



Conférence de presse
2 octobre 2007

Le captage et le stockage du CO₂ en questions

Contacts Presse

IFP	Anne-Laure de Marignan	a-laure.de-marignan@ifp.fr - 01 47 52 62 07
ADEME	Nadège Chapelin (H&B communication)	n.chapelin@hbcommunication.fr - 01 58 18 32 45
BRGM	Danièle Roblin	d.robilin@brgm.fr - 02 38 64 39 76

Sommaire

1. Quelles sont les principales sources d'émissions de CO₂ ?
2. La filière captage/stockage géologique du CO₂ peut-elle répondre de façon globale au problème des émissions de CO₂ ?
3. Quels sont les moyens envisagés pour piéger le CO₂ ?
4. A quelles sources d'émissions s'appliquent le captage et le stockage géologique ?
5. Quel est le volume de CO₂ qui pourrait être stocké ?
6. Sous quelle forme va-t-on pouvoir transporter, injecter et stocker le CO₂ ?
7. Comment envisage-t-on de capter le CO₂ ?
8. Comment envisage-t-on de réduire les coûts du captage ?
9. Y a-t-il des verrous technologiques ? Quels sont les pays et les organismes en pointe dans le domaine du captage ?
10. A quelle profondeur envisage-t-on de stocker le CO₂ dans le sous-sol ?
11. Quelle durée de stockage envisage-t-on pour réduire les émissions de CO₂ ? 100, 1000, 10000 ans ? Et pourquoi ?
12. A quelle échéance pourrait-on envisager une mise en œuvre industrielle du captage et du stockage du CO₂ ?
13. Quels sont les pays en pointe dans le domaine du stockage ? Y a-t-il des verrous technologiques ?
14. Va-t-on pouvoir injecter le gaz là où il est produit en grande quantité ?
15. Comment va-t-on transporter le CO₂ sur de longues distances ?
16. Existe-t-il déjà un pilote de captage sur une installation industrielle en France ou en Europe ?
17. Envisage-t-on de faire un site pilote de stockage en France ? Où et à quelle échéance ?
18. La convention de Londres sur l'interdiction d'immersion des déchets est-elle un frein au stockage géologique sous les fonds marins ?
19. Quel est le coût de la filière ? Cette filière peut-elle être économiquement rentable ?
20. Où en est-on du marché européen d'échange de quotas d'émissions de CO₂ ? Quel est le prix de la tonne de CO₂ ?
21. Quelle pourrait être la portée de la filière captage/stockage dans le cadre du mécanisme de développement propre du Protocole de Kyoto ?
22. Quel pourrait être l'apport du captage et du stockage à la filière hydrogène ?
23. Quelle est la réglementation pour le stockage géologique à terre ?
24. Y a-t-il des risques de fuites ? Quelles seraient les conséquences pour les populations locales ?
25. Comment garantir la sécurité de la filière ?
26. Les budgets de R&D affectés au captage et au stockage de CO₂ ne pénalisent-ils pas les efforts à porter sur les autres moyens de réduction des gaz à effet de serre ?
27. Quel est l'engagement de l'Europe dans ce domaine ?
28. Le captage/stockage va-t-il permettre de rendre plus propre l'utilisation du charbon ?

1. Quelles sont les principales sources d'émissions de CO₂ ?

La très grande majorité des émissions de CO₂ vient de l'utilisation des combustibles fossiles : pétrole, charbon et gaz. Leur combustion, dans les installations industrielles et dans les véhicules notamment, dégage du CO₂.

Dans le monde, les émissions de gaz à effet de serre sont de l'ordre de 30 milliards de tonnes équivalent CO₂. Environ 80 % de ces émissions proviennent de l'utilisation de combustibles fossiles et 20 % de la déforestation et des pratiques agricoles.

En 2005, les émissions de CO₂ en France s'élèvent à 523 Mt. De 1960 à 2005, les émissions ont cru de 35 % et de 1990 à 2005, seulement de 1 %. Le secteur des transports n'a cessé d'augmenter ses émissions, tandis que celui de l'énergie a fortement réduit sa part. Par rapport à 1990, les émissions ont augmenté de 6 Mt, soit une hausse de 1%.

Pour 2005, la répartition des émissions de CO₂ est la suivante : les transports, 26 %, le résidentiel tertiaire 23 %, l'industrie, 21 %, la transformation d'énergie 13%, l'agriculture et la sylviculture 15 % (source CITEPA/inventaire SECTEN).

2. La filière captage/stockage géologique du CO₂ peut-elle répondre de façon globale au problème des émissions de CO₂ ?

Non, plusieurs solutions complémentaires devraient être mises en oeuvre pour parvenir à une réduction sensible des émissions de CO₂ : des économies d'énergie notamment dans les transports et le bâtiment, l'essor d'énergies plus pauvres en carbone, en particulier les énergies renouvelables, et le développement de la filière captage/stockage du CO₂.

Les espoirs se tournent aujourd'hui vers la filière captage/stockage géologique du CO₂ en raison des grandes possibilités de stockage dans le sous-sol, notamment dans les bassins sédimentaires. Cependant cette filière ne concerne que les émissions industrielles concentrées. Elle peut s'avérer profitable aux secteurs industriels qui peinent à réduire leurs émissions de CO₂ à l'image des cimenteries, des aciéries, des raffineries et des usines pétrochimiques.

3. Quels sont les moyens envisagés pour piéger le CO₂ ?

Le **stockage géologique**, essentiellement, c'est à dire dans des formations géologiques sous la terre ou sous la mer. Il y a trois options principales :

1. le stockage dans des gisements de pétrole et de gaz naturel épuisés ou en voie d'épuisement combiné à la récupération assistée de pétrole ou de gaz,
2. le stockage dans des gisements de charbons inexploités combiné à la production de méthane,
3. le stockage en aquifères profonds ¹qui offrent un potentiel immense puisque ces aquifères se trouvent dans les bassins sédimentaires présents un peu partout dans le monde. Rappelons que les dimensions de ces aquifères peuvent excéder quelques kilomètres d'épaisseur et s'étendre sur des centaines, voire des milliers de km².

D'autres pistes font l'objet de recherches exploratoires :

La voie chimique : fixation en un produit stable pour former des roches carbonatées par un procédé naturel de minéralisation, en faisant réagir le CO₂ avec des roches basiques (basaltes, etc.) ou des déchets industriels riches en oxydes de fer, de calcium et d'autres métaux carbonatés (cendres volantes, laitiers de sidérurgie...).

La voie biologique : biofixation du CO₂ par la photosynthèse de microalgues en incorporant dans un bioréacteur du CO₂ d'origine industrielle et des nutriments nécessaires à la croissance des algues,

¹ 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.

production de gaz naturel à partir de la réduction du CO₂ en méthane en utilisant des bactéries méthanogènes

Le stockage océanique, c'est à dire dans le fond des océans ou dans la colonne d'eau, fait partie des options qui suscitent une opposition vigoureuse 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.

4. A quelles sources d'émissions s'appliquent le captage et le stockage géologique ?

Cette filière s'applique aux sources d'émissions concentrées de CO₂, c'est à dire aux émissions produites par les installations industrielles (centrales thermiques, cimenteries, raffineries, usines sidérurgiques...) qui sont responsables de près des 2/3 des émissions de CO₂ dans le monde. Les centrales électriques contribuent, en particulier, pour 40 % aux émissions mondiales de CO₂.

Concernant le transport, deuxième secteur émetteur de CO₂, il n'est pas réaliste de vouloir piéger le gaz carbonique émis par chaque véhicule. Il existe actuellement, pour le transport, d'autres moyens de limiter les émissions de CO₂, via des technologies qui améliorent le rendement des moteurs. Les constructeurs automobiles européens s'y sont engagés : ils envisagent de réduire, en moyenne, les émissions de CO₂ au kilomètre parcouru à 120g/km en 2012 (contre 190g/km en 1997). Mais d'autres solutions sont également envisagées en ayant par exemple recours aux biocarburants ou à l'hydrogène dont les usines de production pourraient être couplées avec un système de captage et de stockage de CO₂.

5. Quel est le volume de CO₂ qui pourrait être stocké ?

Ce sont les aquifères profonds qui possèdent la plus grande capacité de stockage ; elle est dix fois supérieure à celle des réservoirs de pétrole ou de gaz. Elle dépasserait, pour l'Europe, 800 milliards de tonnes de CO₂ et serait, 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. Les capacités mondiales de stockage dans les gisements d'hydrocarbures permettraient de stocker environ 1 000 milliards de tonnes de CO₂, soit le tiers des émissions mondiales pendant un siècle. Pour ce qui concerne les veines de charbon non exploitées, leur potentiel de stockage, bien que difficile à évaluer, tourne autour de 40 milliards de tonnes.

Cependant, ces estimations varient fortement en fonction des méthodes de calcul utilisées (ex. à l'échelle mondiale, les estimations varient de quelques 100 à 200 000 milliards de CO₂) car elles sont fondées soit sur des hypothèses trop grossières, soit sur la prise en compte partielle des mécanismes de stockage dans le sous-sol.

Une action est engagée au niveau international (Carbon Sequestration Leadership Forum-CSLF) afin de clarifier les terminologies utilisées et proposer des méthodes d'estimation acceptées et validées par tous les membres de cette organisation.

6. Sous quelle forme va-t-on pouvoir transporter, injecter et stocker le CO₂ ?

Le transport du CO₂ peut se faire, à l'état supercritique ou à l'état liquide, par pipelines ou par bateaux.

- Le CO₂ est déjà transporté dans des gazoducs à l'état super critique (pression supérieure à 74 bars et à plus de 31°C) pour les besoins de l'industrie pétrolière. La méthode est notamment employée aux Etats Unis où plus de 900 millions de tonnes par an transitent dans 1 000 km de pipelines. Ce type de transport est relativement coûteux car il nécessite une bonne isolation et des installations de compressions et d'injection adaptées.
- Le CO₂ peut être transporté et injecté dans le sous sol à l'état liquide : la température et la pression doivent être calculées pour le maintenir en phase liquide (par exemple 10 bars et - 40°C). Cette deuxième solution permet de réduire le coût des équipements d'injection, mais entraîne un coût supplémentaire de réfrigération.

- Dans le sous-sol profond (au-delà de 800 m de profondeur), le CO₂ est piégé essentiellement sous forme supercritique. Au cours du temps, une partie du CO₂ va se dissoudre dans l'eau (piégeage sous forme dissoute) et éventuellement réagir avec la roche pour former des minéraux carbonatés (piégeage sous forme minérale).

7. Comment envisage-t-on de capter le CO₂ ?

3 possibilités :

- Piéger le CO₂ rejeté dans les fumées de combustion des installations industrielles existantes. Le CO₂ peut être, par exemple, extrait dans des colonnes de lavage grâce à un solvant chimique qui est ensuite régénéré. Mais, avec les technologies actuelles, le procédé induit une forte surconsommation énergétique.
- Réaliser une combustion en présence d'oxygène pur au lieu de l'air (pour les nouvelles installations), ce qui permet d'obtenir des fumées plus concentrées en CO₂. Mais la séparation de l'oxygène de l'air est également coûteuse et consommatrice d'énergie.
- Extraire le CO₂ à la source, avant l'étape de combustion, en transformant le combustible fossile en un gaz de synthèse². Cette voie, à plus long terme, permettrait de produire de l'hydrogène tout en captant efficacement le CO₂.

Ces technologies devraient permettre de capter plus de 90 % du CO₂ émis par les fumées industrielles. Cela correspond notamment à l'objectif fixé par le projet européen Castor³. Le volume de CO₂ réellement évité dans l'atmosphère sera néanmoins inférieur puisque les technologies de captage consomment de l'énergie, ce qui génère à nouveau du CO₂. Des solutions prometteuses minimisant cette surconsommation énergétique sont à l'étude.

8. Comment envisage-t-on de réduire les coûts du captage ?

Le captage du CO₂ est d'ores et déjà une technologie industrielle mais des progrès techniques sont encore nécessaires pour minimiser sa consommation énergétique et réduire son coût (cette étape représente environ 70 % du coût total de la filière). Les procédés de première génération sont aujourd'hui bien maîtrisés par l'industrie à l'échelle de pilotes et il faut maintenant les adapter à des tailles plus grandes moyennant des travaux de R&D complémentaires. De nouveaux procédés dits de deuxième génération sont d'ores et déjà à l'étude. Il est probable que seules ces technologies de rupture permettront d'atteindre les objectifs de coût et d'efficacité.

Les recherches portent sur tous les aspects : depuis la consommation énergétique des procédés 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 captage de CO₂ sous forme d'hydrate.

L'optimisation de la gestion de l'énergie dans les usines est également un enjeu important. À titre d'exemple, dans le procédé de post-combustion 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.

9. Y a-t-il des verrous technologiques ? Quels sont les pays et les organismes en pointe dans le domaine du captage ?

² Le combustible est converti en entrée d'installation en gaz de synthèse, mélange de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène. Puis lors d'une étape de conversion, le CO réagit avec l'eau pour former du CO₂ et de l'hydrogène qui sont ensuite séparés

³ Projet européen CASTOR : L'objectif du projet est de permettre le captage et le stockage géologique de 10% des émissions européennes de CO₂, soit 30% des émissions des grosses installations industrielles (centrales thermiques de production d'électricité principalement). Pour ce faire, deux types d'approche sont validées et développées : d'une part, de nouvelles technologies permettant le captage et la séparation du CO₂ des fumées, et son stockage géologique, et d'autre part, des outils et méthodes permettant de quantifier et minimiser les incertitudes et risques liés au stockage du CO₂.

- Les technologies pour extraire le CO₂ des fumées de combustion existent. Les industriels s'y intéressent de près car, même si les coûts restent aujourd'hui prohibitifs, ces technologies pourraient s'appliquer aux usines actuelles et être utilisées à grande échelle. Des solutions plus performantes sont à l'étude dans les laboratoires, tant en Europe (projet Castor) qu'aux Etats-Unis (DOE). Un débouché industriel pourrait être envisagé, pour certaines d'entre elles, à l'horizon 2010/2015.
- S'agissant des nouveaux processus de combustion renforçant la concentration en CO₂ (combustion à l'oxygène pur) envisagés dans le cas du remplacement des usines (en particulier des centrales à charbon européennes), la recherche et les laboratoires européens, notamment suédois et français, sont très en pointe. Une technologie prometteuse de "chemical looping" utilisant un support métallique dans la production d'oxygène fait l'objet de toutes les attentions.
- La troisième voie - la décarbonisation avant la combustion du combustible, en entrée d'installation, via la production d'hydrogène - est prometteuse mais la plus futuriste. L'Europe et les Etats-Unis ont lancé deux programmes de recherche, sur 10 ans, et financés par plus de 1 milliard d'euros chacun.

10. A quelle profondeur envisage-t-on de stocker le CO₂ dans le sous-sol ?

Le stockage géologique est envisagé à des profondeurs supérieures à 800 mètres :

- dans des gisements de pétrole et de gaz naturel épuisés ou en voie d'épuisement (combiné à la récupération assistée de pétrole ou de gaz), à une profondeur entre 500 et 2 000 mètres,
- dans des gisements de charbon inexploités (combiné à la production de méthane) à une profondeur moyenne de l'ordre de 1000 mètres,
- en aquifères profonds, à une profondeur supérieure à 1000 mètres.

La profondeur nécessaire pour atteindre l'état supercritique du CO₂ (à plus de 31°C et 74 bars de pression, le CO₂ est plus dense et occupe moins de volume qu'à l'état gazeux) dépend du gradient géothermique local ; elle se situe généralement entre 700 et 900 mètres.

11. Quelle durée de stockage envisage-t-on pour réduire les émissions de CO₂ ? 100, 1000, 10000 ans ? Et pourquoi ?

La durée de stockage envisagée est comprise entre 500 et quelques milliers d'années. Il semble admis par la communauté scientifique qu'il faudra environ 500 ans pour espérer stabiliser la teneur de l'atmosphère en CO₂ et mettre fin au recours aux énergies fossiles.

Il s'agit de couvrir non seulement la durée pendant laquelle les combustibles fossiles resteront disponibles (1 à 2 siècles) mais aussi la durée du rééquilibrage océan-atmosphère (environ un demi millénaire). En effet, il faut prendre en compte le cycle du carbone qui est régi par deux échanges : l'échange entre l'atmosphère et l'océan et celui entre la biosphère et l'atmosphère. 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 permettent d'effectuer le stockage sur des périodes pouvant atteindre un à deux milliers d'années.

12. A quelle échéance pourrait-on envisager une mise en œuvre industrielle du captage et du stockage du CO₂ ?

En Norvège, Statoil stocke depuis 1996 un million de tonnes de CO₂ par an dans un aquifère sableux sous la Mer du Nord. Il s'agit de la première opération industrielle de stockage géologique à des fins environnementales. Depuis, plusieurs projets pilotes de captage et d'injection de CO₂ ont été mis en œuvre. Il reste encore à faire la preuve de la faisabilité technique et économique à grande échelle de la filière.

A cette fin, on assiste aujourd'hui à un élan de recherche sans précédent. Les programmes de R&D sortent des laboratoires pour entrer dans une phase où les stratégies industrielles se mettent en place. Les projets d'installations pilotes ou de démonstration se multiplient, en Europe notamment, témoignant de la confiance des industriels dans cette technologie. Ils ont d'abord été initiés par les

compagnies pétrolières et gazières qui se sont appuyées sur leur savoir-faire en matière de gestion et d'exploitation du sous-sol. Depuis quelques années, les industries émettrices de CO₂ et en particulier les électriciens, les rejoignent. En Allemagne Vattenfall, EON et RWE ont des projets pilotes de centrales sans émissions de CO₂. Total en France met en oeuvre un projet pilote à Lacq. Au Royaume Uni, BP lance aussi une première réalisation industrielle dans ce domaine. Aux Etats-Unis, le projet FutureGen, lancé avec des partenaires industriels, prévoit la construction d'une centrale de production d'hydrogène à partir de charbon, avec l'utilisation des technologies de captage/stockage. Outre la production d'énergie, la filière intéresse aussi d'autres industriels dans la sidérurgie, la production de ciments ou le traitement des déchets.

Parallèlement à cela, les actions pour constituer un cadre juridique et informer l'opinion publique sont en marche. Dans ce contexte, le captage et le stockage du CO₂ pourraient se développer, à une échelle industrielle, d'ici 10 à 15 ans.

La plateforme technologique européenne *Zero Emission Fossil Fuel Power Plants (ZEP)*, qui a pour objectif d'amener les centrales thermiques à une émission nulle de CO₂ à l'horizon 2020, a établi un plan de déploiement ambitieux de la filière captage, transport et stockage du CO₂ (CCS) :

- Engager dès 2007 tant avec le public que les pouvoirs publics une campagne d'information.
- Etablir en 2007/2008 un cadre légal et réglementaire incluant la reconnaissance des activités de CCS dans la Directive européenne de négoce des émissions de CO₂ ainsi que dans les mécanismes liés au Protocole de Kyoto.
- Définir en 2007 une dizaine d'emplacements potentiels de stockage et promouvoir leurs mécanismes de financement.
- Envisager une douzaine d'opérations de captage et une demi douzaine de sites de stockage d'ici 2015, chaque site ayant une capacité minimale de 2 millions de tonnes de CO₂.
- Planifier d'ici 2010 la construction des infrastructures de transport de CO₂ (pipelines) au niveau européen.

13. Quels sont les pays en pointe dans le domaine du stockage? Y a-t-il des verrous technologiques ?

Les pays en pointe dans ce domaine sont :

- la Norvège (opération industrielle de stockage géologique du CO₂ en mer du Nord, Sleipner depuis novembre 1996)
- les Etats-Unis et le Canada (opération industrielle de récupération assistée de pétrole à Weyburn depuis septembre 2000), l'Australie qui a construit une feuille de route extrêmement solide et détaillée et qui s'apprête à lancer ses premières opérations de démonstration
- l'Angleterre, le Danemark, les Pays-Bas et la France qui participent à de nombreux projets européens et internationaux de recherche. Le premier projet européen de recherche JOULE, auquel la France a participé a démarré en 1993. Depuis 5 ans, l'Allemagne et l'Italie ont également une politique très bien structurée.

Le stockage géologique du CO₂ à l'échelle industrielle sera techniquement viable lorsque l'on aura prouvé la capacité des réservoirs à recevoir un flux important de gaz pendant plusieurs décennies, démontré l'aptitude des sites de stockage à retenir le CO₂ injecté pendant une période minimale de l'ordre de 1000 ans avec un risque maîtrisé de fuite accidentelle, et un taux de fuite moyen annuel inférieur à 0,001% de la quantité initialement stockée, montré la possibilité de surveiller les stockages et compris le devenir du CO₂ à long terme (centaines d'années).

14. Va-t-on pouvoir injecter le gaz là où il est produit en grande quantité ?

Tout dépend du type de stockage envisagé. Les lieux de stockage les plus connus et les mieux maîtrisés sont actuellement les gisements de pétrole et de gaz déplétés ou en phase de déclin. Leur potentiel à l'échelle mondiale se situe entre 560 et 1170 Gt CO₂. Mais ces stockages potentiels sont très inégalement répartis sur la planète et, généralement, ils ne sont pas situés dans les régions où les émissions, et donc le potentiel de captage, sont les plus grands. L'utilisation massive de ces lieux de stockage impliquerait donc de transporter le CO₂ sur de très longues distances, et en grande quantité : par exemple, pour la seule production d'électricité, la captage du CO₂ pourrait

représenter en 2050 un volume de gaz à transporter 5 fois supérieur à celui du gaz naturel transporté actuellement.

L'intérêt d'étudier les autres lieux de stockage, comme les aquifères profonds et les veines de charbon inexploitable, est donc important. Ces derniers sont mieux répartis sur la planète, mais leur potentiel réel encore mal connu.

15. Comment va-t-on transporter le CO₂ sur de longues distances ?

Compte tenu des volumes et des distances, deux types de transport sont possibles à grande échelle :

- Par bateau : le CO₂ est transporté en phase liquide à pression modérée et à basse température.
- Par canalisation terrestre et maritime : le CO₂ est sous pression à l'état super critique. Une solution de transport à l'état liquide, plus économique, est à l'étude.

Si le transport par gazoduc ou navire ne pose pas de problème technique (sauf à maîtriser les impuretés produites par les différents procédés de captage), il reste à construire et gérer un véritable réseau permettant de l'acheminer en toute sécurité depuis les lieux d'émissions jusqu'aux sites de stockage.

16. Existe-t-il déjà un pilote de captage sur une installation industrielle en France ou en Europe ?

Dans le cadre du projet européen Castor, le plus grand pilote mondial de captage post combustion a démarré début 2006, au Danemark, sur une centrale à charbon (opérateur : compagnie Elsam) ; il offre une capacité de captage d'une tonne de CO₂ à l'heure.

17. Envisage-t-on de faire un site pilote de stockage en France ? Où et à quelle échéance ?

Oui, en aquifère profond dans le grand bassin parisien où l'on trouve des couches géologiques susceptibles de piéger le CO₂ (qui passe de l'état gazeux à l'état supercritique à 800 m de profondeur) : les carbonates du Dogger (1400 à 2200 mètres de profondeur) et les grès du Trias (1500 à 3000 mètres de profondeur), et à une échéance comprise entre 2009 et 2011. Par ailleurs, Total lance un projet intégré de captage et stockage de CO₂ dans un ancien réservoir de gaz naturel du bassin de Lacq qui démarrera fin 2008.

18. La convention de Londres sur l'interdiction d'immersion des déchets est-elle un frein au stockage géologique sous les fonds marins ?

Le stockage dans le sous-sol marin est régi par deux textes internationaux : la Convention de Londres (1972) et son Protocole (1996) sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion de déchets et la Convention Oskar pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est. Le but initial de ces conventions était de protéger l'écosystème marin d'éventuelles pollutions, mais elles n'envisageaient pas encore à l'époque le recours au stockage du CO₂ comme moyen de réduction des émissions de gaz à effet de serre. En 2006, à la suite d'une large consultation, le Protocole de Londres a été amendé sur ce point : le texte permet maintenant l'injection de CO₂ sous le fond de la mer sous certaines conditions de mise en oeuvre. Lors de sa réunion d'Ostende en juin 2007, la Convention Oskar vient d'en faire autant.

19. Quel est le coût de la filière ? Cette filière peut-elle être économiquement rentable?

Les technologies de transport de CO₂ par pipeline et d'injection en profondeur dans des couches géologiques sont opérationnelles à des coûts raisonnables. En revanche, les techniques de captage existantes sont relativement onéreuses. Le coût de la filière complète captage/transport/stockage est actuellement évalué à 60 euros en moyenne la tonne de CO₂ évitée⁴, dont 85% pour la seule captage qui intègre le prix de la séparation du gaz carbonique et sa compression.

Les solutions envisagées pour réduire les coûts sont l'amélioration des techniques de captage existantes et le développement de technologies innovantes mais aussi une intégration énergétique poussée au niveau des procédés et la standardisation des méthodes mises en oeuvre.

L'objectif à terme est d'atteindre des coûts de l'ordre de 20 à 30 €/t CO₂. A titre de comparaison, dans le marché européen d'échange de quotas d'émissions de CO₂, les industriels dépassant leurs quotas d'émission doivent payer une amende non libératoire de 40 €/CO₂. Elle devrait passer à 100 €/t à partir de 2008.

20. Où en est-on du marché européen d'échange de quotas d'émissions de CO₂ ? Quel est le prix de la tonne de CO₂ ?

Le système communautaire d'échange de droits d'émission de gaz à effet de serre (EU-ETS) fonctionne depuis le 1er janvier 2005. Ne sont concernées pour l'instant que les émissions de CO₂ provenant de cinq secteurs d'activité : la production d'énergie, de métaux ferreux, l'industrie minérale (cimenterie, verrerie), la fabrication de produits céramiques et la production de pâte à papier. Une première phase (2005-2007) s'achève, une deuxième (2008-2011) correspondra à la période de l'engagement du Protocole de Kyoto, une troisième pour les années suivantes est en cours de discussion à Bruxelles.

Si le cours de la tonne de CO₂ sur le marché a pu atteindre 31 euros, le cours de l'allocation de CO₂ disponible en 2007 (EUA 2007) est au plus bas (0,10€/tCO₂ le 17 août 2007) en raison de la surallocation de quotas sur la phase I du marché. En revanche, le cours du quota européen délivrable sur le marché en 2008 (EUA 2008), cote 19,30 €/tCO₂ ce même 17 août 2007. Les acteurs anticipent ainsi un raffermissement du marché en raison principalement d'une réduction des plan nationaux d'allocation des quotas (PNAQ) en phase II. La France, par exemple, se voit attribuer 132,8 millions de quotas en phase II contre 156 en Phase I.

Le captage et le stockage géologique du CO₂ font, quant à eux, l'objet de discussions auprès de la Commission européenne sur la façon dont ils pourront être introduits dès 2008 dans l'EU-ETS. La Commission prépare une communication à ce sujet d'ici fin 2007. Ce sera une condition essentielle pour que le captage et le stockage du CO₂ puissent contribuer à la réduction des émissions.

⁴ La tonne de CO₂ évitée est égale à la différence entre les émissions d'une centrale de référence et les émissions de la même centrale équipée de technologies de capture

21. Quelle pourrait être la portée de la filière captage/stockage dans le cadre du mécanisme de développement propre du Protocole de Kyoto ?

Le mécanisme de développement propre du protocole de Kyoto prévoit la possibilité, pour les pays signataires, d'investir dans des projets permettant une réduction des émissions de CO₂ dans les pays en développement non signataires. Le pays investisseur obtient, en contrepartie et sous certaines conditions, des crédits d'émissions.

A l'heure actuelle, les technologies de captage et stockage du CO₂ ne permettent pas à un industriel de réduire son niveau d'émission, faute de reconnaissance juridique internationale.

Elles pourraient dans le futur faire parti des mécanismes de Kyoto (à l'occasion des négociations en cours), quand elles seront éprouvées et validées. Ces technologies pourraient alors intervenir dans les bilans d'émissions des entreprises (baisses des émissions, crédit...)

22. Quel pourrait être l'apport du captage et du stockage à la filière hydrogène?

La production massive d'hydrogène, utilisée comme vecteur énergétique ou comme matière première de nombreuses filières industrielles, constitue un espoir sérieux de parvenir à une ère industrielle moins émettrice de gaz carbonique. Cependant, la production d'hydrogène en elle-même est une opération fortement consommatrice d'énergie qui pourrait donc conduire à une augmentation des émissions de gaz à effet de serre. Le stockage géologique du CO₂ est donc une solution potentielle à la réduction des émissions engendrées par la production d'hydrogène. En effet, la production d'hydrogène par vapo-reformage⁵ de gaz naturel (CH₄) ou par oxydation partielle de charbon suivie de vapo-reformage des gaz produits se fait en deux étapes imbriquées : production d'hydrogène et production de CO₂ de grande pureté qu'il est alors aisé de capter et de stocker en formation géologique.

23. Quelle est la réglementation pour le stockage géologique à terre ?

Actuellement, il n'y en a pas ! Elle est donc à définir. En 2006, le Conseil général des Mines a remis au ministre délégué à l'Industrie, un rapport qui recense les différentes dispositions juridiques applicables, envisage des modifications de ces dispositions et propose des solutions pour les premières opérations pilotes ou de démonstration. De son côté, la Communauté européenne travaille sur une proposition de directive spécifique concernant le captage et le stockage du CO₂ attendue pour la fin de l'année 2007.

24. Y a-t-il des risques de fuites ? Quelles seraient les conséquences pour les populations locales ?

Des fuites localisées en grandes quantités représenteraient un risque sérieux pour les populations. Tout le monde a en mémoire le dégazage du Lac Nyos au Cameroun ayant entraîné de nombreuses morts dans les populations alentours. Il est donc évident que la prise en compte du risque de fuite brutale est l'élément prioritairement étudié par la communauté scientifique. Il ne pourrait que correspondre à des incidents au niveau des cuvelages ou des cimentations de puits. Ces risques sont classiquement maîtrisés par l'industrie pétrolière et gazière. On est ici dans l'analyse de risque industriel. S'agissant des fuites, faibles, régulières et diffuses, le risque maximum toléré est de 0,001 % de fuite par an. De tels niveaux ne présentent absolument aucun danger puisqu'ils sont 100 fois plus faibles que les flux naturels associés au fonctionnement biogénique des sols.

Il faut ajouter que 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, voire des millions

⁵ Reformage : réaction chimique qui casse les molécules d'hydrocarbures sous l'action de la chaleur pour en libérer l'hydrogène. Le vapo-reformage du gaz naturel est le procédé le plus courant : le gaz naturel est exposé à de la vapeur d'eau très chaude et libère ainsi l'hydrogène qu'il contient et du CO₂.

d'années, dans certains bassins sédimentaires (gisement de Montmirail dans la Drôme, Etats-Unis, Australie, Chine, Hongrie, Italie, Allemagne, Grèce...) et peuvent donc servir de modèles pour comprendre le comportement du CO₂ dans le sous-sol.

Enfin, le risque d'une fuite éventuelle de CO₂ est à comparer aux risques avérés qui nous guettent face à l'augmentation de CO₂ dans notre atmosphère et à l'acidification des océans. Si principe de précaution il y avait, il y aurait urgence à stocker le CO₂ dans le sous-sol pour remédier aux émissions de CO₂.

25. Comment garantir la sécurité de la filière ?

La maîtrise des risques en terme de sécurité autour du stockage géologique est un enjeu prioritaire. Il s'agit donc de garantir la sécurité de la filière sur de longues périodes et la surveillance des sites de stockage est un des points clés de cette sécurité. Pour ce faire, il est nécessaire de contrôler et maîtriser l'injection et la localisation du CO₂ mais aussi de surveiller les possibilités de fuites qui peuvent survenir au cours de la vie du stockage. Nous disposons d'ores et déjà de technologies de détection très sensibles. Des premières opérations d'injection en cours au niveau mondial depuis quelques années permettent d'améliorer le savoir-faire.

Pour garantir la sécurité du stockage, l'effort doit surtout porter sur la caractérisation des sites en amont afin que seuls des niveaux de fuites très bas soient tolérés. Des travaux de recherche, et en particulier de modélisation, sont conduits pour acquérir la maîtrise de la compréhension des processus chimiques et physiques dans les formations géologiques susceptibles de recevoir le CO₂. Des méthodologies sont également développées pour la sélection des sites de stockage et la prédiction à long terme de l'impact du CO₂ sur le réservoir et l'environnement ainsi que pour l'évaluation des risques et la remédiation. De nombreux projets dans le monde s'attellent à cette tâche et en particulier le réseau d'excellence européen, CO₂Geonet. Le programme national sur la captage et le stockage du CO₂ a inscrit cette thématique de façon prioritaire.

Les enquêtes réalisées auprès du grand public révèlent une méconnaissance bien compréhensible de ces technologies. Ainsi, d'après un sondage mené en avril 2007 par TNS-SOFRES et le CIREN, à demande de l'ADEME et l'ANR, un quart des interviewés ont entendu parler de stockage de CO₂ mais 78 % d'entre eux ne savent pas encore l'expliquer. Une fois informé sur la technologie, 59 % des sondés se déclarent à priori favorables à l'utilisation de ce procédé en France, cependant la notion de risque fragilise cette opinion. En effet, 63 % déclarent être inquiets face aux incertitudes liées aux risques et souhaitent que les recherches soient approfondies. Les opérations de communication, d'explication et de dialogue avec le public doivent donc sensibiliser la population à ces nouvelles technologies pour parvenir à un consensus autour du projet.

26. Les budgets de R&D affectés au captage et au stockage de CO₂ ne pénalisent-ils pas les efforts à porter sur les autres moyens de réduction des gaz à effet de serre ?

Non, si l'on prend en compte la problématique de la transition énergétique. Il faut considérer l'effort financier en matière de R&D consenti sur la captage et le stockage du CO₂ comme indispensable dans la période transitoire entre les actuelles énergies fossiles (pétrole, gaz et charbon), qui occuperont encore une place dominante dans les prochaines décennies, et les énergies alternatives - énergies renouvelables et futures énergies (hydrogène et piles à combustible, solaire...) - qui ne sont pas encore matures pour prendre massivement le relais.

Même si l'on envisage des politiques incitatives fortes qui viendraient renforcer les efforts de substitution des énergies fossiles par des sources d'énergie alternatives, il paraît impossible, compte tenu de l'inertie des systèmes énergétiques, d'envisager à l'horizon des 20 à 30 prochaines années une substitution massive des énergies fossiles, qui représentent près de 90% de la fourniture d'énergie, par d'autres sources d'énergie. Dans un contexte d'utilisation durable des énergies fossiles, la maîtrise des émissions de CO₂ est incontournable. Dans le domaine de l'industrie, la voie du stockage géologique apparaît comme la seule en mesure de traiter le problème à grande échelle. Et les investissements de "précaution" que sa mise en oeuvre implique seront bien moins coûteux que les investissements de "réparation" à consentir en cas de changement climatique majeur.

27. Quel est l'engagement de l'Europe dans ce domaine ?

L'Europe joue un rôle moteur dans le développement de la filière captage et stockage du CO₂ qu'elle a encouragée dès les années 90. Ces dernières années, elle a en particulier lancé, le 1^{er} décembre 2005, la plate-forme technologique européenne *Zero Emission Fossil Fuel Power Plants* (ZEP). Réunissant les acteurs publics et les industriels du domaine, elle est destinée à fédérer les actions de R&D pour la mise au point de centrales électriques à combustibles fossiles (au charbon particulièrement) n'émettant plus de gaz à effet de serre. Parallèlement, dans le 7^e Programme-cadre (PCRD), prévu pour la période 2007-2011, le budget destiné à la recherche sur l'énergie a augmenté d'environ 45 % par rapport à celui du 6^e PCRD, une part étant destinée aux travaux sur le captage et le stockage géologique du CO₂.

Pour que la filière puisse se développer, il est également indispensable de déterminer un cadre légal et réglementaire adapté. À cet effet, une directive européenne sera proposée fin 2007 pour une mise en application vers 2008/2009. Il est nécessaire aussi de développer ces technologies dans les pays les plus concernés par l'usage du charbon. Dans cette optique, le 23 décembre 2005, l'Union européenne a signé un accord (« memorandum of understanding ») avec le Ministère chinois des sciences et technologies, dans le but de collaborer sur les technologies du charbon propre.

28. Le captage/stockage va-t-il permettre de rendre plus propre l'utilisation du charbon ?

Dans un contexte où la demande de charbon croît, et sachant que sa combustion émet deux fois plus de CO₂ que celle du gaz naturel, la mise en oeuvre de technologies de captage et de stockage apparaît comme indispensable. Mais elle doit aller de pair avec l'augmentation de l'efficacité énergétique des centrales au charbon. Les 2/3 ont plus de 20 ans et affichent un rendement moyen de 29 %. Les plus modernes, basées sur la technologie dite de cycle vapeur supercritique, peuvent atteindre des rendements de 45 %. Cette meilleure efficacité est de surcroît nécessaire pour soutenir le concept de "captage ready", c'est-à-dire la construction de centrales conçues dès le départ pour pouvoir intégrer un module de captage de CO₂, lui-même consommateur d'énergie. Le projet européen Coach a notamment pour objectif d'inciter les électriciens chinois à utiliser les technologies de captage et de stockage dans leurs futures unités de production.