



Conférence-débat

LA SÉQUESTRATION DU CO₂

Mardi 19 mai 2009 de 14h00 à 18h00

Organisateurs Claude ALLÈGRE et Vincent COURTILOT

Membres de l'Académie des sciences

Académie
des sciences

Grande salle
des séances

Palais de
l'Institut de
France

23, quai de
Conti
75006 Paris

- 14 h 00 Introduction générale**
Claude ALLÈGRE, Membre de l'Académie des sciences
- 14 h 10 La capture du CO₂ : problème et solutions**
Eric FAVRE, Laboratoire des Sciences du Génie Chimique (LSGC), Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques (ENSIC), Nancy-Université
- 14 h 35 Les expériences de stockage en cours : bilan**
Alain BONNEVILLE, Laboratoire de Géosciences Marines, Institut de Physique du Globe de Paris
- 15 h 00 L'observation et la surveillance des réservoirs**
Laurent JAMMES, Schlumberger Carbon Services
- 15 h 25 La sécurité des stockages**
Christian FOUILLAC, Directeur de la Recherche, Bureau des Recherches Géologiques et Minières (BRGM)
- 15 h 50 Le Programme de Lacq**
Nicolas AIMARD, Société Total E&P - Recherche et Développement, Pau
- 16 h 15 Genèse des carbonates et stockage géologique de CO₂**
François GUYOT (Université Paris-Diderot), Institut de Minéralogie et de Physique des Milieux Condensés (IMPMC) et Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP)
- 16 h 40 Séquestration du CO₂ dans les roches volcaniques et ultrabasiques**
Alain PRINZHOFER, Institut Français du Pétrole, Institut de Physique du Globe de Paris
- 17 h 05 Captage, transport géologique du CO₂ : perspectives scientifiques et économiques**
Pierre LE THIEZ, Société GEOGREEN, Rueil-Malmaison
- 17 h 30 Table ronde**
Adolphe NICOLAS, Laboratoire de Tectonophysique, Université de Montpellier II
Isabelle CZERNICHOWSKI, Bureau des Recherches Géologiques et Minières (BRGM)
Andréas EHINGER, Institut Français du Pétrole

Conférence débat

La séquestration du CO₂

Mardi 19 mai 2009

La capture du CO₂ : problème et solutions

Eric FAVRE, *Laboratoire des Sciences du Génie Chimique ENSIC,
Nancy-Université*

L'application de la technologie de capture, transport et stockage géologique (CTS) du dioxyde de carbone à partir de points d'émissions à fort tonnage (centrales thermiques, sites industriels..) pourrait constituer, au niveau mondial, un levier important en vue de limiter les émissions de gaz à effet de serre [1]. Dans ce contexte, la mise au point d'un procédé de capture efficace, économique et respectant les contraintes en termes de pureté et de taux de récupération du CO₂ constitue un enjeu majeur, dans la mesure où l'étape de capture concentre 60 à 80% du coût global de la chaîne technologique globale CTS. Quelques démonstrateurs, mettant en jeu les technologies de capture dites de première génération (absorption gaz liquide en post-combustion dans un solvant chimique de type amine, ou oxycombustion par exemple) sont en déjà en opération et de nombreux projets sont à l'étude ou ont été officialisés à travers le monde.

Par ailleurs, un très grand nombre de concepts sont étudiés en parallèle à l'échelle laboratoire ou pilote sur la base d'innovations dans le domaine de la chimie (solvants, liquides ioniques), des matériaux (adsorbants solides, membranes) ou des procédés (cycles thermochimiques, hydrates...), afin de concevoir les dispositifs de deuxième génération, présentant des performances améliorées. Une dépense énergétique ne dépassant pas 2 GJ par tonne de CO₂ récupéré constitue un des objectifs clés de ces travaux [2] ; en effet, ce paramètre conditionne, pour les centrales thermiques, la pénalité énergétique et l'augmentation du coût de l'électricité. Plus généralement, la consommation d'énergie associée à la capture influe fortement sur le coût de la tonne de CO₂ récupérée (avec un objectif affiché pour l'Union Européenne de 20 € par tonne [2] au lieu des 40 à 60 avec les technologies actuelles).

L'exposé cherchera à donner un état de l'art sur les différentes options envisagées en termes de procédés de capture du CO₂ et sur les enjeux scientifiques et verrous technologiques qui leur sont associés.

[1] Davidson, O., Metz, B. (2005) Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, *International Panel on Climate Change*, Geneva, Switzerland, (www.ipcc.ch). [2] Deschamps P., Pilavachi, P.A. (2004) Research and development actions to reduce CO₂ emissions within the European Union. *Oil & Gas Science and Technology* 59 (3) : 323-330

Conférence débat

La séquestration du CO₂

Mardi 19 mai 2009

L'observation et la surveillance des réservoirs

Laurent JAMMES - *Schlumberger Carbon Services*

La performance et la sécurité d'un site de stockage de CO₂ se doivent d'être régulièrement évaluées, afin d'optimiser la rentabilité des investissements et de contrôler les risques potentiels par des actions préventives ou correctives. Ces activités de diagnostic reposent essentiellement sur des mesures de monitoring et des outils de simulation, qui permettent d'observer et de prédire l'évolution du site de stockage. Elles ont deux origines : la nécessaire conformité à la réglementation locale et les procédures internes de l'opérateur.

Plus précisément, l'opérateur d'un site doit vérifier que celui-ci a la capacité suffisante (volume disponible pour stocker le CO₂), l'injectivité requise (possibilité d'injecter le CO₂ au débit fourni par la source) et les caractéristiques de confinement adéquates. L'opérateur doit aussi mettre en place un système de surveillance et de contrôle visant à s'assurer de la sécurité du site et des opérations. Ces nécessités peuvent se traduire en objectifs spécifiques pour le système de monitoring.

Le premier objectif d'un système de monitoring est d'optimiser et de contrôler l'opération d'injection : les conditions de pression et de température du gaz injecté, ainsi que sa composition. Les mesures de pression sont effectuées en temps réel, analysées conjointement avec d'autres mesures de vérification de l'intégrité des barrières du réservoir (micro-sismicité et mesures d'interférence). Le flux massique du CO₂ injecté doit aussi être mesuré précisément, afin de pouvoir justifier de Certificats de Réduction d'Emission (crédits carbone).

Le deuxième objectif vise à vérifier que le nuage de CO₂ reste confinée en dessous de la couverture, ainsi que son extension, et à estimer l'efficacité relative et la cinétique des mécanismes de piégeage (structural ou hydrodynamique, par dissolution ou minéralisation, par immobilisation en phase résiduelle). Il inclut aussi le contrôle systématique de l'intégrité des barrières (couverture, failles et puits).

Enfin, le troisième objectif est centré sur la détection de fuites potentielles ainsi que sur l'évaluation de leur impact sur la santé des populations ou l'environnement. Par ailleurs, si une fuite est détectée, l'opérateur aura l'obligation d'intervenir pour la stopper, mais aussi de

quantifier le CO₂ qui aura été émis dans l'atmosphère afin de rendre aux autorités compétentes un montant équivalent en crédits carbone.

Atteindre ces différents objectifs impose à l'opérateur d'un site de stockage le design et le déploiement d'un système de monitoring complexe, utilisant la complémentarité de mesures basées sur des principes physiques différents. L'interprétation de ces mesures hétérogènes – analysées grâce aux modèles prédictifs - devra permettre une caractérisation précise du comportement du site, sur le court et le long terme, pour s'assurer que les objectifs de stockage sont remplis dans les meilleures conditions de sécurité.

Conférence débat

La séquestration du CO₂

Mardi 19 mai 2009

Genèse des Carbonates et stockage géologique de CO₂

François GUYOT (*Université Paris-Diderot*)

Institut de Minéralogie et de Physique des Milieux Condensés (IMPMC)

et Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP)

Au cours de cet exposé, on rappelle par quels mécanismes le CO₂ atmosphérique terrestre est naturellement principalement stocké sous forme de carbonates solides : l'altération des silicates conduit à la formation d'ions qui précipitent lorsque la saturation par rapport au solide est atteinte. Les carbonates solides ainsi formés sont alors intégrés dans un cycle géologique long et restent stables pendant plusieurs dizaines de millions d'années, ce qui rendrait ce mécanisme attractif pour une séquestration pérenne de CO₂ excédentaire. On montre toutefois que, aux échelles de temps pertinentes pour limiter la hausse anthropique du CO₂ atmosphérique, ce processus jouera un rôle négligeable, à moins que la cinétique de réaction de production des carbonates solides soit accélérée d'au moins un ordre de grandeur par rapport aux moyennes généralement observées dans les systèmes géologiques. Quelques exemples naturels de cinétiques potentiellement augmentées sont introduits avant leur discussion dans l'exposé suivant par Alain Prinzhofer. Les facteurs des cinétiques de dissolution des silicates et de précipitation des carbonates, étudiés en laboratoire en particulier par plusieurs groupes en France (Grenoble, Montpellier, Nancy, Paris, Toulouse, liste non exhaustive) sont présentés et la dissolution des silicates est généralement identifiée comme la principale étape limitante. On montre que cette limitation est probablement liée au développement de couches de silice SiO₂ plus ou moins passivantes à la surface des silicates, la question de la prédiction du degré de passivation dans une condition donnée, liée aux impuretés dans la couche qui en modifient la microstructure, restant largement ouverte. On présente enfin le potentiel de genèse des carbonates par les microorganismes de la biosphère souterraine dans le cadre d'injections de CO₂ dans des aquifères salins profonds. Ce dernier aspect, extrêmement complexe car couplé au cycle de la biomasse, présente des aspects potentiellement positifs (stockage de carbone sur le long terme) et négatifs (diminutions d'injectivité, génération de gaz acide et/ou à effet de serre) qui nécessiteraient une meilleure connaissance de la biosphère souterraine pour être correctement modélisés.

Conférence débat

La séquestration du CO₂

Mardi 19 mai 2009

Séquestration du CO₂ dans les roches volcaniques et ultrabasiques

Alain PRINZHOFER, *Institut Français du Pétrole,*
Institut de Physique du Globe de Paris

La séquestration du CO₂ dans les milieux géologiques est envisagée soit en phase gazeuse, soit en solution dans l'eau des aquifères profonds, soit sous forme de carbonates suite à une minéralisation. Si les bassins sédimentaires sont des candidats pour piéger le CO₂ sous forme fluide dans des structures géologiques relativement fermées (pièges pétroliers, aquifères profonds) grâce à de bonnes roches couvertures (argiles, évaporites), il est très difficile d'y transformer le CO₂ en carbonates, son injection induisant plutôt des dissolutions de minéraux préexistants que des précipitations. Les roches basiques et ultrabasiques (roches volcaniques, ophiolites, ...) présentent moins de pièges structuraux fiables, mais permettent d'envisager une réactivité chimique très différente entre le CO₂ et les minéraux environnants. En effet, ces roches ont des concentrations négligeables en carbone, et libèrent après altération d'assez grandes concentrations en cations Ca²⁺, Mg²⁺ et Fe²⁺, qui autorisent la formation de carbonates après piégeage de carbone environnant. Ceci induit un fort potentiel de minéralisation du CO₂ injecté. D'autre part, et particulièrement dans les roches ultrabasiques, le fer présent dans ces roches sous forme ferreuse change d'état d'oxydation au cours de leur altération (serpentinisation). La transformation du fer ferreux en fer ferrique s'accompagne d'une réduction de l'eau en hydrogène, ainsi que d'une évolution de l'eau vers des propriétés basiques et réductrices. Ce système serpentines/hydrogène/eau, mis en contact avec du CO₂, peut soit former des carbonates instantanément à basse température, soit réduire le CO₂ sous forme de méthane abiotique à plus haute température. La première réaction permet une carbonatation instantanée et une séquestration du CO₂ sous forme solide, la deuxième permet une transformation chimique du CO₂, résidu de consommation énergétique, en nouvelle source d'énergie. Cependant, suivant l'une ou l'autre de ces réactions, des contraintes doivent être prises en compte pour rendre le procédé fiable et efficace : le contrôle de la perte d'injectivité dans le cas d'une carbonatation instantanée, le risque de fuites du méthane produit naturellement dans les roches ultrabasiques (gaz explosif et produisant un effet de serre bien supérieur au CO₂ source). La connaissance précise des conditions de réactivité du CO₂ dans ces milieux est indispensable pour envisager son devenir suite à son injection.

Conférence débat

La séquestration du CO₂

Mardi 19 mai 2009

Captage, transport et stockage géologique du CO₂ : Perspectives scientifiques et économiques

Pierre LE THIEZ, *Directeur général adjoint, GEOGREEN*

Les technologies de captage, transport et stockage du CO₂ (CTS) sont devenues un élément clé notamment dans la stratégie Européenne de réduction des émissions de CO₂. Cette filière particulièrement adaptée aux émissions stationnaires de grande taille pourrait en complément des autres contributions (économies d'énergie, énergies renouvelables) réaliser une réduction de l'ordre de 15% de l'ensemble des émissions de CO₂ requises par l'Europe en 2030.

Dans cette présentation on rappelle les point-clés techniques et économiques relatifs au déploiement commercial de cette filière attendu à partir de 2020, succédant à une phase pilote en train de se structurer progressivement aujourd'hui.

Sur le stockage géologique on insistera sur les paramètres dimensionnants du réservoir tels que l'injectivité et les surpressions associées aux quantités de CO₂ qu'il est nécessaire d'injecter. On montrera par ailleurs que le stockage géologique ne constitue pas l'élément le plus coûteux dans la chaîne CTS, mais qu'en raison des temps de développement et d'incertitudes techniques et économiques, il se situe sur le chemin critique en termes d'investissement et de timing et concentrera également l'essentiel des contraintes en matière d'environnement et d'acceptabilité sociétale.