

# « Comment réduire le CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère : le stockage géologique ? »

31 mai 2005

avec **François GUYOT**, professeur à l'Université Denis Diderot (Paris VII), directeur du département de minéralogie

et **Christian FOUILLAC**, directeur de la recherche du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)

## Intervention de Monsieur François GUYOT

Un objectif de cette brève introduction est de discuter les ordres de grandeur de la perturbation anthropique sur le cycle du carbone et de montrer comment le stockage géologique du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) pourrait intervenir pour atténuer cette perturbation. L'émission anthropique de dioxyde de carbone, environ 25 Gigatonnes par an (Gt/an), résultant principalement de la combustion des sources d'énergie fossiles, charbon et pétrole, est responsable de plus de la moitié de l'effet de serre additionnel dû aux activités humaines. La teneur atmosphérique en CO<sub>2</sub> augmente régulièrement depuis une valeur pré-industrielle, d'environ 280 parties par millions (ppm) en 1750 ; elle a dépassé 370 ppm en 2000 et les projections pour 2100 s'échelonnent entre 500 et 1000 ppm. Notons que la valeur basse tient compte d'un arrêt pratiquement complet de l'utilisation des combustibles fossiles à l'horizon 2050.

**Dans tous les cas, un réchauffement global s'ensuit dont les conséquences environnementales et socio-économiques sont très difficiles à évaluer. Une option est donc de s'intéresser aux méthodes de réduction de la quantité de CO<sub>2</sub> atmosphérique.**

Il est important, au préalable, d'évaluer la capacité intrinsèque de régulation du système Terre. La dissolution dans l'océan absorbe une part importante de l'émission mais, aux courtes échelles de temps, la réponse à une émission exceptionnelle de CO<sub>2</sub> se traduit par une augmentation à la fois dans l'océan et dans l'atmosphère, en vertu des équilibres de solubilité. En ce sens, l'océan n'agit donc pas vraiment comme un régulateur.

La biomasse échange dynamiquement du CO<sub>2</sub> avec l'atmosphère, plus de 400 Gt/an, mais le bilan net de fixation est de l'ordre de 0,3 Gt/an. Ce flux, dû à la matière organique sédimentée échappant aux processus d'oxydation, est à l'origine de la constitution lente des réserves de charbons, pétroles et autres matières organiques énergétiques. D'autre part, l'altération des roches par l'eau acidifiée par le CO<sub>2</sub> atmosphérique fixe ce gaz sous la forme minérale de roches calcaires à une vitesse de l'ordre de 0,7 Gt/an. Ce dernier processus est particulièrement intéressant car il constitue une boucle potentielle de régulation du climat : la vitesse des réactions d'altération est susceptible d'augmenter avec une élévation de température, induisant ainsi une baisse de CO<sub>2</sub> conduisant à une baisse de température. Ce processus fait actuellement l'objet de recherches actives. La capacité intrinsèque de régulation du système Terre est donc de l'ordre de la gigatonne de CO<sub>2</sub> par an, au moins un ordre de grandeur sous l'émission anthropique corrigée de l'absorption par l'océan, d'où l'augmentation actuelle du CO<sub>2</sub> atmosphérique.

**Par son émission de CO<sub>2</sub> vers l'atmosphère, l'humanité joue le rôle d'un agent géologique puissant, émettant plus de cinquante fois la quantité des sources naturelles liées au volcanisme et au métamorphisme.**

À ce titre, l'étude des grandes crises qui ont émaillé le passé de la Terre est intéressante. Par exemple, la mise en place des traps du Decan à la fin du crétacé correspond à une émission de CO<sub>2</sub> de l'ordre de 50000 Gt, mais qui, étalée sur des dizaines ou des centaines de milliers d'années, ne représente probablement pas des flux plus importants que l'émission actuelle, laquelle apparaît donc comme une crise géologique majeure. Des modèles proposés par des chercheurs travaillant sur les conséquences de ce volcanisme massif suggèrent que **le temps de retour à l'équilibre climatique après la mise en place se compte en dizaines voire en centaines de milliers d'années.** Les effets, encore mal connus, de grands impacts météoritiques sur des roches majoritairement carbonatées, pourraient être comparables.

Munis de ces éléments, il est important de réfléchir aux moyens de réduction du CO<sub>2</sub> atmosphérique au cours du siècle à venir. **L'abandon des combustibles fossiles prendra en effet au moins quelques dizaines d'années et, si l'on souhaite réduire le réchauffement global, le stockage des surplus de CO<sub>2</sub> est de fait une urgence.** La conférence de Christian Fouillac discute les principaux enjeux et les solutions techniquement et économiquement viables actuellement envisagées. Je présente brièvement une option sur laquelle nous travaillons. Il s'agit du **couplage entre le stockage profond et la séquestration sous forme minérale de minéraux carbonatés.** Il n'est pas évident que cette voie sera un jour économiquement envisageable, mais elle présente l'avantage d'assurer a priori une sécurité maximale, le CO<sub>2</sub> étant stocké sous forme solide, donc très peu mobile. Un problème de cette approche est le flux relativement faible de production de phases solides à partir du CO<sub>2</sub> dans la plupart des environnements géologiques. Une possibilité pour accélérer le processus est d'effectuer le stockage dans des matériaux réactifs, par exemple des roches ultrabasiques ou basiques, ce qui pourrait intéresser des pays comme l'Inde ou les États-Unis qui disposent de bons sites potentiels.

Un rôle éventuel des micro-organismes présents dans la croûte terrestre sur les réactions de formation de carbonates fait l'objet de recherches intenses mais forcément très préliminaires car l'étude de cette biosphère profonde est difficile, les outils pour la visualiser et la comprendre restant largement à inventer. On montre ici que les bactéries sulfato-réductrices et les spores bactériennes, potentiellement importantes dans la biosphère profonde, pourraient être des agents efficaces de carbonatation en contexte de stockage.

---

### **Intervention de Monsieur Christian FOUILLAC**

Afin de limiter l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, nos sociétés envisagent de mettre en œuvre une solution technologique pouvant contribuer à régler une partie du problème. Sur les sources d'émission ponctuelles (production d'électricité, industries chimique, sidérurgique, cimentière...), on peut mettre en œuvre une stratégie comportant la capture du CO<sub>2</sub> et le transport vers des environnements géologiques souterrains appropriés où ils pourraient rester confinés pendant de très longues périodes.

Tous les composants de cette filière fonctionnent d'ores et déjà mais posent un certain nombre de problèmes technologiques et/ou économiques, sans parler de l'acceptation de ce nouveau comportement par le public.

**Du point de vue des coûts, la capture représente 70 à 90% des coûts totaux, ils dépendent de la technologie utilisée, mais surtout du procédé de combustion responsable des émissions de CO<sub>2</sub>. Il est en effet beaucoup plus coûteux de séparer le CO<sub>2</sub> à partir d'un mélange où il ne représente que 20% du total.**

Avec les technologies actuelles, les coûts de capture varient de 15 à 35 euros/tonne de CO<sub>2</sub> capturé.

Les coûts de transport par gazoduc ou navires spécialisés, dont la technologie est parfaitement maîtrisée représentent 5 à 25% du total, allant de 1 à 3 euros/tonne de CO<sub>2</sub> pour 100 Km parcourus.

Les coûts de stockage évalués sur des configurations réelles peuvent représenter jusqu'à 15% du total sans jamais excéder 2 euros/tonne de CO<sub>2</sub> injecté.

**On a ainsi un ordre de grandeur total de 40 à 60 euros/tonne environ.** Cette valeur peut être réduite si le stockage de CO<sub>2</sub> s'accompagne de récupération assistée de pétrole.

A l'avenir, il conviendrait donc de réduire considérablement (d'un facteur 2 à 3) le coût de la capture et de démontrer que les potentiels de stockage géologiques peuvent faire face à l'ampleur des émissions futures, tout en garantissant une sécurité complète.

**Une attention particulière est portée dans de nombreux instituts de recherche géologiques sur les différentes possibilités de stockage dans le sous-sol.**

On peut injecter le gaz dans des gisements d'hydrocarbures en voie d'épuisement dans les aquifères sédimentaires profonds, ou sur des veines de charbon profond inexploitable.

Des possibilités existent également dans les aquifères de socle basaltique, mais ce concept est actuellement dans un état exploratoire.

Selon des estimations nombreuses et constamment affinées, **les réservoirs d'hydrocarbures pourraient stocker jusqu'à 45% des émissions localisées prévues jusqu'en 2050, les charbons inaccessibles environ 2 % et les aquifères profonds de 20 à 500 %.**

On voit tout de suite qu'un premier effort s'impose pour réduire l'incertitude sur la capacité de stockage dans les aquifères profonds qui ont à ce jour été peu étudiés.

Le CO<sub>2</sub> prend place dans la formation dans un état supercritique ; graduellement une proportion variable de CO<sub>2</sub> va se dissoudre dans l'eau sous forme d'ions bicarbonate et carbonate. Ces derniers pourront alors réagir avec les cations alcalino-terreux des roches du réservoir pour former des carbonates solides.

Au cours du temps, ces deux dernières formes du CO<sub>2</sub> verront leur proportion augmenter, de sorte que la tendance qu'aurait le CO<sub>2</sub> à migrer hors de la formation hôte va s'atténuer.

On pourra donc modéliser le comportement du CO<sub>2</sub> dans le réservoir sur des très longues durées et bâtir des scénarii d'évolution, indispensables à la quantification et à la prévention des risques de fuite.

**On admet actuellement qu'une durée de stockage de 500 à 1000 ans pourrait s'avérer suffisante pour construire un pont vers l'utilisation généralisée des énergies renouvelables ou nucléaires.**

Pendant cette période, un taux de fuite inférieur à 0,01% des quantités stockées ne poserait vraisemblablement aucun problème de sécurité et n'aurait pas d'impact environnemental.

**Actuellement, les projets en cours s'attachent à certifier les capacités de stockage, à démontrer leur sécurité et à mettre en œuvre des méthodes de monitoring et de surveillance pour aboutir à des solutions efficaces de management du risque.** Ces travaux se construisent autour de projets de démonstration qui abritent des activités de recherche conséquentes.

Le premier d'entre eux à **Sleipner**, au large de la **Norvège**, injecte depuis 1996 1 million de tonnes/an de CO<sub>2</sub> issu d'un gisement de gaz naturel offshore. L'injection se réalise dans un aquifère situé à 800 m sous le plancher de la mer du Nord, quelques centaines de mètres au-dessus du gisement lui-même. De nombreux progrès sur la modélisation et les méthodes de surveillance ont été réalisés depuis 1996 par plusieurs instituts de recherche européens.

Depuis septembre 2000, un autre projet de démonstration se déroule entre le Canada et les Etats-Unis. Le CO<sub>2</sub> produit dans une usine de gazéification de charbon du Nord Dakota est transporté par gazoduc jusqu'au champ pétrolier de **Weyburn au Canada** sur une distance de 330 Km. Il est alors injecté à raison de 1,8 million de tonnes/an dans le champ pétrolier produisant une récupération assistée de pétrole qui prolongera la durée de vie du gisement d'une quinzaine d'années.

Là encore, l'accompagnement de ce projet industriel par de nombreuses équipes de recherche américaines, canadiennes et européennes, et la participation de plusieurs groupes pétroliers ont permis d'affiner les outils de modélisation de monitoring et surveillance, ainsi que l'analyse des risques.

A partir de ces deux projets pionniers, plusieurs autres projets de démonstration démarreront au cours de l'année 2005 ou en 2006. Outre l'Europe et les Etats-Unis, on trouvera des projets en Australie et en Algérie. Il faut également mentionner qu'une quarantaine de projets industriels d'injection de CO<sub>2</sub> et d'H<sub>2</sub>S fonctionne d'ores et déjà au Canada. On commence ainsi à voir se dessiner ce que pourrait être une nouvelle grande filière industrielle. Elle revêt une importance particulière si l'on songe que les technologies les plus performantes pour la production d'hydrogène sont le vapo-reformage du gaz naturel et la gazéification de charbon. Si l'on est capable de mettre en œuvre la capture et le stockage du CO<sub>2</sub> coproduit lors de ces synthèses de l'hydrogène, on aura alors une capacité de production d'hydrogène massive, sans émission de CO<sub>2</sub>.

**Une autre clé du développement de la filière globale réside dans l'instauration de bourses de permis d'émissions de CO<sub>2</sub>.** La récente ouverture de la bourse de Paris en juin 2005 fait suite à celle de Chicago en 2003, Londres, Bruxelles et Tokyo en 2004. On s'achemine vers une harmonisation des prix mondiaux à l'horizon 2008. Il est également symptomatique de noter que, dans une dépêche AFP du 20 mai 2005, la filiale allemande du producteur d'électricité Vattenfall annonce l'ouverture pour 2008 d'une centrale électrique pilote de 30 MWe couplée à la capture et au stockage géologique de CO<sub>2</sub>.

Les pays pionniers sur ces technologies, Etats-Unis, Europe, Canada, Australie et Japon, attirent l'intérêt de grands pays émergents : Chine, Russie, Inde, Colombie, Mexique et Afrique du Sud. Des groupements destinés à promouvoir le transfert de technologies et la diffusion de ces filières se sont d'ores et déjà constitués.

Ainsi, pour un concept imaginé au début des années 90, on pourrait assister à un déploiement industriel entre 2000 et 2015 pour peu que les réductions de coûts de capture et la certification du stockage géologique interviennent rapidement.