon de l'Alberta (région de Fenn / Big Valley). Plusieurs tests d'injection ont été réalisés avec des compositions variables de gaz carbonique et d'azote. Ces essais ont donné naissance à une base de données qui a permis de valider le modèle numérique. L'opération a apporté la démonstration de la faisabilité effective du stockage du CO₂ dans les structures charbonneuses.



◀ Prélèvements de carottes pour l'étude détaillée des roches rencontrées lors du forage destiné à l'injection de CO₂ dans la couche de charbon. Avant d'être injecté, le gaz carbonique livré par camion est stocké en surface dans des citernes (photo du bas).

Projet européen RECOPOL

En novembre 2001, l'Union européenne lance le projet Recopol, acronyme qui signifie sa finalité : la réduction des émissions de CO₂ par stockage de CO₂ dans un bassin houiller en Pologne. Pour réaliser ce projet, un consortium international a été créé, formé par des instituts de recherche, des universités, des compagnies pétrolières et gazières européennes. La France y est représentée par l'IFP, Gaz de France, Air Liquide et Gazonor.



© Air Liquide

Le site retenu est le bassin de Silésie, où deux puits de production de méthane sont déjà en fonctionnement depuis 1996. Le dioxyde de carbone fourni par Air Liquide est acheminé par camions. Le projet européen vise les mêmes objectifs que les projets américain ou canadien : évaluer la faisabilité de l'injection du CO₂ dans les veines de charbon. Il s'appuie également sur des modélisations et des expériences en laboratoire qui pourraient servir de base de référence et d'aide à la décision aux industriels concernés. Le débit de gaz carbonique injecté, initialement de 1 à 3 tonnes par jour, atteint depuis avril 2005, 12 à 15 tonnes par jour ; ce qui a permis d'étudier la capacité d'injection dans les veines de charbon. La production associée de méthane est actuellement en cours d'évaluation.

La séquestration minéralogique

Bien que ne présentant pas un même niveau d'avancée technologique que le stockage géologique, la conversion du dioxyde de carbone en une roche carbonatée est une voie de recherche qui commence à être explorée.

Un concept émergent

L'idée de minéraliser le CO₂ en le transformant en un produit stable date d'une dizaine d'années. Elle s'appuie sur l'observation du processus de formation des roches carbonatées dans la nature, qui s'étend, lui, sur des millions d'années. Ces roches doivent leur naissance, en effet, à une série d'interactions diverses (altération superficielle, circulation d'eau souterraine, activité hydrothermale) entre un fluide aqueux, plus ou moins chargé en CO₂ et des fragments de roches silicatées enrichies en calcium et magnésium. Calcium et magnésium vont ensuite réagir en présence de CO₂ pour précipiter sous forme de carbonates. Ces réactions bien connues des géologues peuvent être reproduites artificiellement.

Deux voies sont aujourd'hui expérimentées : la séquestration minérale ex-situ qui implique une mise en œuvre industrielle et la séquestration minérale in-situ. Dans ce dernier cas, l'injection est réalisée dans un milieu naturel dont la chimie favorise largement le piégeage minéral du CO₂ (réservoir aquifère dans des roches basiques d'origine magmatique, telles que des basaltes) ; l'Institut de Physique du Globe de Paris et le BRGM ont commencé à explorer cette voie.

Echantillon de laitiers d'aciéries : les résidus minéraux de combustion peuvent capter le CO₂ (carbonatation). L'exploitation de cette propriété pourrait permettre de réduire de 70 % les émissions de CO₂ produites lors de l'élaboration de l'acier.



▲ Banc d'essai de carbonatation minérale comprenant deux autoclaves de 4 litres, travaillant jusqu'à 200 bar et 340 °C, alimentés par un système d'injection de CO₂ supercritique.

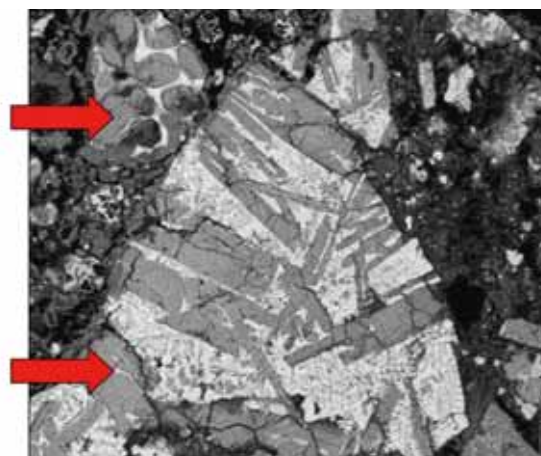
▶ Cette image fortement grossie de la texture de laitiers montre la présence d'un minéral de type larnite avec des phases carbonatables (flèches rouges).



© BRGM-im@gé

A la recherche de procédés industriels

Plusieurs expériences de piégeage minéralogique ex-situ ont déjà été réalisées. Une opération type consiste à amener une source concentrée de CO₂ jusqu'à un réacteur de carbonatation, où l'on a placé également de l'olivine ou de la serpentine broyées (des roches silicatées riches en magnésium) en provenance d'une mine. Portée à haute température, la réaction donne naissance à une roche carbonatée et à du CO₂ résiduel qui peut être recyclé. Ce concept présente deux avantages : une stabilité sur le long terme du CO₂ piégé et de vastes capacités de stockage, les silicates magnésiens étant disponibles



© BRGM-im@gé

sur tous les continents. Cependant le procédé reste relativement lent et la plupart des réactions nécessitent de hautes pressions et des températures élevées, ce qui en augmente le coût. Enfin, le développement à grande échelle de la méthode n'est pas sans conséquence sur l'environnement : une centrale de 500 MW qui génère environ 7 200 t de CO₂ par jour nécessiterait un peu plus de 20 000 t par jour de minerai pour piéger le CO₂ sous forme minérale. Les carbonates générés seraient remplacés dans la mine ou utilisés comme remblais. Il est également envisagé de faire réagir le CO₂ avec des déchets industriels solides ou liquides, comme les cendres volantes, déchets des centrales électriques à charbon, composées d'oxydes de fer, de calcium et d'autres métaux carbonatables. Outre le piégeage du CO₂, la carbonatation peut permettre d'immobiliser certains métaux lourds toxiques qui risqueraient de migrer en dehors des zones de stockage des déchets, à cause du lessivage par les eaux de pluie.

Étude de la carbonatation des laitiers d'aciéries

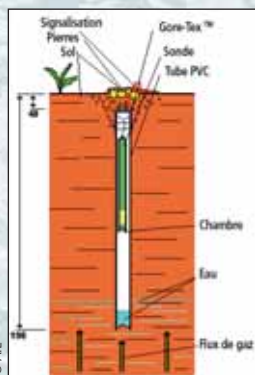
Le secteur de l'acier s'est engagé à réduire le contenu en carbone de ses émissions dans le cadre du 6^e PCRD (programme cadre de recherche et développement de l'Union européenne). Baptisé "Ultra Low CO₂ Steelmaking" (ULCOS), ce programme concerne l'ensemble des sidérurgistes européens (Arcelor, TKS, Corus...), mais aussi des organismes de recherche et des universités (BRGM, CNRS, Cired...) ainsi que des industriels (EDF). D'ici cinq ans, le projet doit fournir un concept de filière de production, présentant une réduction de l'ordre de 30 à 70 % des émissions de CO₂ en partant du minerai de fer, avec vérification de sa faisabilité en termes de technologie, de projections économiques et de sécurité. De nouveaux procédés fondés sur des technologies de rupture vont être testés : l'une d'elles s'appuie sur la carbonatation des laitiers, résidus riches en silicates de calcium. Les potentialités de stockage géologique du CO₂ à proximité des aciéries sont également étudiées.

La maîtrise des impacts à long terme

La surveillance du stockage géologique du CO₂ fait appel à toute une panoplie de techniques et de méthodologies qui ont pour but de garantir la sécurité de la filière pendant plusieurs siècles.

Une surveillance multiple (physique, chimique, biologique)

Capter le CO₂ et le stocker dans le sous-sol peut être réalisé à l'aide des technologies actuellement disponibles dans l'industrie pétrolière et gazière. Mais la nécessité de stocker le CO₂ sans risque pour l'environnement durant de longues périodes de temps – de l'ordre de plusieurs siècles, voire un à deux millénaires – impose de nouvelles contraintes en termes de durée du monitoring* et d'étendue spatiale de la surveillance. Les mesures de contrôle seront différentes selon que l'on se trouve en phase de qualification d'un site, en phase d'injection (de quelques années



© AIE

▲ "Monitoring" gaz des sols : au moyen d'une sonde placée à 2 mètres de profondeur, la mesure des concentrations de gaz dans les sols peut s'effectuer.



© AIE

Dispositif expérimental de percolation sous pression de CO₂ contrôlée. Une cellule sert à la préparation de la solution d'injection sous pression de CO₂, une autre reçoit la carotte de roche poreuse du réservoir sous pression de confinement et la dernière constitue une cellule de prélèvement sous pression.

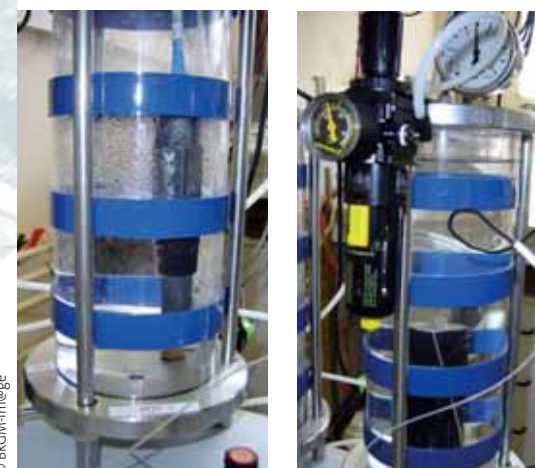


© BRGM-im@gé

à quelques décennies) ou en phase de surveillance du stockage.

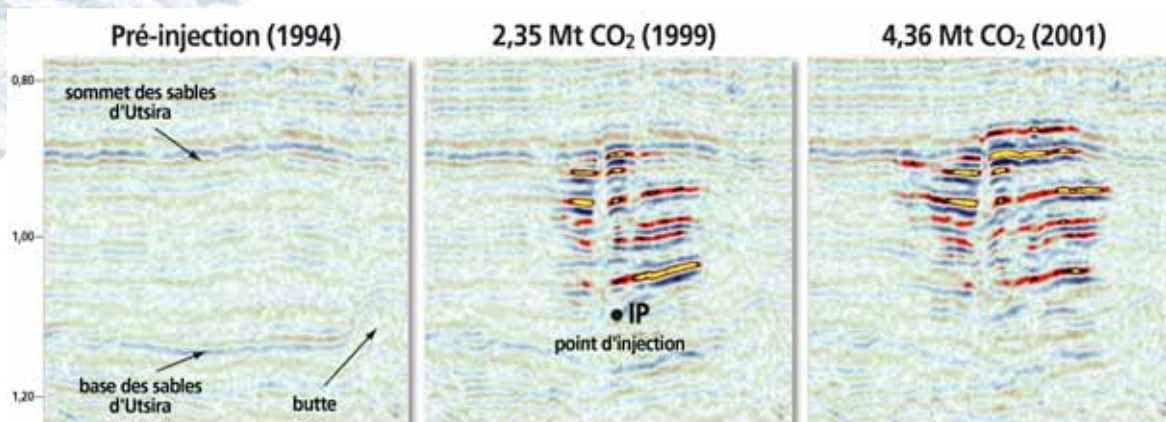
Si, dans un premier temps, il est nécessaire de contrôler l'injection et la localisation de la "bulle de CO₂", il est aussi important de surveiller les possibilités de fuites, l'apparition de réactions géochimiques de dissolution ou de précipitation de minéraux (qui, selon les cas, peuvent être favorables ou dommageables au stockage), la qualité des eaux dans les aquifères* intermédiaires entre le stockage et la surface, et la qualité des couvertures. Ces points sensibles devront faire l'objet de contrôles et d'un suivi par des systèmes de mesures permanents (géophysiques et/ou géochimiques) fiables.

▼ "Monitoring" sismique pour le suivi de l'évolution de la bulle de CO₂ sur le site de Sleipner par sismique 3D répétée : avant injection (1994), puis après injection (qui a débuté en 1996) avec un stockage de 2,35 millions de tonnes (Mt) de CO₂ et enfin en 2001, le stockage atteignant alors 4,36 Mt.



© BRGM-im@gé

© BRGM-im@gé

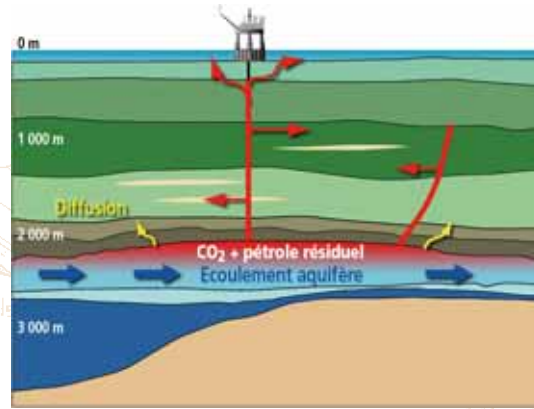


© Statoil

Pour une évaluation environnementale complète, il sera en outre nécessaire de surveiller l'injection et le devenir des impuretés éventuellement présentes dans le CO₂. Les procédés de capture, de purification et de compression éliminent la plupart des composés associés au gaz carbonique. Mais il peut rester des composés issus des constituants des fumées, tels que le dioxyde de soufre ou des oxydes d'azote, qui doivent faire l'objet d'un suivi particulier. Il est important de connaître les quantités injectées et d'en suivre la possible apparition dans les eaux d'aquifères* environnant le stockage.

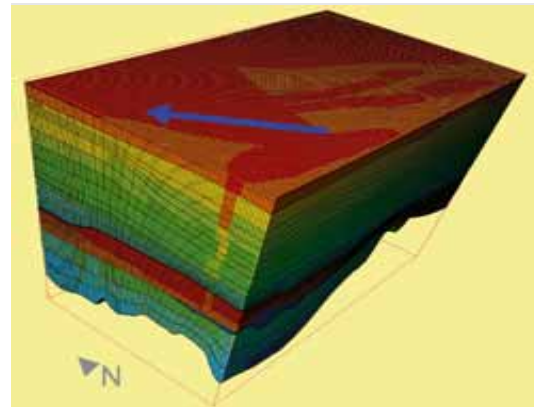
L'apport de la modélisation numérique

Les informations recueillies sur la nature d'un réservoir permettent sa modélisation numérique. On peut alors réaliser des prédictions à long terme sur le devenir du CO₂, simuler différents scénarios et quantifier les risques potentiels (fuite par la



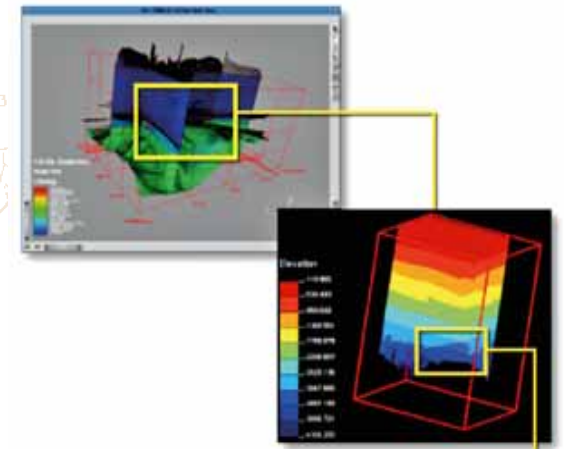
▲ Exemples de scénarios de fuites de dioxyde de carbone dans un stockage géologique dans un gisement d'hydrocarbures en mer du Nord, dans le cadre du projet européen NGCAS.

▼ Modélisation de l'hydrodynamisme à l'échelle régionale (longueur de 50 km, largeur de 36 km et hauteur de 5 km).

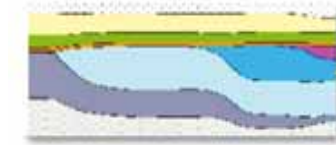


© IFP

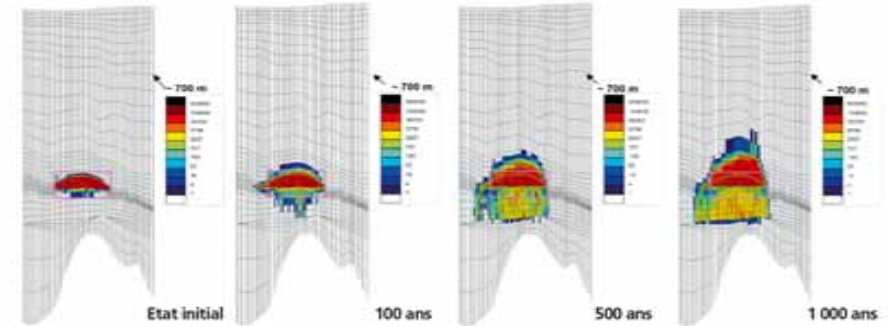
La méthodologie de modélisation s'effectue à plusieurs échelles : celles du bassin, du réservoir et du gisement.



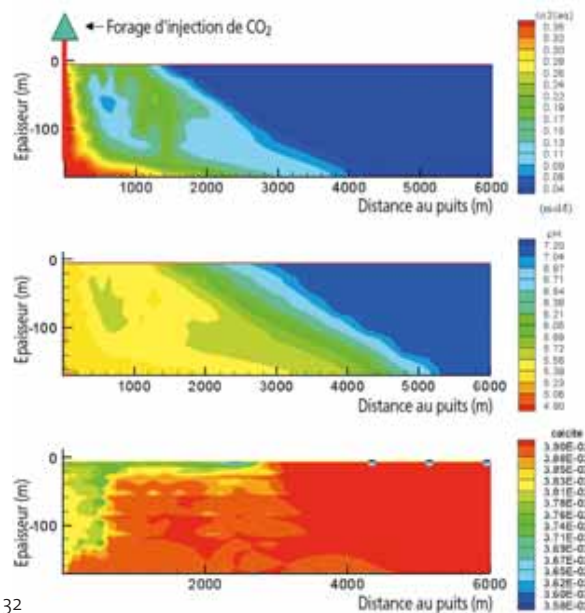
▼ Modélisation de la migration verticale du CO₂ selon un scénario de fuite au bout de 100, 500 et 1 000 ans.



© IFP



© IFP



◀ Exemple de simulations de réactions chimiques associées à l'injection de CO₂ à Sleipner après 10 000 ans. Le CO₂ injecté se dissout dans l'aquifère représenté par une couche de 200 m d'épaisseur constituée de minéraux pouvant réagir chimiquement avec le CO₂. Initialement 3,9 % du volume de roche est occupé par la calcite (en rouge) ; après 10 000 ans, les simulations montrent que seulement 0,3 % de calcite a été dissous par le CO₂.

couverture, rupture d'un puits). Plusieurs types de modèles sont utilisés. Les modèles d'ingénierie du réservoir en 3 D, employés pour la connaissance des gisements d'hydrocarbures, donnent une description de l'écoulement des fluides et des échanges entre eau, gaz et pétrole. Ils peuvent être couplés à des modèles géomécaniques qui apportent des données sur le comportement mécanique des milieux poreux et de la couverture. Les modèles géochimiques, eux, prennent en compte

les interactions chimiques entre les eaux chargées en CO₂ dissous et les minéraux. Enfin, les modèles de bassin sédimentaire sont capables de simuler un réservoir ou un stockage dans son environnement géologique à l'échelle régionale. Pour être pertinents et utiles, ces modèles doivent être réactualisés avec de nouvelles données, notamment sismiques, qui permettent de surveiller dans le temps l'évolution géomécanique du réservoir et de cartographier les déplacements du CO₂.

IV

Perspectives et grands projets

- Performances et coûts des technologies
- Développement d'outils d'aide à la décision
- Une filière à développer
- L'engagement de la France

Perspectives et grands projets

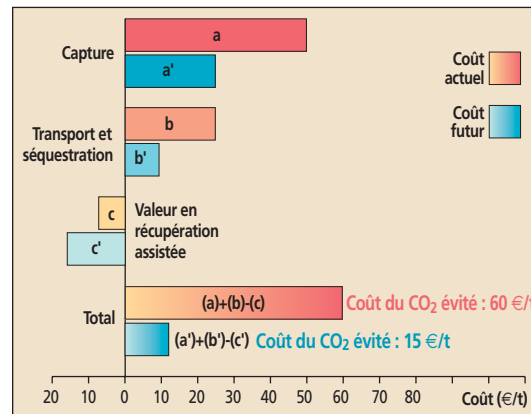
Depuis l'année 2000, une dynamique s'est enclenchée au niveau international en faveur de la capture et du stockage géologique du gaz carbonique.

Les projets de recherche et les pilotes industriels se multiplient dans le monde...

Performances et coûts des technologies

S'il ne fait plus de doute que la capture et le stockage du CO₂ offrent un potentiel important de réduction des émissions de carbone, l'idée pour se concrétiser a encore besoin de franchir de nombreux obstacles, dont l'un des plus difficiles se situe sur le plan économique. Les technologies de transport de CO₂ par pipeline et d'injection en profondeur dans des couches géologiques sont aujourd'hui opérationnelles à des coûts raisonnables.

En revanche, les techniques de capture existantes sont relativement onéreuses. Le coût de la filière complète capture/transport/stockage est actuellement évalué à 60 euros en moyenne la



tonne de CO₂ évitée (cf graphique), dont 85 % pour la seule capture (qui intègre le prix de la séparation du gaz carbonique et sa compression). Pour être acceptable économiquement, une réduction par un facteur de 2 à 4 semble nécessaire. Ce défi peut être relevé grâce à la création de techniques plus adaptées et à la standardisation des méthodes mises en oeuvre. Une démarche similaire a abouti dans le passé à une réduction très importante du coût de l'exploitation pétrolière.

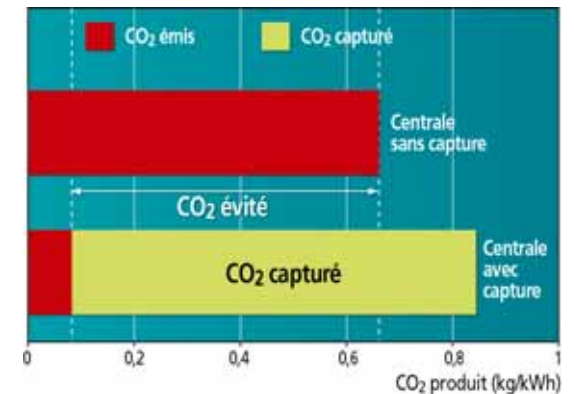
Développement d'outils d'aide à la décision

❖ **Réduire les coûts :** Actuellement, même si le CO₂ est utilisé pour la récupération assistée d'hydrocarbures, le coût de capture, de transport et de stockage atteint environ une soixantaine d'euros par tonne. L'objectif serait de réduire les coûts d'un facteur 4.

Dans le cadre du programme européen Geological Storage of CO₂ (Gestco) destiné à l'évaluation du potentiel de stockage géologique en Europe, des outils d'aide à la décision ont été mis en place pour évaluer les risques financiers. La modélisation économique de la capture, du transport et du stockage du gaz carbonique est effectuée par un groupement de scientifiques européens dans le cadre du Gestco DSS (pour Decision Support System) auquel participe le BRGM pour la France.

Les informations sur le sujet sont rassemblées dans une base de données commune et traitées par des logiciels adaptés. Ainsi, grâce à ce programme, un

❖ **Le CO₂ évité** La capture du CO₂ nécessite d'utiliser de l'énergie supplémentaire, elle-même génératrice de gaz carbonique. Les émissions de gaz carbonique évitées sont ainsi calculées en faisant la différence entre une centrale sans capture et une centrale avec capture, qui consomme plus d'énergie. En raison de ce mécanisme, la quantité de CO₂ capturé est toujours supérieure à la quantité de CO₂ évité.

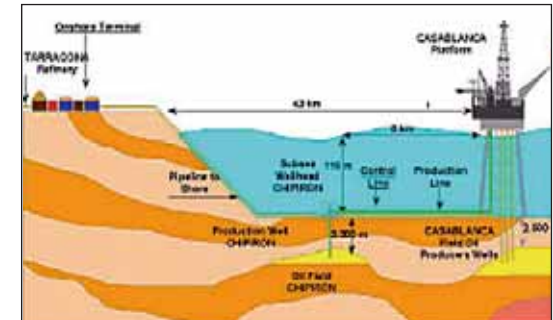


opérateur pourrait dans le futur sélectionner une source de CO₂ et savoir où le stocker et à quel prix. Le logiciel a été conçu pour calculer le meilleur trajet de transport du gaz, en prenant en compte la distance, mais aussi les réseaux de pipelines disponibles et les caractéristiques géographiques (topographie, urbanisation, rivière...). Théoriquement, il permettra également de connaître le coût de la séparation, de la compression, du transport et de l'injection du gaz. Finalement, les flux financiers peuvent être évalués sur une simple feuille de calcul intégrée au programme. L'analyse des coûts utilisant les indicateurs DSS se base sur le prix de la capture par les méthodes de postcombustion par absorption amine et de

précombustion. Ce prix a pu être évalué précisément pour plus de 350 centrales électriques européennes et plus de 340 installations industrielles. Dans les centrales utilisant des combustibles fossiles, il dépend de nombreux paramètres, dont les principaux sont le type d'installation, l'accroissement des investissements et les pertes de rendement (comprises entre 6 et 12 points). D'une manière générale, le coût de la production d'électricité pourrait passer de 30-45 euros/MWh à 40-60 euros/MWh, sans compter le transport et le stockage du CO₂. Le prix de revient total de la filière fait aussi l'objet d'évaluations. Il a déjà été étudié pour 17 installations européennes.



Dans le cadre du projet Castor, ► le gisement pétrolier abandonné de Casablanca en mer Méditerranée, à 43 km au large de la côte espagnole de Tarragone, fait l'objet d'une étude de stockage de CO₂ dans les champs de pétrole épuisés.



Une filière à développer

Des besoins en recherche et développement

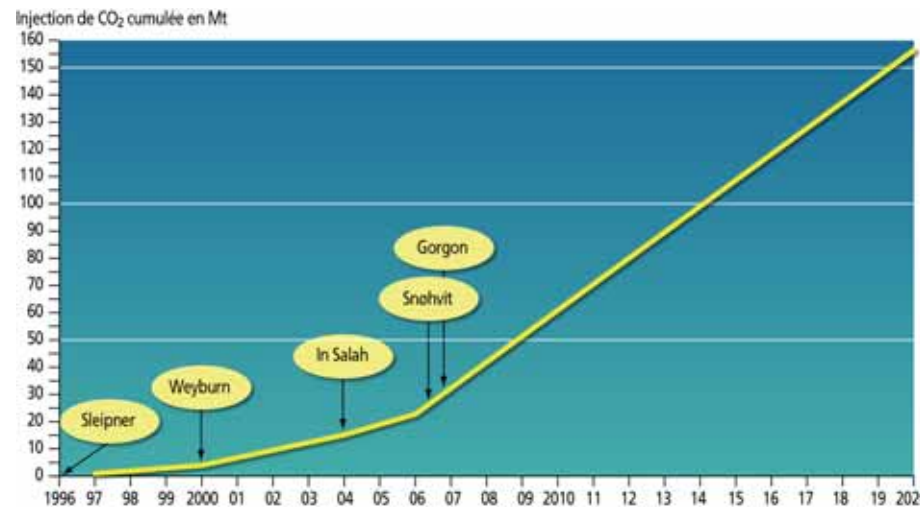
Des travaux de recherche et développement sont nécessaires pour développer de nouvelles techniques, plus économiques et plus sûres, pour la capture et le stockage du gaz carbonique. Ils sont notamment indispensables pour acquérir la maîtrise de la compréhension des processus chimiques et physiques dans les structures géologiques susceptibles de recevoir le CO₂. Des méthodologies sont également à développer pour la sélection des sites de stockage et la prédiction à long terme de l'impact du CO₂ sur le réservoir et l'environnement, pour l'évaluation des risques, ou pour la surveillance et la vérification. De nombreux projets d'étude dans le monde s'attellent à cette tâche.

Le projet CASTOR

Coordonné par l'IFP, le projet "Capture and Storage of CO₂" Castor concerne onze pays européens et

regroupe trente partenaires publics et privés de l'industrie et de la recherche. Il a débuté en février 2004 et devrait s'achever en 2008. Son budget est de 15,8 millions d'euros, avec une contribution de l'Union européenne de 8,5 millions. Castor a deux objectifs principaux : le premier est de réduire de

▼ Les quantités cumulées de gaz carbonique stockées sur les sites de Sleipner (1 Mt par an), de Weyburn (1,8 Mt/an) et d'In Salah (1 Mt/an) atteignent aujourd'hui une vingtaine de millions de tonnes. Avec les stockages prévus à Snøhvit (0,75 Mt/an, à la mi-2006) et à Gorgon (4 à 5 Mt/an, fin 2006), le total atteindra 50 Mt en 2009 et 100 Mt en 2014 et certainement plus avec les projets à venir.



Le réseau d'excellence européen CO₂GeoNet

Le réseau d'excellence européen CO₂GeoNet sur le stockage géologique du CO₂ a pour objectif de renforcer l'intégration et la coordination de 13 organismes de recherche européens (notamment les principaux services géologiques nationaux) dont l'expertise est



reconnue au plan international : BGS (coordinateur, Grande-Bretagne), BGR (Allemagne), GEUS (Danemark), BRGM et IFP (France), OGS et Université de Rome (Italie), NIVA, RF et SPR (Norvège), TNO (Pays-Bas), Imperial College et Université d'Heriot Watt (Grande-Bretagne). Plus de 100 chercheurs sont impliqués dans 6 domaines prioritaires de recherche :

- L'intégration des caractéristiques géologiques d'un site dans un modèle géologique.
- Le développement d'outils de modélisation prédictive.
- L'expérimentation en laboratoire et sur sites,
- La mise au point de méthodes géophysiques et géochimiques de surveillance.
- Le développement de méthodologies d'évaluation des risques.
- Le couplage du stockage de CO₂ à la récupération assistée d'hydrocarbures.

Ce réseau d'excellence a été initié en 2004 avec un soutien de 6 millions d'euros répartis sur 5 ans de la Commission européenne dans le cadre de son 6^e programme cadre de recherche et développement (PCRD). Il a vocation à se développer au-delà des 5 ans, avec le soutien d'autres sources de financement publiques ou privées, et en intégrant de nouveaux membres, de manière à renforcer l'espace européen de la recherche dans ce domaine tout en développant une coordination avec les programmes de recherche nationaux.

Le réseau CO₂NET



Créé en 2002, ce réseau thématique européen soutenu par la Commission européenne comporte aujourd'hui 65 membres répartis sur 19 pays.

Regroupant chercheurs, développeurs et utilisateurs de la technologie de capture et de stockage de CO₂, il a pour but de faciliter les échanges et

Les principaux programmes dans le monde

la coopération entre les différents acteurs.

Les organismes français membres sont : Air liquide, BRGM, CEA, Compagnie Générale de Géophysique, Gaz de France, IFP, Total.

Le projet européen Inca-CO₂

Le projet Inca-CO₂ a pour objectif de positionner, sur le plan international, le savoir-faire européen dans le domaine de la capture et du stockage du CO₂.

Ce projet réunit, depuis 2005, autour de l'IFP, 6 centres de recherche européens, BGS (Grande-Bretagne), BRGM (France), GEUS (Danemark), OGS (Italie), Sintef (Norvège) et TNO (Hollande) ainsi que 4 partenaires industriels majeurs, Alstom, BP, Statoil et Vattenfall (premier groupe suédois d'électricité très fortement implanté en Allemagne). Ce groupe constitue une structure de coopération, de concertation et d'échanges sur laquelle va s'appuyer la Commission Européenne dans ses négociations internationales. Plusieurs axes seront parallèlement développés : identifier les possibilités de coopération futures entre l'Europe et ses partenaires internationaux (Australie, Canada, États-Unis et Japon), fournir toutes les informations utiles aux représentants européens siégeant dans les organisations internationales comme le CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum) et dégager une vue cohérente sur l'activité internationale relative au domaine de la capture et du stockage du CO₂, afin de promouvoir les politiques européennes à venir. Le projet Inca-CO₂ a obtenu le financement de l'Union européenne.

CASTOR : ce projet européen 2003-2008 intégrant toute la chaîne capture-transport-stockage du CO₂ s'intéresse aussi par extension au stockage de l'hydrogène. Il comporte de nombreux sous-projets ayant pour objectifs l'installation de pilotes réels de démonstration, l'optimisation technique de la chaîne, la quantification des risques, l'établissement de scénarios réalistes techniquement et économiquement.

Partenaires : IFP (coordinateur), Alstom Power, BASF, BGR, BGS, BRGM, Elsam, ENI, Gaz de France, GEUS, GVS, Imperial College, Mitsui Babcock, NTNU, OGS, Powergen, PPC, Repsol, Rohoel, RWE, Siemens, Sintef, Statoil, TNO, Université de Stuttgart, Université de Twente, Vattenfall.

<http://www.co2-castor.com>

CCP (USA) : le projet de R&D CO₂ Capture Project (CCP) piloté par un groupement d'industriels porte sur la réduction des coûts de capture, séparation et stockage géologique.

Partenaires : BP, BR, Chevron Texaco, ConocoPhillips, DOE, Encana, ENI, Klimatek NorCap, Norsk Hydro, Shell, Statoil, Suncor.

<http://www.co2captureproject.org/>

CMI (Carbon Management Initiative) : études sur le monitoring* de la séquestration du CO₂ et la mesure des risques de migration.

Partenaires : Alberta Energy and Utilities Board, EUB, Princeton University.

http://www.eub.gov.ab.ca/bbs/products/newsletter/2002-01/feature_02.htm

CO₂GeoNet : réseau d'excellence européen sur le stockage géologique de CO₂ visant à renforcer l'intégration et la coordination des équipes de recherche.

Partenaires : BGS (coordinateur), BGR, BRGM, GEUS, IFP, Imperial College, NIVA, OGS, RF, SPR, Sintef, TNO, Université d'Heriot Watt et Université de Rome.

<http://www.co2geonet.com>

CO₂NET : réseau thématique européen sur la capture et le stockage de CO₂ visant à faciliter les échanges et la coopération entre les différents acteurs.

Partenaires : Technology Initiatives (coordination), 65 organismes membres venant de 19 pays européens.

<http://www.co2net.com>

CO₂STORE : étude du comportement à long terme à Sleipner et de la faisabilité du stockage en aquifère sur 4 autres sites en Europe.

Partenaires : BGR, BGS, BP, BRGM, Énergie2, Exxon-Mobil, GEUS, Hydro, IFP, AIE, Industriekraft, GHG, NGU, Schlumberger, Sintef, Statoil, TNO, Total, Valleys Energy, Vattenfall.

<http://www.co2store.org/>

COAL-SEQ (US DOE Netl, depuis 2000) : séquestration du CO₂ dans des veines de charbon profondes.

Partenaires : Advanced Resources International, Alberta Research Council ECBM, BP America, Burlington Resources, Recopol Project Consortium. Premiers pilotes dans le San

Juan Basin, Usa (site Allison opéré par Burlington Resources, injection de CO₂ depuis 1995 et Tiffany par BP). Travaux avec Recopol et l'ARC.
<http://www.coal-seq.com/>

CSI (Carbon Sequestration Initiative 2002-2007, Massachusetts Institute of Technology) : recherche allant de la capture de CO₂ à toutes les techniques de séquestration (forêts, réservoirs géologiques, océan profond...). Consortium regroupant Alstom Power, American Electric Power, American Petroleum Institute, Aramco Services, ChevronTexaco, Électricité de France, Epri, ExxonMobil, Ford Motor Company, General Motors, Peabody Energy.
<http://sequestration.mit.edu>

GEODISC (depuis 1999) : l'Australian Petroleum Cooperative Research Centre (APCRC) conduit l'inventaire des réservoirs potentiels en Australie, l'étude approfondie de quelques sites avec modélisation, des études de réservoirs de CO₂ analogues, la mise au point d'un programme de monitoring* sur un site pilote (champ Various à partir de 2003) et la quantification des risques.
Partenaires : BHPP, BP Amoco, Chevron, Gorgon, Shell, Woodside.
http://www.apcrc.com.au/Programs/geodisc_res.html

GEOSEQ (2000-2015, DOE-NETL, National Energy Technology Laboratory) : l'objectif de ce programme est de rendre effectif en 2015 la séquestration à grande échelle de CO₂ dans les formations géologiques. Aujourd'hui ce projet dispose d'un site pilote au Texas, Frio Brine Pilot (formation saline) depuis avril 2002.
Partenaires : Alberta Research Council (ARC), BP-Amoco, Chevron, IFP, Pan Canadian Resources, Stanford University, Statoil, Texaco, US Geological Survey.
<http://esd.lbl.gov/GEOSEQ/>

GESTCO (Geological Storage of CO₂, 2000-2004) : projet de l'Union européenne d'inventaire des capacités de stockage de CO₂ en Europe.
Partenaires : Geus (Service géologique du Danemark et du Groënland) coordinateur, BGR (Institut fédéral des géosciences et des ressources naturelles, Allemagne), BGS, BRGM, Ecofys (Pays-Bas), GSB (Service Géologique de Belgique), IGME (Institut de géologie et d'exploration minière, Grèce), NGU (Service géologique de Norvège), NITG-TNO (Service géologique des Pays-Bas),
www.nitg.tno.nl/projects/eurogeosurveys/projects/GestcoWeb

ICBM (EU) : développement d'outils de caractérisation et de modélisation pour améliorer la récupération de méthane par injection de CO₂ dans les charbons.
Partenaires : BP, Deutsche Steinkohle Aktiengesellschaft, IFP, Imperial College, Université de Delft, Wardell Armstrong.

AIE Weyburn Monitoring and Storage Project (2001-2004) : stockage de CO₂ dans le champ pétrolier de Weyburn (Saskatchewan, Canada) avec récupération assistée de pétrole.
Partenaires : Encana (l'opérateur pétrolier), Dakota Gasification Company (le fournisseur de CO₂), PTRC (Petroleum Technology Research Center, coordinateur du projet de recherche), équipes de recherche canadiennes et américaines, équipe de recherche européenne (BGS et Quintessa, GB ; BRGM, France ; GEUS, Danemark ; INGV, Italie).
<http://www.ptrc.ca>

IN SALAH : projet industriel de stockage de CO₂ en Algérie dans un réservoir de gaz en voie d'épuisement. Un million de tonnes de CO₂ par an est injecté depuis août 2004.
Partenaires : BP, Sonatrach et Statoil.

INCA CO₂ (depuis 2004) : positionner, sur le plan international, le savoir-faire européen dans le domaine de la capture et du stockage du CO₂.
Partenaires : IFP (coordinateur), Alstom, BGS, BP, BRGM, GEUS, OGS, Sintef, Statoil, TNO, Vattenfall.

IPGP (2003) : étude des mécanismes fondamentaux liés au devenir du CO₂ dans le sous-sol.
Partenaires : IPG (coordinateur), Schlumberger, Total.
<http://www.ipgp.jussieu.fr/francais/rub-recherche/programmes/CO2.html>

NASCENT (2001-2004) : études de réservoirs analogues naturels de CO₂ en Europe. Cofinancé par la Commission Européenne.
Partenaires : BGR, BGS, BP, BRGM, AIE-GHG, IGME, MAFI, Statoil, TNO, Université de Rome.
<http://www.bgs.ac.uk/nascent/>

NGCAS (2002-2004) : le projet Next Generation Capture And Storage fait partie du CCP ; commandé par l'Union européenne, il vise à développer une méthodologie et des outils pour maximiser le stockage de CO₂ ; études de faisabilité sur gisements en fin de production en mer du Nord.
Partenaires : BP (coordinateur), AEA Technology, BGS, GEUS, IFP, Statoil.

PICOREF (F) : le projet sur le piégeage du CO₂ dans les réservoirs en France (Picoref) a pour objectif de préparer les démonstrations industrielles d'injection de CO₂ dans le sous-sol français (gisements d'hydrocarbures et aquifères salins notamment).
Partenaires : IFP (coordinateur), Air Liquide, Alstom, Armines (ENSM-SE), BRGM, CFG Services, CGG, Correx, Gaz de France, Géostock, Ineris, Laboratoire des mécanismes de transfert en géologie (LMTG), Magnitude, SNET, Total.

RECOPOL (EU, 2002-2005) : essai pilote de séquestration de CO₂ dans une veine de charbon en Pologne. Le projet inclut également des essais de laboratoire, l'élaboration de modèles géologiques, la mise en œuvre de simulations et des études d'impact technique et socio-économique.
Partenaires : TNO-NITG (coordination Pays-Bas), Central Mining Institute, Csiro, DBI-GUT, Gaz de France, Gazonor, AIE-GHG, IFP, Jcoal, Shell-RTS, Universités technologiques d'Aachen et de Delft.
<http://www.nitg.tno.nl/eng/projects/recopol/index.shtml>

RITE CO₂ Geological Sequestration project (2000-2004) : étude de la faisabilité du stockage géologique de CO₂ au Japon. Test d'injection en aquifère (10 000 tonnes sur 18 mois, soit environ 20 t CO₂ par jour).
Partenaires : RITE, ENAA Engineering Advancement Association of Japan.
<http://www.rite.or.jp/English/E-home-frame.html>

SACS : étude du stockage de CO₂ dans l'aquifère salin d'Utsira, sur le site de Sleipner en mer du Nord (Norvège).
Partenaires : Statoil (coordinateur), BGS, BP, BRGM, Exxon-Mobil, GEUS, IFP, Norsk Hydro, TNO-NITG, Sintef, Total, Vattenfall.
<http://www.ieagreen.org.uk/sacshome.htm>

À la recherche d'un cadre juridique

Il n'existe pas aujourd'hui de législation ou réglementation spécifique au stockage souterrain du CO₂, ni de statut légal du CO₂ provenant des grandes installations de combustion. Le CO₂ est-il un déchet ? Si oui, faut-il le ranger dans la catégorie déchet industriel ou déchet industriel dangereux ?

De nombreux textes réglementaires apportent une amorce de réponse, mais aucun ne prend en compte le stockage de ce gaz sur une longue période, destiné à éviter qu'il ne se déverse dans l'atmosphère.

Les futurs textes réglementant cette activité devront donc intégrer la notion de stockage sur le long terme, une notion nouvelle qui devra préciser d'une manière légale les durées propres au stockage qui s'étendent au-delà du siècle. Pour l'heure, les projets pilotes se réfèrent à d'autres textes, tels ceux régissant le stockage souterrain du gaz naturel ou relatifs à l'exploitation pétrolière en mer du Nord. Le problème législatif est cependant différent, selon que le CO₂ est stocké sous la mer ou sous la terre ou encore selon son origine.

pour le stockage dans le sous-sol marin

Aujourd'hui, le stockage en mer du Nord est régi par deux textes qui traitent de la protection de l'environnement marin lors de l'immersion de déchets : la convention de Londres (1972, 1996) et la convention Oskar (Convention for the Protection of the Marine Environment of the North East Atlantic). Le but de ces traités est de protéger l'écosystème marin d'une éventuelle pollution. Mais ces textes n'ont pas intégré le stockage du gaz carbonique comme un moyen de réduction des émissions. En l'absence de nouvelle législation, il semble cependant légalement possible pour la Convention OSPAR de capter le gaz sur le continent pour l'injecter sous la mer à condition qu'il soit convoyé

par pipeline - une solution étudiée aujourd'hui par les Britanniques.

Pour clarifier la situation, un groupe de travail émanant de la Convention de Londres s'est constitué. Il devra faire la liste des différents points juridiques de la Convention et du Protocole de 1996 qui pourraient concerner le stockage du CO₂, afin de débattre d'une éventuelle adaptation ou d'amendements futurs.

pour le stockage souterrain

Le sujet est plus complexe car il dépend des lois en vigueur dans chaque pays et du site de stockage utilisé. Le stockage via une opération de récupération assistée de pétrole bénéficie des lois existantes dans ce domaine (le code minier de chaque pays prévoit ce genre d'opération). Une injection dans un aquifère* pose plus de problèmes : elle fait appel à la réglementation sur le stockage souterrain de gaz naturel, ou aux lois sur l'eau. Il faut également mentionner la directive européenne sur la mise en décharge des déchets, qui définit le stockage souterrain comme étant un stockage

▼ Plate-forme de Statfjord en mer du Nord (Norvège) qui exploite un gisement de gaz naturel avec un projet de stockage de CO₂ dans le sous-sol marin.



© Statoil

permanent dans des cavités rocheuses ; mais, pour servir de base réglementaire, elle devra être adaptée car elle ne concerne pas les produits soumis à des modifications physiques ou chimiques.

À la recherche d'un cadre politique

Un rapport spécial sur la technologie de capture et stockage du CO₂ est en cours d'élaboration par l'instance scientifique internationale que constitue le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC*). Le rapport fera le point sur les aspects techniques, économiques et environnementaux de la filière, afin d'aider la prise de décision au niveau politique. Une dynamique est donc enclenchée au niveau international, dans le cadre du protocole de Kyoto, pour ajouter la capture et le stockage du CO₂ comme instruments complémentaires de lutte contre l'effet de serre. Le sixième programme d'action communautaire pour l'environnement a fait du changement climatique un domaine d'action prioritaire et a prévu de mettre sur pied un système communautaire pour l'échange de droits d'émission. Il reconnaît que la Communauté s'est engagée à opérer, de 2008 à 2012, une réduction de 8 % des émissions de gaz à effet de serre par rapport aux niveaux d'émission de 1990, et qu'à long terme, il conviendra de réduire les émissions de gaz à effet de serre d'environ 70 % par rapport aux niveaux d'émission de 1990.

Des permis négociables* de CO₂

La directive 2003/87/CE du Parlement européen et du Conseil du 13 octobre 2003 (modifiée par la directive 2004/101/CE du 27 octobre 2004) établit un système communautaire d'échange de droits d'émission de gaz à effet de serre : l'European Union Emission Trading Scheme (EU-ETS) depuis le 1^{er} janvier 2005.

Ce système se déroule sur deux périodes, la première allant de 2005 à 2007 et la seconde de 2008 à 2012. Ces permis négociables* s'appliquent, du moins pour la première période, aux seules émissions de dioxyde de carbone provenant de cinq secteurs d'activités : la production d'énergie, de métaux ferreux, l'industrie minérale (cimenterie, verrerie), la fabrication de produits céramiques et la production de pâte à papier. À partir de 2008, d'autres secteurs comme la chimie ou l'industrie de l'aluminium pourront être inclus dans la directive.

Un certain nombre de quotas d'émissions est alloué pour la période, à chaque installation industrielle concernée par la directive. Un quota de CO₂ correspond à une tonne de CO₂. Tous les ans, chaque installation devra comptabiliser ses émissions réelles de CO₂. Les installations dont les émissions réelles seront inférieures à leurs quotas annuels disposeront de quotas en excès et pourront soit les mettre en réserve pour les années suivantes, soit les vendre sur le marché. A contrario, celles qui émettront plus de CO₂ que leurs quotas devront acheter sur le marché les quotas manquants, sous peine de payer une amende non libératoire, de 40 euros par tonne de CO₂. Le système devrait s'étendre au marché international à l'horizon 2008 et les pénalités augmenter (100 euros la tonne), ce qui ouvre de belles perspectives à la capture et au stockage du gaz carbonique.

Ce marché européen de droits d'émissions de CO₂ ne doit pas être considéré pour l'heure comme un marché mature. Ceci pour plusieurs raisons : tous les plans nationaux d'allocations de quotas ne sont pas encore attribués – les industriels découvrent un système de gestion de quotas de CO₂ qui est nouveau pour eux – et la bourse européenne qui reliera tous les marchés nationaux n'est pas encore opérationnelle. Aujourd'hui, l'information sur le prix de la tonne de CO₂ provient de traders qui enregistrent des transactions bilatérales, à terme. Depuis le 1^{er} janvier 2005, le prix du quota européen de CO₂ ne cesse de croître : ayant démarré à près de

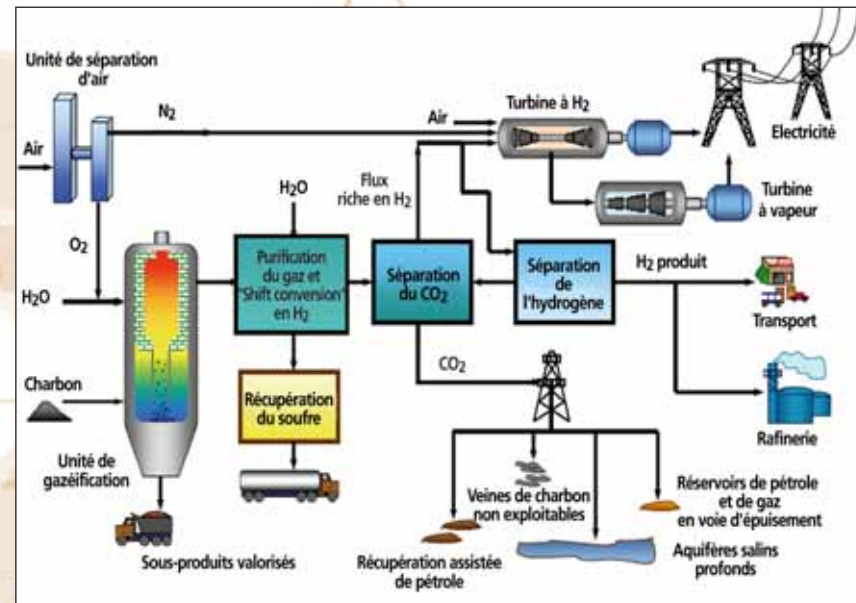
5 €/t CO₂ en janvier 2005, il se situe, après six mois, à plus d'une vingtaine d'euros/t CO₂. Selon la Commission européenne, 6,5 milliards de quotas – et donc autant de tonnes de CO₂ – ont été attribués pour 2005-2007 à environ 11 500 sites industriels européens. 10 % devraient être échangés, soit un marché annuel de 200 à 300 millions de tonnes et de quelque 20 milliards d'euros.

Un choix de société

Comment sera accueilli par le grand public le stockage massif du CO₂ en France ? Les quelques sondages réalisés mettent en évidence une méconnaissance totale de cette technologie. Quand le public est informé, les questions concernant les craintes sur la pérennité des installations ou les risques de fuite reviennent régulièrement. Un gros travail d'explication et de dialogue avec le public – en particulier avec les populations qui résident à proximité des sites de stockage envisagés – devra donc accompagner la démarche auprès des différents acteurs sociaux, avec des garanties de transparence et de contrôles indépendants. La gestion du stockage du CO₂ devra être assurée dans des conditions de sécurité totale et jugées satisfaisantes par l'opinion publique.

FutureGen (États-Unis), HypoGen (Europe)

La crainte de voir la capture et le stockage du CO₂ servir d'alibi pour ne pas développer des énergies alternatives ou la maîtrise de l'énergie est l'un des principaux arguments contre la mise en place de la filière. On peut à l'inverse affirmer que l'obligation faite aux consommateurs d'énergies fossiles d'effacer leurs émissions, en renchérissant la filière, facilitera le développement des énergies renouvelables et d'économies d'énergies plus massives.



▲ Schéma de principe du programme FutureGen

À partir de la gazéification de charbon, l'objectif est de produire de l'électricité et de l'hydrogène sans rejeter de gaz carbonique, puisqu'il sera immédiatement capturé et stocké dans des aquifères salins profonds, des gisements d'hydrocarbures en voie d'épuisement ou des veines de charbon.

Il est important de replacer la capture et le stockage dans la perspective d'une pluralité des sources énergétiques. La mise en place d'une filière énergétique basée sur la capture et le stockage du CO₂ peut être illustrée par l'initiative FutureGen du département de l'énergie américain (DOE), maître d'œuvre du projet. Lancé en 2004 avec des partenaires industriels, ce programme a pour objectif d'extraire l'hydrogène du charbon, dont les États-Unis possèdent 23 % des réserves mondiales. Le DOE dispose d'un budget d'un milliard de dollars pour créer en 10 ans une usine de 275 MW qui utilisera du charbon gazéifié pour produire de l'électricité et de l'hydrogène, et cela sans pollution, le gaz carbonique dégagé étant immédiatement capturé et stocké dans le sous-sol. De son côté, l'Europe a lancé, avec HypoGen, un programme similaire : 1,3 milliard d'euros vont être consacrés à la mise en place d'un site pilote européen de production d'hydrogène à partir de charbon gazéifié ou de gaz naturel.

L'engagement de la France

Plusieurs acteurs nationaux jouent en Europe un rôle important dans la recherche sur la capture et le stockage du CO₂ à long terme, et ceci depuis le premier projet européen "The underground disposal of carbon dioxide" (Joule II Project 1993-1995) qui a permis de démontrer la faisabilité de cette technologie et auquel le BRGM a participé. Depuis plus de dix ans, ils contribuent ainsi à la plupart des projets européens et à certains projets internationaux concernant le stockage géologique, en particulier ceux liés aux premières applications industrielles (Sleipner, Weyburn).

En 2001, une étude prospective nationale sur la stratégie de la politique énergétique, menée par des organismes de recherche français (ADEME, BRGM, CEA, CNRS, IFP), a donné, parmi différentes mesures, une priorité aux technologies de capture et stockage de CO₂ considérées comme une option forte pour à la fois s'attaquer aux problèmes du changement climatique et créer de la valeur ajoutée industrielle. Ce travail de prospective stratégique, soutenu par une communauté scientifique dynamique et des industriels motivés, a initié des rapprochements pour créer un réseau national et participer aux projets européens et internationaux. La création du Club CO₂, la participation française au programme de l'Agence internationale de l'énergie sur la réduction des gaz à effet de serre (AIE GHG) et enfin la participation au forum international CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum) marquent les étapes principales de ce processus.

Des projets nationaux

- Un réseau s'est constitué pour l'étude du stockage géologique, il regroupe un consortium de compagnies pétrolières et gazières (Total, Gaz de France), la société Geostock, des centres de

recherche (BRGM, IFP, CNRS) et plusieurs universités françaises. Ce groupement, soutenu par le Réseau des technologies pétrolières et gazières (RTPG), a participé de 2002 à 2004 au projet "Piégeage du CO₂ dans les réservoirs" (Picor) ainsi qu'à une étude de faisabilité d'un pilote de stockage de CO₂ dans un gisement d'hydrocarbures. À l'étude également, une filière de charbon propre en France s'intéresse aux possibilités de stockage pour les usines de Gardanne (Bouches-du-Rhône) et Carling (Moselle). En 2005, ces efforts se poursuivent à travers le projet Picoref.

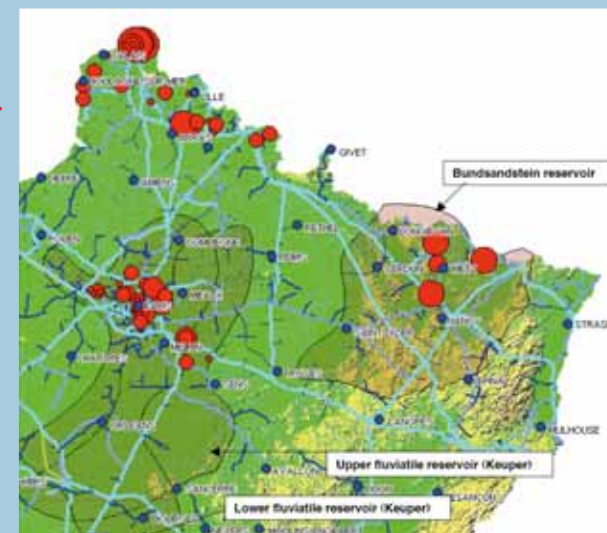
- En ce qui concerne la capture et le transport du CO₂, plusieurs projets sont conduits par les acteurs industriels de la filière (Air Liquide, Alstom, Arcelor, EDF, Gaz de France, Total, Lafarge) avec le soutien de l'ADEME. Les sujets portent sur le cycle calcium, la voie cryogénique, l'oxycombustion, les solvants, la boucle chimique, etc.
- L'Institut de physique du globe (IPGP) s'est associé en 2003 à deux acteurs majeurs de la recherche pétrolière, Schlumberger et Total, pour créer un programme d'études sur la capture et la circulation du CO₂ dans le sous-sol ; 6 laboratoires et 25 chercheurs sont impliqués dans ce projet soutenu par l'ADEME.
- En 2005 doit débuter Metstor, programme soutenu par l'ADEME et associant un grand nombre de partenaires (Ineris, Gaz de France, Geostock, Cired, IPGP, ENSMP, BRGM, IFP, Université de Pau). Il a pour but la conception d'un outil d'aide à la décision pour la sélection des sites de stockage sur le territoire français.

PICOREF

Le projet sur le piégeage du CO₂ dans les réservoirs en France (Picoref) a pour objectif de préparer les démonstrations industrielles d'injection de gaz carbonique dans le sous-sol français (gisements d'hydrocarbures et aquifères* salins notamment). Il a été lancé par le ministère de l'Industrie dans le cadre du Réseau de technologies pétro-

lifères et gazières (RTPG) et par un consortium de sociétés françaises et d'universités. Son objectif est de développer les connaissances sur le stockage du CO₂ et d'identifier des sites pilotes de démonstration en France. D'ores et déjà le Bassin parisien apparaît comme un candidat potentiel pour capter le CO₂ produit par l'industrie et

La capacité de stockage des aquifères du Trias qui s'étend sur plus de 48 000 km² est de l'ordre de 22 milliards de tonnes de CO₂. Les points rouges représentent les principaux centres d'émission de CO₂. La topographie du soubassement des principaux bassins sédimentaires est représentée en courbes de niveau pour les profondeurs supérieures à 1 000 m.



Formation	Surface	Épaisseur nette moyenne	Porosité	Volume total des pores	Capacité de stockage (aquifère total)	Capacité de stockage (pièges)
	km ²	km		km ³	Mt CO ₂	Mt CO ₂
Buntsandstein	21 000	0,200	0,1	420	17 640	529
Keuper	27 500	0,025	0,15	103	4 331	130
Trias	48 500	0,225		523	21 971	659

le stocker dans les nappes aquifères salines de son sous-sol (nappes du Dogger et du Trias). Ces aquifères disposent de zones relativement bien connues, comme celles étudiées pour des raisons géothermiques ou pétrolières. Ils ont aussi l'avantage de se trouver à l'aplomb des zones productrices de gaz carbonique, ce qui réduit le coût

de son transport. Enfin, leurs capacités de stockage sont importantes : de l'ordre de 4 milliards de tonnes pour le Dogger, 22 milliards de tonnes pour les aquifères du Trias. En 2005, le projet examinera deux types de sites dans la région parisienne : un gisement d'hydrocarbures exploité et un aquifère salin profond.



◀ Le réservoir aquifère du Dogger offre une capacité de stockage de plus de 4 milliards de tonnes de CO₂. En rouge figurent les principales zones industrielles émettrices de CO₂.

Formation	Surface	Épaisseur nette moyenne	Porosité	Volume total des pores	Capacité de stockage (aquifère total)	Capacité de stockage (pièges)
	km ² ≈	km		km ³	Mt CO ₂	Mt CO ₂
Réservoir géothermique Paris	2 484	0,020	0,15	7	215	0,43
Dogger	15 000	0,100	0,1	150	4 320	8,64

- Enfin, la capture et le stockage du CO₂ figurent parmi les priorités de l'Agence nationale de la recherche (ANR) nouvellement créée en février 2005. Par ailleurs, la future Agence pour l'innovation industrielle pourrait aider à la réalisation de projets de démonstration industriels dans ce domaine.

Des projets européens

Des centres de recherche (BRGM, IFP) ainsi que quelques industriels (Gaz de France, Alstom, Total) prennent également part à des projets européens depuis 1993 : Joule II, Sacs, Gestco, Nascent, Weyburn, Recopol, Castor, CO₂Store, etc. La France participe aussi à CO₂Net, réseau thématique européen sur la capture et le stockage de CO₂, et à CO₂GeoNet. Ce réseau d'excellence sur le stockage géologique est coordonné par le British Geological Survey avec la participation du BRGM et de l'IFP.

Des actions internationales

Outre sa participation au programme de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) sur la réduction des gaz à effet de serre, la France est membre du CSLF, un forum international créé sur initiative américaine pour promouvoir les technologies performantes et économes de capture, transport et stockage du CO₂, dans des conditions de sécurité satisfaisantes. Le CSLF a aussi pour objectif de faciliter le développement du concept par un environnement politique et réglementaire approprié. Les membres de ce forum international sont l'Afrique du Sud, l'Allemagne, l'Australie, le Brésil, le Canada, la Chine, la Colombie, la Commission européenne, la France, la Grande-Bretagne, l'Inde, l'Italie, le Japon, le Mexique, la Norvège, les Pays-Bas, la Russie, les USA.

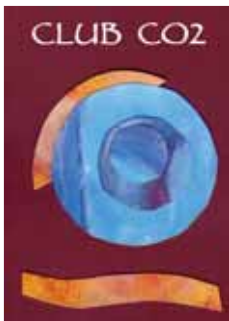
Le CSLF joue un rôle d'instance de référence et peut labelliser des projets.

Pour la première fois, en 2005, à Gleneagles (GB), le sommet du G8 a consacré sa réunion à la lutte contre le réchauffement climatique, en soulignant la nécessaire coopération entre les pays développés et les pays émergents – en particulier la Chine et l'Inde – qui vont devenir les plus importants émetteurs de CO₂ du fait de leur développement industriel s'appuyant principalement sur le charbon.

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.

Il est clair aujourd'hui que ce n'est qu'en associant les économies d'énergie, le développement des énergies renouvelables et la capture et le stockage du CO₂ que l'on pourra espérer atteindre une stabilisation des concentrations de gaz carbonique dans l'atmosphère et écarter ainsi la menace d'un bouleversement climatique de grande ampleur.

Le Club CO₂



Le Club CO₂ est né en 2002 à l'initiative de l'ADEME, avec l'appui de l'IFP et du BRGM qui assurent son secrétariat. Il constitue un élément clé de la structuration de la recherche française dans le domaine de la capture et du stockage du gaz carbonique. Il répond, en effet, à la nécessité de mieux fédérer les actions nationales, tout en leur donnant une meilleure visibilité. Le Club réunit, sous la présidence de l'ADEME, les acteurs majeurs concernés du monde industriel et de la recherche. Lieu d'échange, d'information et d'initiatives entre ses membres dans le domaine des études et des développements technologiques

en matière de capture, transport et stockage géologique du CO₂, le Club encourage la coopération à l'échelle nationale entre les secteurs public et privé, et ses initiatives sont à l'origine de plusieurs projets de recherche.

Des groupes thématiques ont été créés pour regrouper l'ensemble des informations sur la filière. Les données sont utilisées pour identifier les axes de progrès et recommander aux instances décisionnelles de financement la mise en place de travaux interdisciplinaires. Il joue enfin le rôle de vitrine pour promouvoir l'offre technologique française dans l'espace européen et international.

À la date du 1^{er} septembre 2005, le Club CO₂ compte les membres suivants :

ADEME, Air Liquide, Alstom, Arcelor, BRGM, CNRS, EDF, Gaz de France, Geostock, IFP, Lafarge, SARP Industries, Total.

ADEME



© CEUS/P. Warna-Moors.

Les missions du Club CO₂

- identifier des lignes d'orientations et défis majeurs pour des programmes scientifiques et techniques ;
- recommander aux instances décisionnelles du financement de la recherche, la mise en place et le développement de travaux interdisciplinaires ;
- réaliser des études prospectives, à partir notamment d'une activité de veille technologique et stratégique sur la thématique ;
- promouvoir l'offre technologique française dans l'espace européen et à l'international ;
- encourager des actions de coopération entre les équipes de recherche des secteurs publics et privés ;
- favoriser les contacts et les échanges d'information entre tous les acteurs concernés par ce domaine : industriels, organismes de recherche, pouvoirs publics ;
- diffuser et communiquer l'information : banques de données, site Web, Forum ;
- organiser des séminaires thématiques spécialisés.

Deux groupes thématiques ont été mis en place au sein du Club CO₂ en 2004 : l'un sur la capture et le transport, l'autre sur le stockage géologique du CO₂. L'objectif de ces deux groupes de travail est de proposer des axes de recherche et développement à moyen terme prioritaires pour la France, afin de promouvoir et coordonner la R&D nationale, pour chacune des "briques technologiques" nécessaires au succès de l'ensemble du programme, en cohérence avec les initiatives européennes et internationales.

◀ La capture et le stockage géologique du gaz carbonique émis par les activités industrielles et celles de la production d'énergie, associés aux économies d'énergie et au développement des énergies renouvelables s'impose comme une solution incontournable pour réduire les gaz à effet de serre.



L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), établissement public, participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public et les aide à financer des projets dans cinq domaines : les déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique, les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit, et à progresser dans leurs démarches de développement durable.

Dans le cadre de ses missions, l'ADEME contribue à la réduction des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique et a inscrit la capture et le stockage du CO₂ dans ses priorités de recherche. À ce titre, elle participe à la fédération et à la structuration des efforts nationaux dans le domaine, avec en 2002, la création du CLUB CO₂. L'ADEME soutient de nombreux projets et initiatives sur l'ensemble de la chaîne technologique capture/transport et stockage, avec une attention particulière aux impacts socio-économiques et environnementaux dans une perspective de développement durable.



Le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), service géologique national, est un établissement public qui conduit une triple mission : recherche, expertise et coopération internationale. Ses objectifs sont d'une part, de comprendre les phénomènes géologiques, développer des méthodologies nouvelles, produire et diffuser des données pertinentes et de qualité et d'autre part, de mettre à disposition les outils nécessaires aux politiques de gestion du sol, du sous-sol et des ressources, de prévention des risques naturels et des pollutions, d'aménagement du territoire.

Le BRGM fait partie des pionniers dans les recherches sur le stockage de CO₂ en formations géologiques. Il a participé de 1993 à 1995 au premier projet de recherche européen sur la faisabilité du concept, le projet Joule II "The underground disposal of carbon dioxide". Depuis, il contribue activement à de nombreux autres projets européens et français : SACS, Gestco, Nascent, Weyburn, CCP Samcards, Picor, Castor, InCA-CO₂, Ulcos, Picoref. Il joue un rôle clé dans le management du réseau d'excellence européen CO₂GeoNet, est membre actif du réseau thématique européen CO₂Net et assure le secrétariat du Club CO₂ français. Le BRGM est en particulier reconnu pour ses compétences en modélisation des interactions chimiques entre le CO₂ injecté et la roche réservoir. Ses recherches portent plus largement sur la sélection et la caractérisation des sites de stockage, la modélisation prédictive et les méthodes de surveillance, afin de garantir la sécurité des sites de stockage.



L'IFP est un centre de recherche, d'innovation technologique et de formation dans les domaines des énergies, des transports et de l'environnement, dont la vocation est de développer les savoirs et les technologies permettant de fournir l'énergie pour satisfaire les besoins mondiaux croissants de mobilité, de façon durable et respectueuse de l'environnement, tout au long du XXI^e siècle.

La résolution des problèmes liés à la capture, au transport et au stockage du CO₂ constitue une de ses cinq priorités stratégiques. Les actions engagées visent à réduire les émissions de CO₂ provenant de la combustion des carburants ou des combustibles fossiles par la mise au point de moteurs et carburants plus performants et moins polluants ou à les éliminer en capturant puis en stockant durablement dans le sous-sol le CO₂ émis par les centrales thermiques et les installations industrielles de grande puissance. Dans ce domaine, l'IFP participe activement à de nombreux projets français et européens sur l'ensemble des thèmes de la capture jusqu'au stockage géologique. Plus particulièrement, l'IFP coordonne les projets Castor (projet européen visant à réduire de moitié le coût de la capture du CO₂ et à valider le concept du stockage géologique), InCA-CO₂ (International Cooperation Actions on CO₂ capture and storage, projet européen visant à positionner, sur le plan international, le savoir-faire européen dans le domaine) et Picoref (piégeage du CO₂ dans les réservoirs en France).

Glossaire

Adsorption : phénomène de surface par lequel des molécules de gaz ou de liquides se fixent sur les surfaces solides des adsorbants selon divers processus plus ou moins intenses. Les argiles et les zéolites sont de bons adsorbants naturels ; le charbon actif est un excellent adsorbant.

Aquifère : formation géologique perméable qui contient de l'eau. Les aquifères les plus superficiels contiennent de l'eau douce utilisée pour l'alimentation en eau potable. Les aquifères plus profonds contiennent de l'eau salée totalement impropre à la consommation humaine. On les appelle aquifères salins profonds. Les aquifères abritent parfois des gisements de pétrole et de gaz quand, localement, l'eau de l'espace intergranulaire de la roche est remplacée par des hydrocarbures. Ils peuvent aussi contenir des gisements de CO₂ pur, d'origine naturelle. D'où l'idée de stocker du CO₂ dans les pores des roches pour imiter ces gisements naturels de CO₂.

CO₂ (dioxyde de carbone ou gaz carbonique) : 1,5 fois plus lourd que l'air, le CO₂ n'existe pas sous forme liquide à pression atmosphérique ; une tonne de CO₂ contient 0,27 tonne de carbone.

ECBM (Enhanced Coal Bed Methane) : procédé de récupération assistée de méthane, permettant d'exploiter le gaz naturel qui se trouve piégé dans le charbon.

EOR (Enhanced Oil Recovery) : procédé de récupération assistée du pétrole qui permet d'améliorer la production des gisements de pétrole.

Gaz de synthèse : produit intermédiaire, mélange d'oxyde de carbone (CO) et d'hydrogène (H₂) pro-

▼ Réservoir de grès
(grossi 15 fois)



© CO₂ Capture project

duit par oxydation partielle* ou par vaporeformage*. Le gaz de synthèse est utilisé dans de nombreuses industries pour produire de l'énergie (électricité, hydrogène) et des produits chimiques (carburants de synthèse).

GES : gaz à effet de serre. Les deux principaux gaz responsables de l'effet de serre sont la vapeur d'eau (H₂O) et le gaz carbonique (CO₂). Les principaux autres gaz "naturels" à effet de serre sont le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O) et l'ozone (O₃). Les principaux gaz industriels à effet de serre sont les halocarbures (HFC, PFC, CFC...) et l'hexafluorure de soufre (SF₆) qui absorbent très fortement les infrarouges, beaucoup plus que le gaz carbonique et qui ont des durées de vie dans l'atmosphère qui peuvent être très longues (jusqu'à 50 000 ans). Le gaz carbonique (dont le temps de séjour est supérieur au siècle) engendre environ 55 % de l'effet de serre anthropique ; il provient pour l'essentiel de la combustion des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz).

GIEC : le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat a été créé en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations unies pour l'Environnement (PNUE). Son rôle est d'évaluer l'information scientifique, technique et socio-économique pertinente pour comprendre le risque du changement climatique d'origine humaine. Son appellation anglaise est IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change.

Gt (gigatonne) : 1 Gt = 1 milliard de tonnes.

Monitoring : surveillance quantitative et qualitative d'un milieu naturel ou d'une opération industrielle couplant réseau de mesures et modélisations prédictives.

NIMBY (Not In My Backyard, "pas dans mon jardin") : phénomène de résistance sociale à accepter près de chez soi tout projet qui menacerait ou qui serait perçu comme une menace à sa qualité de vie.

Oxydation partielle : procédé utilisé dans des installations industrielles pour produire du gaz de synthèse à partir de combustibles (charbon, biomasse, fioul lourd, etc.) et d'oxygène.

ppmv : parties par million en volume ; manière de décrire combien un échantillon gazeux (air atmosphérique par exemple) contient d'une substance donnée (dioxyde de carbone par exemple) ; 1 ppmv correspond à 1 cm³ par m³.

Puits de carbone : systèmes (océan, forêts et sols essentiellement) qui absorbent naturellement une partie du CO₂ émis dans l'atmosphère.

Permis négociables : dispositif selon lequel il est possible pour un pays (ou une entreprise) qui a réduit ses émissions au-delà de l'objectif assigné de vendre les droits d'émissions correspondants à un pays (ou une entreprise) qui ne pourrait réduire suffisamment ses émissions pour atteindre son objectif.

Vaporeformage : Procédé utilisé pour produire du gaz de synthèse à partir d'un combustible léger (gaz naturel) et de vapeur d'eau. Le vaporeformage du gaz naturel permet d'obtenir les concentrations les plus importantes en hydrogène.

www.clubco2.net

L'objectif de ce site est de mettre à la disposition des chercheurs, professionnels du secteur et aussi d'un public intéressé (scientifiques, journalistes, enseignants, ONG environnementalistes...), les données et les informations essentielles sur la capture et le stockage du gaz carbonique comme solution à la problématique du réchauffement de la planète.

Ce site se veut un lieu d'échanges pour encourager la coopération à l'échelle nationale entre les secteurs public et privé.

Il constitue une vitrine pour promouvoir l'offre technologique française dans l'espace européen et international.

Principales rubriques du site

Effet de serre
Capture et stockage géologique du CO₂
Recherche et développement
Club CO₂
Publications

Collection les enjeux des Géosciences

Déjà parus :
Pour une Terre durable, juin 2003 (versions française et anglaise)
La géothermie, novembre 2004



Direction de la communication,
de la formation
et du développement
2, square La Fayette - BP 90406
49004 Angers Cedex 1
Tél. : 02 41 20 41 20 - Fax : 02 41 20 41 98

www.ademe.fr



9 782868 177995

Réf ADEME	5504
-----------	------



Direction
de la communication
et des éditions
3, avenue Claude Guillemin - BP 6009
45060 Orléans Cedex 2
Tél. : 02 38 64 30 28 - Fax : 02 38 64 36 82

editions.brgm.fr



9 782715 909694

Réf BRGM	ENJ003
----------	--------



Diffusion des connaissances
1 & 4, avenue de Bois-Préau
92852 - Rueil-Malmaison Cedex

Tél. : 01 47 52 60 00
Fax : 01 47 52 70 00

www.ifp.fr



9 782901 638094

Prix : 9 €