

Radosław Tarkowski, Barbara Uliasz-Misiak¹

Le stockage souterrain : une solution pour le dioxyde de carbone²

Introduction

On considère de plus en plus souvent le dioxyde de carbone comme la principale raison du réchauffement climatique et la concentration de ce gaz dans l'atmosphère ne cesse d'augmenter à cause de l'activité humaine. Les experts s'accordent sur la nécessité de prendre des mesures en vue de réduire les émissions de CO₂ anthropogénique dans l'atmosphère. Le captage du CO₂ produit pendant le processus industriel et son stockage souterrain dans des structures géologiques profondes peut constituer une des solutions. La question du captage et de la neutralisation du CO₂ est devenue d'actualité au début des années 90 du siècle dernier et cela en lien direct avec le débat sur l'effet de serre et le rôle du dioxyde de carbone dans l'apparition de ce phénomène. Les nombreuses actions entreprises, les accords internationaux, les projets de recherche de l'Union Européenne confirment l'importance donnée à la neutralisation du dioxyde de carbone d'origine anthropogénique.

Pourquoi capter et stocker le CO₂ ?

Durant les cent cinquante dernières années, c'est-à-dire depuis le début de l'ère industrielle, l'utilisation de plus en plus grande de combustibles fossiles a augmenté de presque un tiers la concentration dans l'atmosphère de dioxyde de carbone, l'un des gaz à effet de serre : elle est passée de 280 à 365 ppm. Ce phénomène se poursuit. Les effets de l'augmentation de l'émission de gaz à effet de serre dans l'atmosphère ont une influence négative sur la vie des hommes. Le rapport rédigé en 2001 par un groupe de chercheurs de l'IPCC (*Intergovernment Panel on Climate Change*) (ainsi que les rapports suivants) prévoit qu'au XXI^e siècle, l'augmentation de la température sur terre pourrait atteindre 1,5°C, voire

¹ (Note de la rédaction) Institut de Gestion des Ressources minérales et de l'Énergie de l'Académie Polonaise des Sciences (IGSMiE PAN), ul. Wybickiego 7, 30-950 Kraków 65, skryt. poczt. 49, e-mail : tarkowski@min-pan.krakow.pl ; umb@min-pan.krakow.pl

² Version polonaise *Podziemne składowanie - sposób na dwutlenek węgla* publiée dans la revue : *Przegląd Geologiczny* nr 8, 2007, pp. 665-660.

6°C. Cela pourrait rendre plus fréquents les phénomènes atmosphériques extrêmes et causer d'importants changements climatiques régionaux ou d'énormes catastrophes naturelles. La demande grandissante d'énergie, surtout de la part de pays en voie de développement, indique que la quantité de CO₂ émis dans l'atmosphère continuera d'augmenter. La plupart des chercheurs considèrent que pour stabiliser la concentration et limiter les changements climatiques, l'émission mondiale de CO₂ devrait être diminuée au moins de moitié. Le protocole de Kyoto signé en 1997 par la plupart des pays et qui prévoyait de ramener en 2012 l'émission du dioxyde de carbone au-dessous du niveau de 1990, constitue un exemple d'action internationale entreprise en vue de la diminution des émissions de ce gaz. On indique plusieurs moyens de limiter l'émission anthropogénique de CO₂ comme, par exemple, l'amélioration de l'efficacité énergétique et la diminution de la demande en énergie grâce à l'utilisation de sources d'énergie renouvelable (éolienne, solaire, géothermique). Un autre moyen envisagé pourrait être la neutralisation du CO₂ dans la géosphère grâce au stockage de ce gaz dans des formations géologiques. Les schémas élaborés par l'IPCC (fig. 1) montrent que la CCS peut jouer un rôle important dans la réduction de l'émission de CO₂ au cours de ce siècle (avec d'autres techniques comme l'utilisation des énergies renouvelables et une utilisation plus efficace de l'énergie). Dans chaque cas, la part de la CCS constitue environ ¼ de réduction de l'émission exigée pour maîtriser le réchauffement climatique (IPCC, 2005 ; Storing..., 2007).

En quoi consiste la séquestration du CO₂ ?

La séquestration du dioxyde de carbone correspond au captage (*capture*) et/ou à la séparation (*separation*) et au stockage (*storage*) de ce gaz qui sinon aurait été émis dans l'atmosphère et y serait resté (fig. 2). La justification se trouve dans la possibilité d'utiliser les combustibles fossiles tout en réduisant l'émission de CO₂ dans l'atmosphère, ce qui permet de limiter l'incidence sur le climat. La définition utilisée ici correspond à l'acception de *Carbon Capture and Sequestration* (CCS) dans la littérature anglophone (Tarkowski 2005).

Les sources industrielles des émissions et les moyens de captage du CO₂

La séquestration du CO₂ concerne la neutralisation d'énormes quantités de ce gaz (des millions de tonnes) provenant de grandes sources d'émissions industrielles. Les plus grandes quantités sont produites dans les centrales électriques et les centrales chaleur-force, dans les centres sidérurgiques, les cimenteries, les entreprises chimiques (raffineries, production d'ammoniaque, d'oxyde d'éthylène, d'hydrogène) et autres. La question essentielle est ici la concentration de CO₂ différente dans les gaz d'échappement et dans les gaz industriels. Dans la plupart des cas, elle n'est pas élevée et se situe autour de 10% de volume des gaz. Le flot pur est émis seulement lors de certains processus industriels. C'est un des facteurs qui freine aujourd'hui la séquestration géologique du dioxyde de carbone. C'est pourquoi, dans un premier temps, il faudrait envisager le stockage souterrain du CO₂ près de centres d'émission de flots purs de ce gaz (par exemple, l'émission lors de la production des engrais azotés).

Il existe actuellement plusieurs technologies permettant d'obtenir un flot concentré de CO₂: captage en précombustion, captage en postcombustion, oxycombustion du charbon (fig. 3). Avant d'être injecté sous terre, le dioxyde de carbone doit être séparé des gaz d'échappement ou des gaz industriels. Cela peut être obtenu de plusieurs façons différentes : absorption (chimique, la plus souvent utilisée) ou physique, adsorption physique, fractionnement cryogénique, séparation avec des membranes. Néanmoins, à l'heure actuelle l'utilisation de ces méthodes à une très grande échelle reste très coûteuse en énergie et très chère (Podziemne składowanie..., 2005 ; Tarkowski, 2005).

Dans quels sites peut-on neutraliser le CO₂ ?

Pour séquestrer le CO₂, on peut utiliser l'écosystème terrestre, les océans ou des structures géologiques profondes. Un mode de séquestration correspondant à chacun de ces sites doit être mis au point. La neutralisation de CO₂ dans des écosystèmes terrestres constitue une des possibilités de réduction des émissions de CO₂ dans l'atmosphère. La contenance des écosystèmes terrestres reste néanmoins limitée. L'équilibre naturel a été bouleversé par l'introduction ininterrompue de CO₂ dans l'atmosphère (depuis le début de l'ère industrielle) à un rythme bien

plus rapide qu'il n'en pouvait être éliminé par des processus naturels. La quantité de CO₂ isolé pourra également être augmentée par des reboisements.

On envisage également la séquestration du CO₂ dans les océans. Plusieurs techniques d'injection du CO₂ dans les profondeurs océaniques sont proposées : injection à des profondeurs intermédiaires (1500-2000 m) ou à de grandes profondeurs (>3000 m), largages dans des fonds océaniques de blocs de dioxyde de carbone solide. On réfléchit également à la possibilité de réduction des émissions de CO₂ grâce à l'intensification du développement du phytoplancton. La séquestration dans les eaux océaniques suscite de fortes réticences à cause des effets sur l'écosystème marin, impossibles à prévoir (IPCC, 2005).

La séquestration minérale (carbonisation) est une autre technique. Elle consiste à faire réagir le CO₂ avec les minéraux existant dans la nature ou avec des déchets minéraux, ce qui aboutit à la création de carbonates stables. Le processus de carbonisation minérale par fixation du CO₂ dans des matières minérales, comme le talc ou la serpentine, est un phénomène naturel. Les minéraux qui peuvent être utilisés ici sont la serpentine, très répandue dans la nature, ainsi que l'olivine. Pour fixer le CO₂, on peut également utiliser des déchets minéraux : déchets de béton, cendres volatiles, déchets d'asbeste, scories sidérurgiques. Les avantages de cette méthode : stabilité des conditions de stockage à long terme (CO₂ est fixé de façon permanente) ainsi que la neutralité, par rapport à l'environnement, des carbonates créés à la suite de la carbonisation (Uliasz-Bocheńczyk et alli 2004 ; IPCC, 2005).

La séquestration géologique du CO₂ comme technique de neutralisation du dioxyde de carbone suscite beaucoup d'espoirs. Elle est également à rattacher au stockage du CO₂ dans des structures géologiques profondes.

Est-ce que le CO₂ peut être stocké sous terre ?

Le dioxyde de carbone peut être enfoui sous terre : c'est là un nouveau défi qui exige la solution de problèmes nombreux et complexes. Ils sont liés aux questions géologiques, questions de gisements, techniques et autres. La condition fondamentale qui décide de la possibilité de stockage sous terre du CO₂ est la présence des roches sédimentaires de grande épaisseur et vaste étendue, pouvant

fonctionner comme réservoir et protégés par une couche rocheuse isolante : ce sont là des conditions que remplissent les grands bassins sédimentaires. Mais les émetteurs industriels de CO₂ sont situés près de sites dont les caractéristiques géologiques et de gisement permettent le stockage souterrain du CO₂ (Tarkowski & Uliasz-Misiak, 2003 ; IPCC, 2005).

L'injection de CO₂ dans des roches réservoirs est une pratique utilisée dans l'industrie pétrolière depuis plusieurs dizaines d'années. Pour augmenter le degré d'exploitation du gisement de pétrole, on utilise l'injection de différents liquides (EOR - *Enhanced Oil Recovery* - intensification de l'extraction du pétrole), y compris du dioxyde de carbone ; c'est aujourd'hui une activité commerciale. Dans les opérations CO₂-EOR, on fait appel aux techniques de piégeage, de transport, d'injection, de suivi et de contrôle du CO₂, éléments essentiels de la séquestration géologique du CO₂.

À la différence du stockage temporaire du gaz naturel dans des réservoirs souterrains (PMG), l'injection du CO₂ dans des couches géologiques profondes suscite de nouveaux défis. Ils portent sur le temps de stockage (compté en centaines ou milliers d'années), sur le volume du gaz stocké, le cadre légal, la sécurité, l'acceptation par le corps social, etc.

Dans quelles structures le CO₂ peut-il être stocké sous terre ?

Il est question ici de l'injection de CO₂ dans des aquifères salins profonds, dans des gisements de pétrole et de gaz naturel en exploitation ou épuisés, dans des couches de charbon profondes (fig. 4) (Tarkowski & Uliasz-Misiak, 2003).

Les aquifères salins profonds, formés de roches sédimentaires, poreuses et perméables, conviennent très bien au stockage souterrain du CO₂. On les trouve généralement dans les grands bassins sédimentaires. À la différence des gisements d'hydrocarbures, leur taux d'identification est très varié et généralement moindre. Le volume pouvant être stocké dans les aquifères, bien plus grand que dans les gisements de pétrole et de gaz naturel, suscite beaucoup d'intérêt par rapport à ces sites. Cette option demande néanmoins d'autres études et de nouvelles expérimentations.

Les gisements d'hydrocarbures (gisements de gaz naturel ou de pétrole, épuisés ou en exploitation) constituent de très bons sites pour séquestrer le CO₂. Ce sont des pièges naturels dans lesquels le pétrole et le gaz ont été emprisonnés pendant des millions d'années. Leur structure est très bien connue, leur étanchéité vérifiée par la nature elle-même. Dans ce cas, nous pouvons également utiliser les infrastructures déjà existantes servant à l'exploitation des hydrocarbures.

Les gisements de charbon profonds et non encore exploités. Le dioxyde de carbone peut être injecté dans des veines de charbon profondes, non exploitées, où aura lieu son adsorption le fixant de façon permanente dans la matrice du charbon. Dans le cas d'injection dans des gisements du charbon contenant du méthane, le dioxyde de carbone viendra le remplacer. Cette méthode d'obtention du méthane - ECBM (*Enhanced Coal Bed Methane* - récupération assistée du méthane de couches de charbon) par injection du CO₂, constitue une des méthodes de séquestration du dioxyde de carbone.

Quelle quantité de CO₂ peut-être enfouie sous terre ?

Un des critères de base décidant de l'utilité d'une formation géologique pour le stockage souterrain du CO₂ est sa capacité de stockage, et dans le cas d'une structure géologique donnée prévue pour le stockage, sa contenance. La capacité d'un site de stockage souterrain dépend de plusieurs facteurs. Elle est plus facile à déterminer pour les gisements d'hydrocarbures épuisés et bien plus difficile à faire pour les aquifères. Les estimations quant aux capacités mondiales de stockage de CO₂, faites par différents auteurs et différentes institutions pour différents types de réservoirs donnent les grandeurs suivantes : 126-1800 Gt pour les gisements de pétrole, 500-1800 Gt pour les gisements de gaz naturel, 150-267 Gt pour ECBM, 200-4000 Gt pour les aquifères. La contenance d'une structure donnée prévue pour le stockage souterrain du CO₂ devrait se situer aux environs de cent millions de tonnes ou plus (Hendrisk et alli, 2004 ; IPCC, 2005).

Quels sont les coûts de la séquestration géologique du CO₂ ?

Le coût de la séquestration géologique du CO₂ dépend de nombreux facteurs : quantité de gaz stocké, frais de piégeage, de transport, de compression et d'injection, distance de la source d'émission du site de stockage, localisation de ce

dernier (sur terre ou sous les fonds océaniques), coût du forage, quantité et absorptivité du bassin, infrastructure, etc. Des trois étapes de géoséquestration du CO₂ : captage, transport et stockage (voir fig. 2), c'est la première qui demande le plus d'investissements en capital. Les estimations quant aux coûts de neutralisation du dioxyde de carbone divergent selon les auteurs. Les coûts de transport et de stockage sous terre ne sont pas très élevés en comparaison avec les coûts d'émission des gaz d'échappement ou des gaz industriels. Les estimations quant aux coûts de la séquestration souterraine du CO₂, faites par TNO-ECOFYS en 2004, indiquent que les coûts de captage s'élèvent à 26-45 €/tCO₂, de compression à 6-10 €/tCO₂, de transport par pipeline à 1-6 €/tCO₂; les coûts de stockage en fonction de la profondeur à laquelle se trouve le réservoir se situent entre 1 et 7 €/tCO₂ (Hendriks et alli, 2004).

Les coûts élevés de captage du CO₂ sont aujourd'hui le principal obstacle dans l'introduction de la technique de stockage souterrain du dioxyde de carbone. La réduction des coûts devrait intervenir surtout en ce qui concerne le captage et la séparation du CO₂ des gaz d'échappement ou des gaz industriels. La diminution des coûts de captage au-dessous de 30 €/tCO₂ accélérera de façon significative la généralisation de la séquestration du dioxyde de carbone anthropogénique. L'introduction de la commercialisation des émissions du CO₂ dans les pays de l'UE joue un rôle important ici.

Y a-t-il un cadre légal pour le stockage souterrain du CO₂ ?

Actuellement, il n'existe pas de réglementation internationale, européenne ou nationale qui traiterait de tous les aspects, ou du moins de la plupart des aspects du stockage souterrain de dioxyde de carbone. L'acceptation du stockage souterrain du dioxyde de carbone, afin de prévenir les changements climatiques, exige que la communauté internationale établisse un nouveau cadre légal et fasse appel au cadre légal déjà existant qui régit le stockage souterrain des gaz. Une réglementation efficace est indispensable afin d'assurer aux futurs investisseurs un sentiment de confort permettant de mener les opérations de captage, de transport et de stockage souterrain du CO₂ de façon sécurisée et efficace. Les standards et les normes légales devraient être développés en s'appuyant sur les

expériences de l'industrie pétrolière, ce qui devrait assurer que les procédures élaborées soient aussi pratiques que profitables.

Le stockage du CO₂ comporte-t-il des risques ?

Le stockage souterrain du dioxyde de carbone peut constituer une menace pour les hommes et l'environnement. Un danger, sous la forme d'une grosse fuite de gaz, peut apparaître lors du transport par pipeline jusqu'aux sites de stockage souterrain ou en cas de fuite des gaz du site de stockage.

Les menaces pour les hommes et l'environnement, dues au stockage souterrain du dioxyde de carbone, doivent être réduites au minimum grâce à une mise au point adaptée et au suivi de toutes les étapes du processus. Le suivi du stockage souterrain du CO₂ constitue la base de la réussite de toute l'opération. Son but principal est la vérification de la localisation sous terre, le contrôle d'étanchéité des trous lors de l'injection et une fois l'injection terminée, la vérification de la quantité de dioxyde de carbone injectée sous terre et le contrôle des paramètres d'injection.

Qui peut être intéressé par le stockage souterrain du CO₂ ?

Le stockage souterrain du dioxyde de carbone se trouve au croisement de plusieurs domaines scientifiques et suscite l'intérêt des hommes politiques : il s'agit de déterminer la taxe carbone et d'appliquer une réglementation internationale s'appliquant aux quantités d'émission, aux établissements industriels confrontés au problème de la limitation des niveaux d'émission, aux investisseurs potentiels à la recherche de nouveaux marchés, aux sociétés pétrolières utilisant l'injection pour intensifier l'exploitation du pétrole ou souhaitant mettre à disposition leurs gisements épuisés pour y stocker ce gaz, aux représentants de différentes sciences : géologues, ingénieurs spécialistes de gisements, miniers, chimistes, etc.

Où stocke-t-on le CO₂ sous terre dans le monde ?

Il y a de nombreuses installations scientifiques d'injection souterraine du CO₂ à travers le monde (fig. 5). Depuis les années 70 du XX^e siècle, plusieurs dizaines d'installations d'injection du CO₂ sous terre fonctionnent en Amérique du

Nord, en vue de rentabiliser l'exploitation du pétrole (CO₂-EOR). En Norvège, dans la mer du Nord, fonctionne la première installation industrielle d'injection du CO₂ (Sleipner). En mai dernier, une nouvelle installation, Snøhvit, a été ouverte dans la mer de Barents. Dans ces deux derniers exemples, le but de l'injection est purement écologique : il s'agit d'éviter les émissions CO₂ dans l'atmosphère (IPCC, 2005 ; Storing ... 2007).

Projet Sleipner

Dès 1996, 1 Mt de CO₂ par an provenant du gisement de gaz naturel Sleipner West est injecté par la société Statoil dans la formation Utsira, aquifère salin à environ 1000 m sous le fond de la mer du Nord. Le dioxyde de carbone est un ingrédient du gaz naturel exploité et qui doit être séparé avant la vente du gaz. Ce processus s'effectue sur une plateforme spéciale avant de transporter le gaz par pipeline à terre. Après la séparation, le CO₂ est comprimé, on enlève toute trace d'humidité et le gaz est injecté dans la formation Utsira. L'installation Sleipner confirme la possibilité de stockage du CO₂ dans les aquifères profonds.

Projet Weyburn

L'entreprise PanCanadian Resources a utilisé la technique CO₂-EOR sur le champ pétrolifère à Weyburn, au Canada. Le but était d'allonger le temps d'exploitation du gisement d'une vingtaine d'années et de garantir une extraction supplémentaire de 122 millions de barils de pétrole. Le dioxyde de carbone est transporté par un pipeline transfrontalier (d'une longueur de 325 km) depuis l'usine à Beulah (USA, Dakota du Nord) jusqu'au champ pétrolifère de Weyburn. 5000 tonnes de CO₂ sont injectées quotidiennement dans le gisement. On considère que, de cette façon, environ 20 millions de tonnes de CO₂ seront emprisonnées dans le gisement. À Weyburn, en plus de l'activité d'exploitation du gisement, on mène également des recherches sur les processus géologiques et géochimiques influant sur le stockage du CO₂ dans les couches géologiques.

Y a-t-il des recherches sur le stockage souterrain du CO₂ en Pologne ?

En Haute-Silésie, dans le cadre du Projet RECOPOL (*REduction of CO₂ storage in coal seams in the Silesian COal Basin in POLand* - Réduction des émissions de CO₂ grâce au stockage dans des gisements de charbon du bassin

houiller de Silésie en Pologne), l'Institut des Mines de Katowice (Główny Instytut Górnictwa - GIG) a construit une installation expérimentale d'injection du CO₂ dans des veines de charbon. Le but principal de ce projet, réalisé dans le cadre du 5^e PC de l'UE, était d'estimer les possibilités de réduction des émissions des gaz à effet de serre grâce à la séquestration du CO₂ dans des couches de charbon et la possibilité de stockage de CO₂ avec, en même temps, une exploitation du méthane contenu dans les couches profondes de charbon, non encore exploitées. L'installation pilote se trouve à Kaniów et se compose de deux trous de production et d'un trou d'injection. En août 2004, on a commencé à injecter du CO₂ et l'expérience a duré jusqu'au juin 2005. La quantité totale de CO₂ injectée était d'environ 1000 tonnes. L'injection a été couronnée de succès de l'équipe polonaise du GIG, sous la direction du professeur P. Krzystolik.

Séquestration géologique du CO₂ : mythe ou réalité ?

Les résultats de nombreux projets scientifiques et les premières installations en fonctionnement indiquent que la séquestration géologique du CO₂ a un avenir et que la possibilité de stockage souterrain du CO₂ peut devenir un instrument efficace dans la lutte contre le réchauffement climatique. La séquestration géologique du CO₂ pose néanmoins de nouveaux défis et oblige à résoudre de nombreux problèmes. La période de stockage du CO₂ s'étend sur quelques centaines d'années, voire plus avec d'énormes quantités de gaz à neutraliser. Il est nécessaire de mettre au point des technologies de séparation du CO₂ des gaz d'échappement ou des gaz industriels moins coûteuses, de déterminer les influences physico-chimiques réciproques du CO₂ avec les roches, d'établir les méthodes de suivi et de contrôle, de régler les aspects légaux du stockage souterrain, etc. L'intérêt porté à la problématique de la séquestration géologique du CO₂ ainsi qu'à celle de la commercialisation des émissions de CO₂ laisse espérer une solution rapide. La modification du montant des taxes, les pénalités pour dépassement des émissions de CO₂, le commerce des émissions, l'augmentation de l'utilisation du CO₂ pour l'intensification de l'exploitation du pétrole, des technologies nouvelles et moins chères pour la séparation du CO₂ des gaz d'échappement et des gaz industriels ou autres, vont permettre de transformer, dans un avenir proche, le stockage souterrain du CO₂ en une opération rentable du

point de vue économique. En raison de leur expérience et des coûts élevés des investissements, les entreprises pétrolières auront à jouer dans ce domaine le premier rôle.

Bibliographie

HENDRIKS C., GRAUS W. & VAN BERGEN F. 2004 - Global carbon dioxide storage potential and costs. Ecofys and TNO.EEP-02001 2004 : 59.

IPCC 2005 - IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (red.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA : 442.

Podziemne składowanie CO₂ w Polsce w głębokich strukturach geologicznych (ropo-, gazo- i wodonośnych) (Stockage souterrain du CO₂ en Pologne dans de structures géologiques profondes (pétrolières, gazières et aquifères)) 2005 - Tarkowski R. (red.), Éd. IGSMiE PAN Kraków : 174.

Storing CO₂ underground 2007 IEA Greenhouse Gas R&D Programme. <http://www.ieagreen.org.uk/>:17.

TARKOWSKI R. 2005 - Geologiczna sekwestracja CO₂. (Séquestration géologique du CO₂). Studia, Rozprawy, Monografie, 132 : 106.

TARKOWSKI R. & ULIASZ-MISIAK B. 2003 - Podziemne magazynowanie dwutlenku węgla (Stockage souterrain du dioxyde de carbone). Przegląd Geologiczny, 5 : 402-409.

ULIASZ-BOCHEŃCZYK A., MAZURKIEWICZ M., MOKRZYCKI E. & PIOTROWSKI Z. 2004 - Utylizacja dwutlenku węgla poprzez mineralną karbonatyzację (Recyclage du dioxyde de carbone par la carbonisation minérale). Polityka Energetyczna, T.7/zeszyt specjalny : 541-554.

Liste des schémas :

Fig. 1. Prévisions quant à l'influence globale du CCS sur la quantité des émissions du CO₂ selon les modèles MESSAGE et MiniCAM (IPCC, 2005).

Fig. 2. Schéma de la séquestration du dioxyde de carbone.

Fig. 3. Méthodes de captage du CO₂ dans les centrales au gaz : a) en précombustion, b) pendant la combustion c) en postcombustion (selon : Storing..., 2007).

Fig. 4. Option de stockage géologique du dioxyde de carbone : a) stockage dans des aquifères, b) stockage avec intensification d'exploitation du pétrole, c) stockage dans des gisements d'hydrocarbures épuisés, d) stockage avec exploitation du méthane.

Fig. 5. Localisation des installations de stockage du CO₂, existantes et proposées, (selon IPCC 2005 avec des modifications).