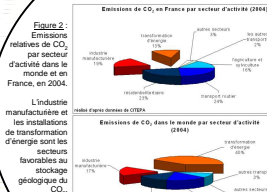


Les faits

La croissance exponentielle de la population mondiale et la hausse globale de son standard de vie, associée au développement récent des pays émergents comme la Chine et l'Inde impliquent une demande en énergie spectaculaire posant deux principaux problèmes.

- > Le premier réside dans l'épuisement des ressources énergétiques fossiles (pétrole et gaz principalement)
- > Le second résulte du premier: la hausse sans précédent de la concentration atmosphérique en CO₂, issu de la combustion des carburants d'origine fossile. Figure 1

Figure 1 - évolution de la température moyenne à la surface du globe et de la concentration en CO₂ atmosphérique. (Source: Wikipedia)



L'industrie manufacturière et les installations de transformation d'énergie sont les secteurs favorables au stockage géologique du CO₂.

Le CO₂, c'est dangereux?

Le CO₂ est un gaz à effet de serre (GES), naturel, qui peut « piéger » la chaleur émise par la Terre (sous forme de rayons infra-rouges principalement) en raison de ses propriétés physico-chimiques.

Le CO₂ est émis naturellement par les animaux et la végétation, mais cette dernière est aussi capable de le piéger lors de la photosynthèse.

Parmi les gaz émis par l'Homme, le CO₂ contribue le plus au réchauffement global.

L'homme rejette environ 10Gt/an de CO₂ dans l'atmosphère (15% des émissions naturelles) et ces émissions sont inégales selon les pays et les secteurs d'activités (figure 2).

La concentration en CO₂ atmosphérique évolue de façon périodique en raison de l'existence de flux de carbone entre les compartiments naturels, appelés « sources » et « puits » de carbone.

Le cycle du carbone s'équilibrerait naturellement dans les activités humaines, mais celles-ci contribuent à l'injection massive de CO₂ dans l'atmosphère.

Quelques conséquences du réchauffement global...

- Hausse du niveau des mers
- Modification des courants marins
- Changements climatiques probables
- Perte de biodiversité
- Déplacement de populations...

Pourquoi planter des forêts n'améliorerait pas la situation...

- Une forêt se comporte comme un puits de carbone uniquement quand elle croît.
- Une forêt, cela pousse lentement (100 ans environ pour arriver à maturité).
- L'opération serait à renouveler chaque siècle.
- Il faut planter dans un lieu qui absorbe moins de CO₂ qu'une forêt (terres agricoles par exemple, mais pas les prairies...).
- Il faut de la place (une forêt n'absorbe qu'environ 2 tonnes de CO₂ / ha / an).
- Etc...

L'homme doit agir en diminuant ses émissions de CO₂...

Mais quelles sont les solutions?

De nombreux pays se sont engagés, en ratifiant le protocole de Kyoto (1998), à réduire leurs émissions de CO₂. Plusieurs solutions ont été testées, parmi lesquelles on peut trouver les marchés d'émission de CO₂, l'utilisation de carburants verts, l'acquisition de comportements plus respectueux de l'environnement mais aussi le stockage géologique du CO₂.

Loi française et CO₂

Il n'existe pas jusqu'à présent de législation ou de réglementation concernant le stockage souterrain du CO₂. Malgré tout, il n'y a pas de statut légal du CO₂ de nombreux textes réglementaires voient le jour, mais aucun ne prend en compte le long terme.

Des taxes sur les émissions de GES apparaissent, et la loi française prévoit des quotas d'émissions de GES (L229-5 à L229-19 du Code de l'Environnement) concernant les installations entrant dans le champ d'application de la législation actuelle.

La question de responsabilité et de statut du CO₂ a fait l'objet de travaux:

- ✓ une étude du Conseil Général des Mines réalisée à la demande du Gouvernement Français
- ✓ les travaux de l'Union Européenne
- ✓ le moratoire émis par la Convention de Londres pour autoriser le stockage géologique en strates sous-marines.

Les projets pilotes actuels se réfèrent à des textes régissant le stockage souterrain du gaz naturel ou relatifs à l'exploitation pétrolière en Mer du Nord.

Capture et stockage géologique du CO₂

Où le capturer?

Il semble judicieux de **capturer dans les secteurs les plus producteurs de CO₂** (voir figure 2)

Les secteurs pouvant avoir recours au captage du CO₂:

- > la production électrique
- > 4 secteurs industriels:
 - la production du fer et de l'acier
 - la production de ciment
 - le raffinage des produits pétroliers
 - la pétrochimie

Certaines industries comme la production d'ammoniac ou le traitement du gaz naturel pratiquent déjà la séparation du CO₂. Alors qu'il est renvoyé à l'atmosphère, il pourrait être facilement récupéré et stocké.

Les secteurs du tertiaire, de l'agriculture, du résidentiel et du transport ne permettent pas une mise en place matérielle et économique du captage du CO₂.

Transport du CO₂

Le transport du CO₂ est nécessaire du lieu de captage vers le lieu de stockage. Il est **viaable à condition de ne pas produire de CO₂**.

Les techniques de transport existantes sont l'utilisation de pipelines (canalisations) et de navires.



Pipelines

Dans le monde, près de 3000 km de pipelines de CO₂ sont opérationnels, dont la majeure partie aux USA, depuis 1980. Ce type de transport impose que le CO₂ soit transporté à haute pression. Un autre moyen, encore à l'étude, serait de le transporter à l'état liquide.

Comment le capturer?

Procédé de post-combustion



Principe: Récupérer le CO₂ dilué dans les fumées de combustion.

Secteurs utilisant déjà le procédé: Traitement du gaz naturel, fabrication d'engrais, industrie agroalimentaire, énergie (industrie pétrolière et gazière)

Couramment utilisés: Capture par solvant: utilise les caractéristiques chimiques d'absorption de CO₂ de certains solvants. Ce sont en général des amines et le carbonate de potassium. Cette technologie est utilisée dans la récupération des résidus de CO₂ des centrales thermiques.

Autres procédés envisagés: Utilisation de chaux vive pour capter le CO₂, solidification par girvage du CO₂, adsorption, membrane absorbante.

Procédé d'oxy-combustion



Principe: Combustion à l'oxygène pur pour obtenir des fumées concentrées en CO₂

Secteurs utilisant déjà le procédé: Industrie du verre

Avantages et inconvénients:

- utilisé pour améliorer les performances de procédés industriels (industrie du verre)
- la distillation cryogénique est coûteuse et consommatrice d'énergie

Avancées techniques Pour éviter ce coût, une technologie prometteuse est envisagée: la combustion en boucle chimique (chemical looping combustion), qui transférerait l'oxygène en la faisant circuler sur un support métallique.

Procédé de pré-combustion



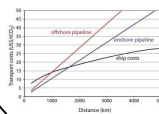
Principe: Capturer le carbone avant combustion.

Le combustible est gazéifié en un mélange de CO et H₂ par vaporeformage de gaz naturel en présence d'oxygène. Ce CO réagit ensuite avec l'eau dans un «reacteur shift» pour former du CO₂ et de l'H₂, qui sont ensuite séparés.

Secteurs utilisant déjà le procédé: Production de fertilisant, Energie, Gaz naturel

Avantages et inconvénients: Le H₂ séparé peut être ensuite utilisé, sans production de CO₂, dans des piles à combustible par exemple.

Figure 3: prix de transport du CO₂ selon le mode et la distance (Source: Interparliamentary Panel on Climate Change)



Le prix du transport du CO₂ par canalisations varie beaucoup en fonction de la nature des terrains traversés (de 0,5 à 10 euros par tonne de CO₂ pour 100 km traversés). Le transport maritime est plus économique mais moins pratique car il nécessite des stockages temporairement importants.

Les réservoirs pétroliers et gaziers

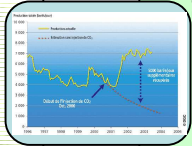
L'injection de CO₂ dans les gisements est déjà utilisée dans l'industrie pétrolière depuis plusieurs décennies pour améliorer la récupération des hydrocarbures.

La méthode consiste à maintenir la pression du réservoir en injectant le CO₂, qui, en se dissolvant dans le pétrole, en diminue la viscosité et facilite son déplacement jusqu'au puits d'extraction.

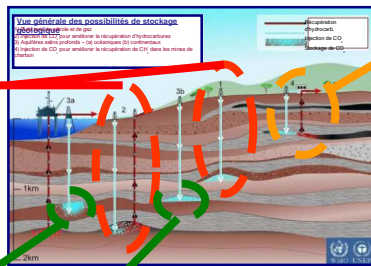
- Le taux de récupération du pétrole a ainsi été doublé depuis les années 1950
- Cette solution pourrait augmenter les achats de CO₂ d'origine industrielle pendant un siècle
- Ces réservoirs pourraient piéger environ le tiers des émissions mondiales

Un exemple:

A Weyburn (Canada), du CO₂ provenant d'une usine de gazéification de charbon est injecté dans un gisement de pétrole depuis octobre 2000 afin d'augmenter le rendement du gisement. (Voir ci-contre)



Où le stocker?



Concepts alternatifs

La séquestration minéralogique, l'utilisation de micro-algues (biofixation du CO₂ par photosynthèse), de bactéries (qui savent réduire le CO₂ en méthane), et le stockage dans les fonds océaniques sont d'autres moyens de séquestrer le CO₂ atmosphérique.

Le secteur du captage/stockage du CO₂ est en pleine expansion, les projets de recherche et les pilotes industriels se multiplient dans le monde (Weyburn au Canada, Salah en Algérie...) sous l'impulsion d'acteurs comme BRGM, IFP, SSC association...

Cependant, ces techniques ont leurs limites: le coût de capture est encore trop élevé, la mise au point de l'ensemble des procédés nécessite du temps, ces méthodes ne s'appliquent qu'à quelques

émetteurs (ne concernent pas encore les transports et le chauffage domestique) et à des structures récentes, ces solutions consomment de l'énergie, les risques d'accidents ne sont pas négligeables, et le cadre juridique reste à définir.

Une diminution des émissions de CO₂ à leur source, la préservation et restauration des puits de carbone naturels et utilisation des énergies renouvelables semblent donc la priorité urgente.

Les veines de charbon

La méthode consiste à extraire le méthane (le grisou) des mines de charbon en le remplaçant par du CO₂. Le charbon peut d'ailleurs absorber deux fois plus de CO₂ que de méthane.

- Une répartition géographique favorable: ce sont des structures géologiques existant un peu partout. Elles se trouvent à proximité des sources importantes de CO₂ que sont les centrales électriques et les installations industrielles, réduisant ainsi le coût de transport.
- Un avantage économique: le méthane récupéré peut être commercialisé
- Des capacités de stockage limitées. Seules les formations non exploitées sont concernées
- La faible perméabilité du charbon réduit les capacités à y injecter du CO₂ à fort débit

Un exemple:

Le projet RECOPL, en 2001, lancé par l'Union Européenne et créé par un consortium international, utilise un bassin houiller en Pologne.

Les aquifères salins profonds

Ce sont des roches poreuses ou perméables gorgées d'eau. Ces aquifères contiennent une eau très salée totalement impropre à la consommation humaine. Le CO₂ peut être stocké dans les pores des roches, à la manière des gisements naturels de dioxyde de carbone.

- Ces formations sont nombreuses et ont un potentiel énorme: elles pourraient stocker la totalité des émissions mondiales pendant des siècles.
- Le coût de stockage serait de l'ordre de quelques euros la tonne de CO₂, dépendant le stockage sous la mer est plus onéreux.

Un exemple:

A Sleipner, en Mer du Nord (Norvège), le premier site de stockage de CO₂ en aquifère salin profond a vu le jour en 1996. Du gaz naturel est extrait à 250m de profondeur depuis la plate-forme, puis le CO₂ qu'il contient en est séparé et injecté dans l'aquifère d'Utsira à 1000 m de profondeur.

La révolution énergétique qu'appelle la fin du pétrole laisse l'avenir incertain quant à l'utilisation de ces méthodes. Dans le cas d'une généralisation du nucléaire, est-ce profitable? Et si le charbon, pire émetteur de CO₂, remplaçait le pétrole...