



Séquestrer le CO₂ dans des réservoirs géologiques ?

Une des solutions pour lutter contre la libération dans l'atmosphère du dioxyde de carbone, de loin le premier gaz à effet de serre, consiste à le piéger dans des formations géologiques souterraines profondes.

A fin de lutter contre le réchauffement climatique, l'Union européenne s'est engagée à réduire de 8 % ses émissions de **gaz à effet de serre (GES)**. Chacun de ses membres s'est vu attribuer son propre *quota* de réduction de ses émissions en application de l'article 4 du **protocole de Kyoto**. Ainsi, l'objectif pour la France consiste à maintenir son niveau d'émission de GES, estimé à environ

B Effet de serre et CO₂

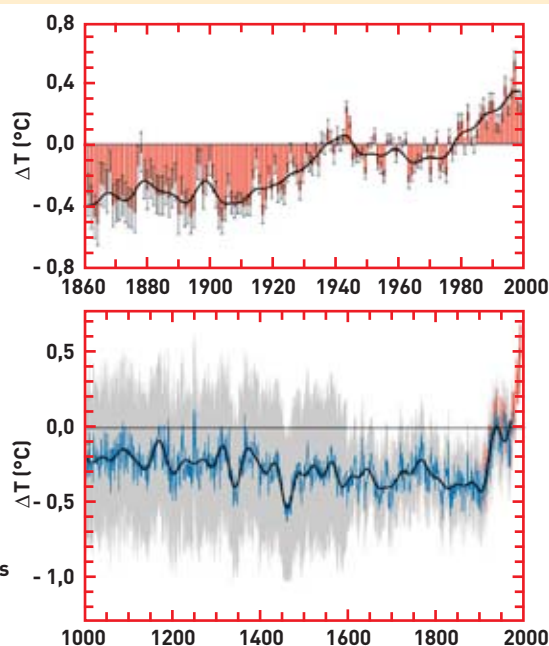
L'énergie solaire qui parvient au sol réchauffe la Terre et se transforme en **rayons infrarouges**. Comme les vitres d'une serre – d'où le nom donné à ce mécanisme – des gaz présents dans l'atmosphère piègent une partie de ces rayons qui tendent à la réchauffer. Ainsi, en termes de puissance, la Terre reçoit en moyenne un peu plus de 240 **watts/m²**. Sans **effet de serre**, la température moyenne sur la Terre serait de - 18 °C et peu d'eau serait sous forme liquide. Cet effet a donc une influence bénéfique puisqu'il permet à notre planète d'avoir une température moyenne de 15 °C. Cependant, depuis le début de l'ère industrielle, soit plus d'une centaine d'années, l'homme a rejeté dans l'atmosphère des gaz (**gaz carbonique, méthane, oxydes d'azote, etc.**) qui augmentent artificiellement l'effet de serre. Depuis 1750, cette augmentation, pour ce qui est des gaz "bien mélangés", a été de 2,43 W/m². Avec un "forçage radiatif supplémentaire" de 1,46 W/m², le **gaz carbonique (CO₂)** compte pour plus de la moitié de cet "effet de serre additionnel", loin devant le méthane (0,48 W/m²), les **halocarbures** (chlorofluorocarbures **CFC**, hydrochlorofluorocarbures **HCFC** et hydrofluorocarbures **HFC**) avec 0,34 W/m² et le dioxyde d'azote avec 0,15 W/m². En outre, l'**ozone** troposphérique présente un forçage radiatif positif de 0,35 W/m² (mais on estime que l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique constaté entre 1979 et 2000 a entraîné un forçage radiatif négatif de 0,15 W/m²). Cet ajout à l'effet de serre naturel (155 W/m²) est faible, correspondant à un accroissement de l'ordre de 1%. Néanmoins, il est presque certain qu'il

a contribué à l'augmentation de la température moyenne de notre planète d'environ 0,5 °C, observée au cours du vingtième siècle (**figure 1**). Si rien n'est fait pour réduire ces émissions, la concentration en gaz carbonique dans l'atmosphère (**figure 2**) pourrait doubler d'ici 2100. À partir de la consommation mondiale actuelle⁽¹⁾ de combustibles **fossiles (7700 Mtep)**, il est aisé de calculer la masse de CO₂ actuellement produite : 20 milliards de tonnes par an ! Cela pourrait conduire à une augmentation substantielle de l'effet de serre et mener, par des effets amplificateurs non linéaires, à de profondes altérations du climat. La plupart des modèles prévoient que le double de la concentration de gaz

carbonique actuelle conduirait, à la fin du vingt et unième siècle, à une élévation de la température de l'ordre de 2 à 3 °C. Certains donnent même une fourchette entre 1,5 et 4,5 °C, laissant prévoir des conséquences dramatiques sur l'environnement, comme la montée notable du niveau de la mer. Ces chiffres peuvent sembler petits et n'avoir que de faibles conséquences sur le climat ; il n'en est rien. Pour s'en convaincre, il faut se rappeler que lors du "petit âge glaciaire", entre 1450 et 1880, la température moyenne ne s'est abaissée en France que de 1 °C en moyenne. Il y a 6000 à 8000 ans, alors que l'Europe occidentale a connu une période plus chaude avec une température moyenne supérieure de 2 °C à 3 °C à celle d'aujourd'hui, le Sahara n'était

(1) CEE DG XVII (1996), scénario "Sagesse traditionnelle".

Figure 1. Écarts en température (ΔT) par rapport à la moyenne des années 1961-1990 pour les années 1860-2000 à l'échelle globale (en haut) et pour les mille dernières années dans l'hémisphère Nord (en bas).



494 millions de tonnes (Mt) pour 2002, à celui de 1990 (476 Mt) sur la période 2008-2012. Pour les actions concernant les secteurs de l'industrie et de l'énergie (34% de la totalité des émissions de GES en équivalent CO₂), celles-ci doivent non seulement porter sur les processus industriels mais également sur la possibilité de capturer et stocker ces gaz.

Les procédés chimiques existants permettent une capture de 80% du CO₂ émis⁽¹⁾. Il s'avère que si le CO₂ émis à partir des fumées des centrales thermiques, soit 3 à 3,5 Mt/an de CO₂ par unité, était capturé, le traitement de quelques-unes d'entre elles permettrait d'atteindre les objectifs fixés. Mais se pose alors le problème du stockage.

(1) "Une réponse à l'effet de serre", par Alain Feugier; *Lettre Énergies et matières premières*, n° 20.

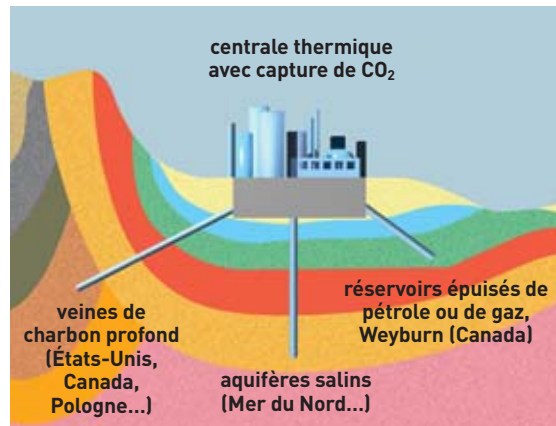


Figure 1. Concept du stockage souterrain de CO₂ en formations géologiques.

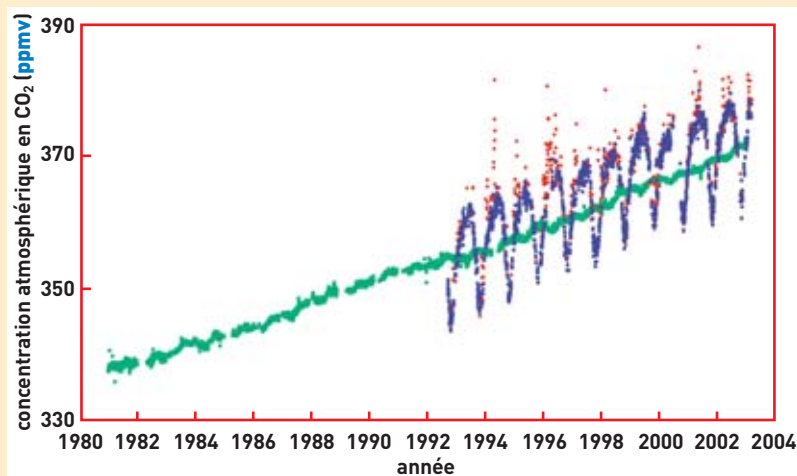


Figure 2. Évolution de la concentration atmosphérique en CO₂ depuis 1980 telle qu'elle est mesurée quotidiennement par les stations automatiques du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE), depuis 1981 sur l'île d'Amsterdam (Océan indien) et depuis 1992 à Mace Head sur la côte ouest de l'Irlande. Les mesures à l'île d'Amsterdam (en vert), loin de toute perturbation anthropique directe, mettent essentiellement en évidence l'augmentation continue de la concentration. Le site de Mace Head mesure essentiellement l'air océanique (régime normal de vents d'ouest; mesures en bleu). Quand le régime des vents s'inverse, il reçoit une atmosphère continentale, avec un fort excès de CO₂ (mesures en rouge) par rapport à l'atmosphère océanique. À l'augmentation moyenne de la concentration de CO₂, se superpose une forte modulation saisonnière due au cycle végétatif (photosynthèse chlorophyllienne) des plantes, émetteur de CO₂ en hiver et absorbé en été.

pas un désert mais le siège de pluies abondantes. C'est moins l'augmentation de la température qui est préoccupante que sa variation rapide (en un siècle). Les grandes variations déjà observées dans la nature se sont produites sur des échelles de temps beaucoup plus longues, au moins pour celles qui ont un caractère global. Ainsi, la dernière glaciation a duré 100 000 ans et la déglaciation correspondante 10 000 ans. La variation rapide que nous sommes en train de vivre peut induire des perturbations importantes et inattendues du climat et de l'écosystème, qui n'aura pas toujours le temps de s'adapter.

De Rio à Kyoto : les grandes conférences sur l'environnement

L'évolution de l'environnement global a suscité l'organisation d'importantes conférences, depuis la dernière décennie du vingtième siècle.

Au Sommet de la Terre de **Rio de Janeiro** (juin 1992) a été signée la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques qui adopta l'objectif d'une stabilisation des émissions de **gaz à effet de serre** (entrée en vigueur le 21 mars 1994).

À la conférence de Kyoto (décembre 1997) a été signé le protocole de réduction

globale des émissions de ces gaz, de 5,2% en moyenne en 2008-2012 par rapport à 1990, pour les pays de l'OCDE et les pays de l'Europe de l'Est (dont la Russie). Les objectifs de réduction pour l'Union européenne et la France sont de respectivement 8% et 0%. Les moyens de les atteindre ont été débattus sans succès en novembre 2000 à **La Haye**. Les conférences suivantes, tenues à **Marrakech** (2001), **Johannesbourg** (Sommet de la Terre en août-septembre 2002), **New-Delhi** (octobre 2002), **Moscou** (septembre-octobre 2003) et **Milan** (décembre 2003) n'ont pas permis la mise en application dès 2004 du **protocole de Kyoto**, enfin intervenue en 2005, grâce à sa récente ratification par la Russie.

Sous l'impulsion du programme des Nations unies pour l'environnement (**PNUE**), les problèmes posés par les substances appauvrissant la couche d'ozone atmosphérique ont été traités à **Vienne** (1985) et surtout à **Montréal** (septembre 1987) où a été signé le protocole imposant une réduction de la production et de l'utilisation des chlorofluorocarbures



La station de mesure de Mace Head, en Irlande.

(CFC). Ce protocole a fait l'objet des amendements de **Londres** (1990), qui a imposé l'abandon des CFC au 1^{er} janvier 2000 et étendu la réglementation à d'autres produits (dont les HCFC), de **Copenhague** (1992), **Montréal** (1997) et **Pékin** (1999).

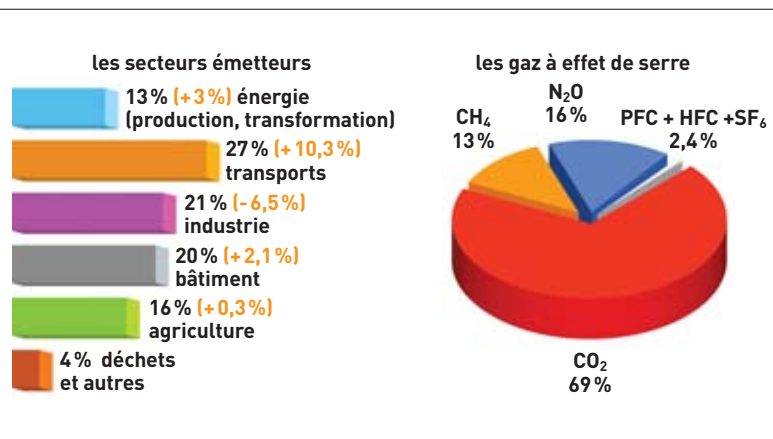


Figure 2. Part relative des activités dans les émissions de GES en France et croissance de celles-ci en l'absence de mesures nouvelles (données 2000 et 2001, source Citepa, Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique; CO₂ = dioxyde de carbone; CH₄ = méthane; N₂O = protoxyde d'azote; HFC = hydrofluorocarbures; PFC = perfluorocarbure; SF₆ = hexafluorure de soufre).

Les options retenues par la communauté scientifique concernent essentiellement la **séquestration** du CO₂ dans les formations géologiques profondes. De nombreuses actions sont menées de par le monde. Peuvent être citées les expériences industrielles du groupe pétrolier norvégien Statoil dans le sous-sol de la mer du Nord⁽²⁾, de EnCana à Weyburn au Canada⁽³⁾ et des pilotes scientifiques comme Recopol, en Pologne⁽⁴⁾. En France, les incertitudes sont encore très grandes sur la capacité réelle des réservoirs aquifères ou des couches de charbon à séquestrer ce gaz en quantités

(2) Injection de 1 Mt/an de CO₂ dans un réservoir d'eau saumâtre, depuis 1996.

(3) CO₂ récupéré à partir de la gazéification du charbon aux États-Unis et injecté dans un gisement pétrolier au Canada pour améliorer la récupération de l'huile, après un transport par pipeline sur 330 km.

(4) Recopol (pour *Reduction of CO₂ emission by means of CO₂ storage in coal seams in the Silesian Coal Basin of Poland*) consiste en l'étude de la capacité de séquestration définitive du CO₂ dans des veines de charbon, de la faisabilité technique et financière et de la sûreté de la séquestration.

industrielles (de l'ordre du million de tonnes de CO₂/an). Une première approche du problème a été engagée dans le cadre d'un projet de recherche européen Gestco (*European potential for GEological Storage of CO₂ from fossil fuel combustion*). Ce projet vise à évaluer la faisabilité du stockage géologique de CO₂ à grande échelle, grâce à l'étude de scénarios intégrant toute la chaîne source-transport-stockage pour quelques secteurs géographiques représentatifs en Europe. Dans le Bassin parisien, les formations profondes du Trias et du Dogger pourraient permettre de stocker quelques milliards de tonnes de CO₂.

Plusieurs solutions possibles

Le constat actuel est que les solutions techniques concernant la capture sont à améliorer car encore trop chères, mais que le transport ne pose pas de problèmes particuliers que l'on ne sache résoudre.

La **séquestration** proprement dite offre plusieurs solutions. Les anciens gisements pétroliers (huile et gaz), les aquifères profonds, dont l'eau salée ne peut être exploitée, et les couches de charbon, constitueraient d'excellents sites de stockage pour peu que soient démontrées l'intégrité de l'entreposage et la maîtrise de la migration du gaz injecté.

De nombreux projets de recherche sont en cours dans le monde pour développer la technologie. 2004 a vu le démarrage du projet européen Castor, coordonné par l'**Institut français du pétrole (IFP)**, axé sur la capture post-combustion et l'étude de quatre sites potentiels de stockage en Europe.

Le **Groupe Intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)** prépare actuellement un rapport spécial sur cette technologie émergente, premier pas vers une reconnaissance de celle-ci comme moyen éligible de réduction des émissions mondiales.

► **Didier Bonijoly, Nathalie Audibert, Isabelle Czernichowski-Lauriol et Christian Fouillac**
BRGM
Orléans



Plate-forme de Sleipner, en mer du Nord, exploitée par le groupe norvégien Statoil. Une expérience d'injection de CO₂ a été réalisée dans le sous-sol de ce champ pétrolier.

Oyvind Hagen/Statoil