

Captage et stockage du CO₂ : aperçu général sur la R&D et les acteurs

La Rédaction¹.

Généralités

Captage et stockage (à long terme) du CO₂ sont aujourd'hui des termes couramment utilisés remplaçant celui de séquestration, réservé au piégeage de CO₂ par la biomasse. Au niveau international, les termes « *CO₂ Capture and Storage Technology* » (*CCS Technology*) et surtout CCS tout simplement (*CSC en français*), sont couramment employés.

Selon les chiffres de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE)², les émissions de CO₂ par combustible ont doublé entre 1973 et 2007, passant de 15 640 Mt en 1973 à 28 962 Mt en 2007. La comparaison par source entre les deux années est donnée dans le tableau 1.

Comme le précisent les chiffres proposés en 2005 (ADEME, BRGM, IFP, 2005), les **émissions mondiales** de CO₂ liées aux activités humaines représentent 30 Gt/an, soit 8,1 Gt C, dont 80% proviennent de la combustion d'énergies fossiles et 20% de la déforestation et des pratiques agricoles. Les océans en reprennent 2,5 Gt et la végétation 2 Gt. Il reste donc un surplus annuel de 3,5 Gt C qui vient s'accumuler dans l'atmosphère. La combustion des énergies fossiles se répartit principalement entre production d'énergie (39%), industrie (22%), transports (23%) et résidentiel (10%). Les deux premiers secteurs correspondent à des émissions centralisées, les deux derniers à des émissions diffuses. Selon les chiffres du GIEC (2005), il y aurait, à l'échelle mondiale, près de 5 000 sites de production énergétique (émettant plus de 0,1 Mt CO₂ par an), environ 1 000 cimenteries, 800 raffineries, 650 installations sidérurgiques et 380 installations pétrochimiques.

Depuis 1980 (chiffres de l'Équipement), la **France** a réduit ses émissions de près de 100 Mt de CO₂ passant de 470 Mt en 1980 à 372 en 2008. La plupart des branches d'activité (industrie et agriculture, centrales électriques, résidentiel et tertiaire) ont réduit leurs émissions, sauf

les transports qui sont passés de 95 à 142 Mt, un chiffre stable depuis 2000. Pour l'année 2008, les transports représentaient 38% des émissions, le résidentiel et le tertiaire 26%, l'industrie et l'agriculture 21,5%, les centrales électriques 9%, les autres 5,5%.

La diminution de ces chiffres passe par la réduction à la source des émissions et par le piégeage du CO₂ émis. Nous présentons ci-dessous quelques commentaires sur les diverses voies de piégeage étudiées, dont les deux principales sont la séquestration dans la biomasse à partir du CO₂ atmosphérique (boisement, reboisement, agriculture...) et le captage - stockage de CO₂ à partir de sources industrielles.

Dans la **séquestration dans la biomasse**, l'objectif recherché est l'augmentation de la biomasse et, par voie de conséquence, l'augmentation du CO₂ séquestré. On peut citer, par exemple, le projet « Puits de carbone - Peugeot », qui porte sur une plantation de 5 000 ha au nord du Mato Grosso (Brésil) et est géré selon un partenariat entre l'ONF³ et l'*Instituto Pro Natura*, une ONG brésilienne. Ce thème porte plusieurs dizaines de projets soutenus notamment sous le label LULUCF (*Land-use, Land-use change and Forestry*) tel que défini à la Convention climat (1992), dans lesquels les actions de conservation prédominent par rapport aux actions de séquestration.

En ce qui concerne le stockage de CO₂, l'**injection en milieu marin profond** a donné lieu à divers travaux au cours de la période 1997-2002, en particulier dans le Pacifique et dans les fjords norvégiens. Ils se poursuivent au niveau du Japon. Ce type de stockage reste très mal cerné, pose des problèmes de droit international et se heurte à l'opposition résolue des ONG. La stabilisation en carbonates et la biofixation en sont toujours au stade expérimental et il faut signaler l'existence du projet européen CO₂SOLSTOCK (2009-2012, 7^{ème} PCRD) qui porte sur les processus bactériens susceptibles de carbonater le CO₂. Un pilote a été envisagé dans les années 2006 par une équipe américaine soutenue par le DOE⁴. Ces deux voies de recherche, ne sont pas dans les premières priorités actuelles.

C'est sur le stockage profond en formations géologiques que l'accent est mis aujourd'hui : champs d'hydrocarbures déplétés dans une optique de récupération assistée d'hydrocarbures, puis de stockage définitif, aquifères salins profonds et, dans une moindre mesure, injection en veines de charbon (Fig. 1). Rappelons que la filière CCS regroupe trois composantes : le captage, le

Source	1973 (en %)	2007 (en %)
Pétrole	50,6	37,6
Charbon, tourbe	34,9	42,2
Gaz	14,4	19,8
Déchets industriels et municipaux non renouvelables	0,1	0,4

Tableau 1. Émissions de CO₂ par combustible (extrait de : AIE, Key Statistics 2009).

1. Remerciements à Isabelle Czernichowski-Lauriol (BRGM) pour son aide dans l'élaboration de cet article.

2. Key Statistics 2009.

3. Office National des Forêts.

4. Department of Energy US.

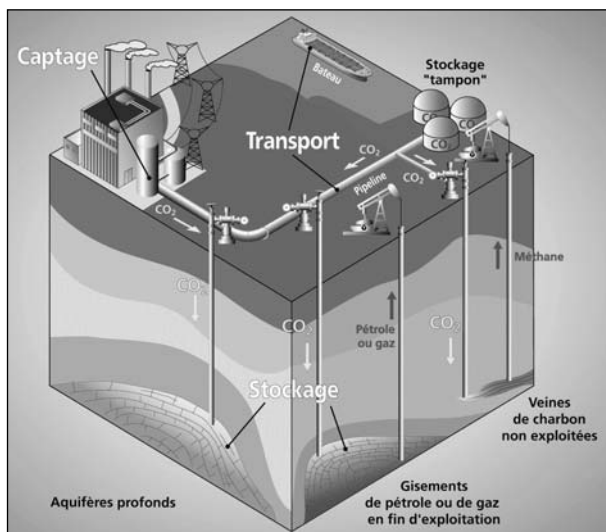


Figure 1. Schéma général de la filière CCS (source : *Capter et stocker le CO₂ dans le sous-sol*. IFP, ADEME, BRGM. Collection BRGM Les enjeux des géosciences, 2007).

transport et le stockage en profondeur.

Aperçu sur la R&D en matière de stockage géologique de CO₂

Acteurs

Cette R&D est extrêmement foisonnante dans la multiplicité des thèmes traités, le nombre de pays impliqués, la diversité des acteurs scientifiques et industriels et l'ampleur quantitative de la recherche qui n'a cessé de se développer depuis les années 1990. En **France**, ces partenaires se retrouvent dans le club CO₂⁵, créé en 2002 à l'initiative de l'ADEME⁶ et avec l'appui du BRGM et de l'IFP Énergies nouvelles. Les membres du club comprennent :

- des organismes de recherche : BRGM, CNRS (INSU), Mines Paris Tech, IFP Énergies nouvelles, INERIS⁷, IPGP⁸ ;
- des industriels : Air Liquide, Alstom, ArcelorMittal, EDF, GDF SUEZ, Lafarge, Oxand, Poweo, Rhodia, Saipem, SARP Industries, SNET (Groupe E.ON France), Sofregaz, Soufflet, Total ;
- des bureaux d'études, d'ingénierie et de services : Bureau Veritas, Geogreen, Setaram Instrumentation, Schlumberger, Technip ;
- une collectivité : Port autonome de Marseille ;
- une agence d'appui aux politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable : ADEME.

En **Europe**, le réseau d'excellence CO₂GeoNet regroupe 13 partenaires et intervient comme référence européenne (voir article, ce numéro). À l'**échelle mondiale**, il

existe des organismes de recherche dans de très nombreux pays, notamment aux États-Unis qui, s'ils n'ont pas signé le protocole de Kyoto, n'en mènent pas moins des recherches très actives en matière de CSC. Établir la liste de ces projets étrangers dépasserait largement le cadre de cet article. Pour donner un indicateur à valeur mondiale, le tableau 2, adapté de la carte et du tableau annexe établis pour le colloque de 2009 organisé conjointement par l'IFP, l'Ademe et le BRGM à la Cité des Sciences et de l'Industrie à Paris, se limite à présenter une liste de projets pilotes ou industriels, en cours ou annoncés, par pays, qu'il s'agisse de captage, de stockage ou d'une approche intégrée.

Il faut aussi noter l'existence du Global CCS Institute¹⁰, créé en juin 2009 et dont le rôle central est d'accélérer le développement commercial des projets de CSC, en s'assurant de leur contribution effective à la réduction des émissions de CO₂. L'Institut rassemble aujourd'hui 226 membres issus de nombreux pays, principalement des industriels et des gouvernements.

Aperçu général sur les projets de recherche

Avant d'aborder les projets européens, on peut

Pays	Nombre de sites	Intervalle de temps entre dates de démarrage
Allemagne	8	2008-2015
Australie	12	2008-2015
Bulgarie	1	?
Canada	13	2005-2015
	Dont Weyburn	2000
Chine	2	2008-2011
Émirats Arabes Unis	1	2014
Espagne	4	2009-2016
États-Unis	40	2008-2016
	Dont Salt Creek	2004
France ⁹	4	2009-2015
Inde	3	1988-2007
Italie	4	2009-2016
Japon	6	1991-2010
Norvège	8	1996-2015
	Dont Sleipner	1996
Pays-Bas	8	2010-2016
	Dont K 12-B	2004
Pologne	3	2014-2016
Royaume-Uni	10	2009-2016
Suède	1	2014
TOTAL	128 sites	

Tableau 2. Nombre de projets pilotes ou industriels de captage et stockage du CO₂ dans le monde, par pays, opérationnels ou annoncés à la date de septembre 2009 (source : carte et tableau annexe établis pour le colloque CO₂ de 2009 à la Cité des Sciences et de l'Industrie).

5. Site Internet : www.clubco2.net

6. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie.

7. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques.

8. Institut de Physique du Globe de Paris.

9. Dont le projet de Lacq et 2 projets (Florange et Le Havre) qui ont l'appui de l'Ademe au titre du Fonds démonstrateur de recherche. Le projet de Claye-Souilly, indiqué sur la carte établie pour le colloque CCS de 2009, a été abandonné depuis.

10. Carbon Capture and Storage.

d'abord évoquer les projets nationaux français soutenus par l'ANR¹¹. Celle-ci, créée le 7 février 2005 sous forme de groupement d'intérêt public (GIP) et devenue établissement public à caractère administratif (EPA) au 1^{er} janvier 2007¹², est une agence de financement de projets de recherche. Dans le domaine du CSC et comme l'indique le tableau 3, l'agence a financé 33 projets depuis 2005 dans le cadre de son programme « Captage et Stockage de CO₂ », principalement sur les thèmes du captage (12) et du stockage (18). Un seul projet a été financé dans chacun des domaines

du transport, de l'analyse de risque et de la socio-économie et acceptabilité. Plusieurs de ces projets sont présentés dans divers articles de ce numéro.

Depuis plus de 15 ans, dans le cadre de ses Programmes communs de recherche et développement (PCRD), l'Union européenne soutient des recherches sur divers thèmes de la filière CSC, dont une présentation synthétique par projet est donnée dans le tableau 4.

Acronyme (Coordonnateur)	Sujet	Durée
Thème : captage		
CAPCO ₂ (IFP)	Capture du CO ₂ en post-combustion	12/2005 – 11/2008
CLCMAT (IFP)	Matériaux pour le procédé de « Chemical Looping Combustion »	12/2005 – 11/2008
CO ₂ SUBLIM (ARMINES)	Capture par antisublimation de fumées enrichies en CO ₂	12/2005 – 2/2008
CICADI (LSGC Nancy)	Contacteur innovant pour la capture du CO ₂	12/2006 – 6/2010
GASCOGNE (IFP)	Garnissage structuré en composite carbone/carbone pour le captage de CO ₂ par lavage aux amines	12/2006 – 11/2009
IMCAT (Air Liquide)	Innovative materials for CO ₂ capture by adsorption technology	12/2006 – 12/2009
NOMAC (Institut Lavoisier, Univ. Versailles)	Nouveaux matériaux pour la capture du CO ₂	12/2006 – 11/2010
TACOMA (GDF Suez)	Mise en œuvre de techniques avancées de combustion pour minimiser les rejets atmosphériques	12/2006 – 11/2009
MECAFI (TREDI)	Procédés membranaires pour la capture post-combustion du CO ₂ des fumées d'incinération	12/2007 – 11/2010
OXYBAC (Air Liquide)	Production d'oxygène à basse consommation d'énergie dédiée à l'oxycombustion	12/2007 – 11/2010
SECOHYA (ARMINES – EMS)	Separation of CO ₂ by gas hydrate crystallization	12/2007 – 11/2010
ACACIA 31 (IFP)	Captage du CO ₂ par adsorption	12/2008 – 11/2011
Thème : transport		
TRANSCO ₂ (IFP)	Transport de CO ₂ à des fins de stockage géologique	12/2005 – 3/2008
Thème : stockage		
GÉOCARBONE – CARBONATION (IPGP, LMTG)	(Bio) minéralisation du carbone : de la caractérisation expérimentale à la modélisation	12/2005 – 8/2008
GÉOCARBONE – INJECTIVITÉ (IFP)	Maîtrise de l'injectivité du CO ₂ dans les stockages géologiques	1/2006 – 5/2008
GÉOCARBONE – INTEGRITÉ (IFP)	Évaluation de l'intégrité des couvertures et des puits pour le stockage géologique du CO ₂	1/2006 – 12/2008
GÉOCARBONE – MONITORING (BRGM)	Surveillance et monitoring du stockage géologique du CO ₂	12/2005 – 5/2008
GÉOCARBONE – PICOREF (IFP)	Pilote pour l'injection de CO ₂ dans les réservoirs géologiques en France	12/2005 – 3/2008
CHARCO (BRGM)	Expérimentation et modélisation de l'échange de gaz dans les charbons en vue d'un stockage du CO ₂	12/2006 – 12/2010
GAZ ANNEXES (INPL)	Rôle des gaz annexes sur l'injection du CO ₂ : simulation des propriétés thermodynamiques des mélanges eau-gaz-sels en conditions du stockage géologique	12/2006 – 11/2010
HÉTÉROGÉNÉITÉS CO ₂ (BRGM)	Évaluation des incidences des hétérogénéités physiques et minéralogiques sur les processus physico-chimiques associés au stockage du CO ₂ dans une formation aquifère	12/2006 – 11/2010
PUITS CO ₂ (IFP)	Technologies et matériaux pour les puits	12/2006 – 11/2009
PROCHEPUITS (BRGM)	Comportement du puits et du proche puits lors de l'injection de CO ₂	12/2007 – 11/2010
SENTINELLE (INPL)	Monitoring de surface de sites de stockage de CO ₂ : bilan des flux et traçage des sources sur les compartiments superficiels - couverture supérieure, sol, biosphère et proche atmosphère	12/2007 – 12/2011

11. Agence Nationale de la Recherche.
12. Décret 2006-963 du 1^{er} août 2006.

Acronyme (Coordonnateur)	Sujet	Durée
EMSAPCO ₂ (CGGVERITAS Services)	Développement des méthodes EM et sismique active et passive pour la surveillance des réservoirs de stockage du CO ₂	12/2007 - 11/2009
HPPP-CO ₂ (GSRC, Univ. Provence)	High pulse poroelasticity for geophysical monitoring of CO ₂ injection in reservoirs	12/2007 - 12/2011
CO ₂ -FIX (LMTG, IPGP)	Biominéralisation du CO ₂ <i>in situ</i> en contexte basique et ultrabasique	12/2008 - 11/2011
CARMEX (BRGM)	Carbonatation minérale <i>ex situ</i> de résidus miniers	1/2009 - 12/2011
CO-LINER Géosciences Montpellier)	Intégrité des couvertures endommagées	1/2009 - 12/2011
INTERFACE (BRGM)	Comportement thermo-hydro-mécano-chimique de l'interface entre les cimentations de puits d'injection et la formation de couverture en présence de CO ₂ et de gaz annexes	1/2009 - 12/2011
OPTIQUE CO ₂ (Équipe verres et céramiques, Rennes 1)	Capteurs IR à fibres optiques innovantes appliquées au monitoring du stockage géologique du CO ₂	12/2008 - 12/2011
Thème : analyse de risque		
CRISCO ₂ (BRGM)	Critères de sécurité pour le stockage du CO ₂ : approche qualitative / quantitative de scénarios de risque	12/2006 - 2/2010
Thème : socio-économie et acceptabilité		
SOCECO ₂ (CNRS)	Économie et sociologie de la filière capture et stockage géologique du CO ₂	12/2006 - 5/2009

Tableau 3. Projets ANR du programme « Captage et Stockage de CO₂ » (compilation à partir du site Internet de l'ANR : www-anr-CO2.cea.fr).

Programmes et projets	Commentaires
3^{ème} et 4^{ème} PCRD	
Joule II (3 ^{ème} PCRD) « The underground disposal of carbon dioxide »	1993-1995. A conclu à la faisabilité du concept de stockage géologique du CO ₂ .
SACS (Saline Aquifers CO ₂ Storage) Phase 1 (4 ^{ème} PCRD) Site : www.iku.sintef.no/projects	1998-1999. Stockage de CO ₂ dans un aquifère salin situé au-dessus du champ de gaz de Sleipner (mer du Nord, Norvège).
5^{ème} PCRD	
SACS Phase 2 (cf. ci-dessus)	2000-2002.
CO ₂ STORE	2003-2006. Suite de SACS à Sleipner et sur 4 autres sites (2 <i>offshore</i> et 2 <i>onshore</i>) situés au Danemark, au pays-de-Galles, en Norvège et en Allemagne.
GESTCO (European potential for geological storage of CO ₂ from combustion and fossil fuel) Site : www.nitg.tno.nl/projects	2000-2003. 8 pays participants au projet (Allemagne, Belgique, Danemark, France, Grèce, Pays-Bas, Norvège, Royaume-Uni). Potentiel et faisabilité technico-économique du stockage du CO ₂ dans des aquifères profonds, des gisements d'hydrocarbures sur le déclin ou des veines de charbon profondes : émissions et capacités de stockage dans les pays européens ; études de 17 cas (Dogger du bassin de Paris, réservoirs dans la Craie au Danemark, anciennes mines de sel en Allemagne...).
NASCENT (Natural analogues for CO ₂ storage in Europe). Site : www.bgs.ac.uk/nascent	2001-2003. Évaluation des accumulations naturelles de CO ₂ dans le sous-sol. Étude du gisement carbo-gazeux de Montmiral (Drôme), l'un des huit gisements de ce type répertoriés en France.
WEYBURN Site : www.ieagreen.org.uk/weyburn	2001-2004. Projet européen associé au projet international IEA Weyburn (Saskatchewan) sous l'égide de l'AIE. Utilisation de CO ₂ issu de la gazéification du charbon comme fluide de récupération assistée de pétrole.
RECOPOL	2002-2005. Essai pilote d'injection de CO ₂ dans une veine de charbon en Pologne avec récupération de méthane.
CO ₂ NET et CO ₂ NET2. Site : www.co2net.com	2001-2002 et 2003-2005. Réseau technologique européen sur la capture et le stockage géologique de CO ₂ . Échanges d'expériences et de bonnes pratiques.
6^{ème} PCRD	
CO ₂ GeoNet (Geological storage of CO ₂ . European network of excellence). Site : www.co2geonet.com	2004-2009. Réseau d'excellence européen sur le stockage géologique de CO ₂ . Intégration des équipes de recherche de 13 organismes européens. Statut d'Association depuis 2009.

Programmes et projets	Commentaires
ENCAP (Enhanced capture of CO ₂). Site : www.encapCO2.org	2004-2008. Développement de technologies de captage par précombustion et oxycombustion du CO ₂ issu de centrales thermiques.
CASTOR (CO ₂ from capture to storage). Site : www.CO2-castor.com	2004-2008. Partenaires : 30 industriels et 12 institutions de recherche issus de 11 pays de l'UE. Réduction du coût de captage postcombustion du CO ₂ et validation du concept de stockage sur quatre sites : champ pétrolier Casablanca de Repsol en mer Méditerranée (Espagne), champ de gaz K12B de GDF en mer du Nord (Pays-Bas), champ de gaz Atzbach-Schwanenstadt de Rohoel en Autriche, aquifère en mer du Nord au dessous du champ de gaz de Snohvit opéré par Statoil (Norvège). Pilote industriel de captage sur site de la centrale Esbjerg (Danemark) inauguré en mars 2006.
InCa-CO ₂ (International co-operation actions on CO ₂ capture and storage).	2004-2007. Action de support spécifique pour positionner, sur le plan international, le savoir-faire européen dans le domaine du captage et du stockage du CO ₂ .
ULCOS (Ultra-low CO ₂ steelmaking).	2004-2009. Réduction des émissions de CO ₂ dans le secteur de la sidérurgie.
EU GeoCapacity (Assessing European capacity for geological storage of carbon dioxide). Site : www.geology.cz/geocapacity	2006-2008. 26 partenaires et 7 thèmes de recherche : inventaire des émissions (> 0,1 Mt CO ₂) et SIG, capacités de stockage, usages économiques du CO ₂ , standards et critères de sélection des sites, évaluations économiques, coopération internationale et gestion du projet, reporting.
CO ₂ ReMoVe (CO ₂ geological storage : Research into monitoring and verification technology). Site : www.co2remove.eu	2006-2011. 27 partenaires de la recherche, de l'industrie et des services. Vérification et surveillance des stockages géologiques de CO ₂ . Application notamment aux sites de Sleipner et Snohvit (Norvège), In-Salah (Algérie) et Ketzin (Allemagne).
DECARBIT (Decarbonise it). Site : www.decarbit.com	2008-2011. Développement des technologies précombustion pour réduire les émissions de GES des centrales.
CESAR (CO ₂ Enhanced separation and recovery). Site : www.co2cesar.eu	2008-2011. Développement des technologies postcombustion.
CLEO (Carbon lean energy operations)	2008-2010. Complément au projet CESAR
COACH (Cooperation action within CCS China). Site : www.co2-coach.com	Projet de coopération entre la Chine (8 partenaires) et l'UE (12 partenaires) portant sur les développements possibles à partir d'une centrale à charbon : gazéification du charbon, stockage de CO ₂ , acceptabilité sociétale.
7^{ème} PCRD	
STRACO ₂ (Support to regulatory activities for carbon capture and storage). Sites : www.euchina-ccs.org et http://cordis.europa.eu	2008-2009. Développement d'un cadre réglementaire pour le CSC dans l'Union européenne. Projet faisant partie de la coopération avec la Chine sur le thème du changement climatique.
ECCO (European value chain for CO ₂). Site : http://cordis.europa.eu	2008-2011. Fournir aux industriels et aux pouvoirs publics un outil robuste de décision basé sur la valorisation économique de la filière CSC.
CO ₂ PIPEHAZ (Quantitative failure consequence hazard assessment for next generation CO ₂ pipelines). Site : http://cordis.europa.eu	2009-2011. Préviation des conséquences de fuites accidentelles de CO ₂ à partir de pipelines sous pression.
CO ₂ EUROPIPE (Towards a transport infrastructure for large-scale CCS in Europe). Sites : www.co2europipe.eu et http://cordis.europa.eu	2009-2011. Développement d'une infrastructure de transport et de stockage de CO ₂ en Europe.
NEARCO ₂ (New participation and communication strategies for neighbours of CO ₂ capture and storage operations). Site : http://cordis.europa.eu	2009-2011. Développement de stratégies effectives de communication sur les avantages et les risques associés à la filière CSC et d'implication des parties dans la prise de décision locale.
CO ₂ SOLSTOCK (Biobased geological CO ₂ storage). Site : http://cordis.europa.eu	2009-2012. Nouvelles technologies pour réduire les émissions de CO ₂ issues de la combustion de combustibles fossiles, en utilisant des processus bactériens pour la carbonatation du CO ₂ .
COMET (Integrated infrastructure for CO ₂ transport and storage in the west Mediterranean). Site : http://cordis.europa.eu	2010-2012. Faisabilité technico-économique d'une infrastructure intégrée de transport et de stockage de CO ₂ dans l'ouest de la Méditerranée pour les besoins conjoints de l'Espagne, du Portugal et du Maroc.
CACHET II (Carbon dioxide capture and hydrogen production with membranes). Site : http://cordis.europa.eu	2010-2012. Développement de membranes et modules métalliques pour une capacité élevée de production d'hydrogène et le captage du CO ₂ résiduel.

Programmes et projets	Commentaires
COCATE (Large scale CCS transportation infrastructure in Europe). Site : http://projects.ifp.fr	2010-2012. Conditions de transport des fumées pour un captage mutualisé, et transport du CO ₂ capté en grandes quantités vers des zones de stockage. Terrains d'expérimentation : région du Havre et Port de Rotterdam.
ICAP (Innovative CO ₂ capture). Site : http://cordis.europa.eu	2010-2013. Développement de technologies de rupture applicables pour le captage du CO ₂ en postcombustion.
RISCS (Research into impacts and safety in CO ₂ storage). Site : http://cordis.europa.eu	2010-2013. Développement des connaissances nécessaires aux opérateurs de site et aux autorités de contrôle pour pouvoir évaluer les impacts potentiels de fuites de CO ₂ sur les écosystèmes de surface et proche surface.
DEMOYS (Dense membranes for efficient oxygen and hydrogen separation). Site : http://cordis.europa.eu	2010-2014. Techniques de captage innovantes par membranes denses pour la séparation de O ₂ et H ₂ .

Tableau 4. Récapitulatif des principaux projets européens de R & D sur les thèmes du captage-transport-stockage du CO₂.

R&D sur les différentes étapes de la filière

Reprenons maintenant les trois étapes de la filière CCS : captage, transport, stockage.

Au niveau du **captage**, trois types de technologies sont distinguées :

- captage précombustion ou décarbonisation, dans laquelle le combustible est converti en gaz de synthèse, puis en CO₂ et hydrogène utilisé pour produire de l'énergie sans émission de CO₂ ;
- captage postcombustion, avec extraction du CO₂ des fumées par différents procédés : absorption en présence de solvants aminés, adsorption sur charbon activé, passage à travers des membranes spéciales, distillation cryogénique ;
- captage par oxycombustion, procédé dans lequel la combustion est réalisée avec de l'oxygène, pas de l'air, ce qui permet d'avoir des effluents gazeux plus concentrés en CO₂.

La postcombustion est actuellement la plus employée, mais les deux autres voies sont en développement. Sur le pilote de Lacq, c'est l'oxycombustion qui a été retenue. Les efforts de R & D actuels portent sur la mise au point des procédés et surtout la réduction des coûts (voir article ce numéro).

Même si la technique de **transport** de gaz naturel est bien maîtrisée (gazoduc, bateau), il reste des efforts importants de R&D à réaliser notamment en matière de terminaux de caroducs, de réseaux et de transport maritime de gros volumes de CO₂ (voir article ce numéro).

Le **stockage de CO₂ en couches géologiques** (Fig. 2) est un des gros volets de la R&D actuelle et celui qui évidemment concerne le plus les géologues. Il regroupe trois options :

- stockage en gisements d'hydrocarbures déplétés,
- stockage en aquifères salins profonds,
- stockage en couches de charbon profondes.

Des accumulations et migrations naturelles de CO₂ existent dans de nombreux pays, notamment aux États-Unis, en Australie et en Chine. En France, le gisement de Montmiral (bassin de Valence, Drôme), par exemple, a donné lieu à des études dans le cadre du programme Nascent (voir tableau 3) et ultérieurement dans le cadre d'une thèse (voir article ce numéro).

La récupération assistée d'hydrocarbures, par injection de CO₂, est pratiquée de longue date dans divers pays, notamment en Amérique du Nord. Le champ de Weyburn (Canada), projet majeur sur ce thème fait l'objet d'un article spécifique et le projet K12B (Pays-Bas) est évoqué dans l'article sur les enseignements liés au stockage de gaz naturel. D'après les chiffres du GIEC (2005), on prévoit de stocker 20 Mt à Weyburn (démarrage 2000) et 8 Mt à K12B (démarrage 2004).

L'opération d'injection en aquifère salin profond réalisée sur le site de Sleipner (Norvège), dont le CO₂ extrait du gaz naturel produit est réinjecté depuis 1996 dans un réservoir situé au-dessus du réservoir gazier, fait l'objet d'un autre article. Selon les chiffres du GIEC (2005), on prévoit

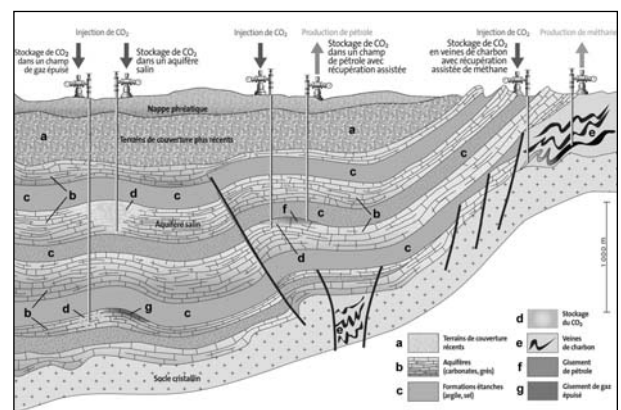


Figure 2. Les différents types du stockage géologique du CO₂ (source : Capter et stocker le CO₂ dans le sous-sol. IFP, ADEME, BRGM. Collection BRGM Les enjeux des géosciences, 2007).

un total injecté de 20 Mt de CO₂ à Sleipner (démarrage en 1996, injection de 1 Mt/an CO₂) et 17 Mt de CO₂ sur le site d'In Salah (Algérie), dans un aquifère salin jouxtant le gisement (injection depuis 2004, à raison de 1 Mt/an CO₂). Le projet de Snøhvit (Norvège) est de même nature (injection de 0,7 Mt/an CO₂ depuis 2007). Les capacités de stockage en aquifères profonds en Europe et dans le monde sont encore mal évaluées et les programmes de R&D se poursuivent, comme en témoigne par exemple le projet européen GeoCapacity (voir article ce numéro). Par ailleurs, la nécessité de stocker pour de longues durées (siècles à millénaires) impose aussi de mettre en place les dispositifs de surveillance adaptés et de concevoir les modèles prédictifs de stockage appropriés, toutes actions qui donnent au lieu à des études de R&D (voir articles, ce numéro).

Autre voie de stockage abordée, le stockage dans les veines de charbon profond avec pour corollaire le plus fréquent l'augmentation de la récupération de méthane. Ce thème se justifie d'autant que les ressources en charbon sont importantes dans de nombreux pays¹³. Néanmoins, le potentiel mondial de stockage dans les veines de charbon a été estimé à quelques dizaines de GtC (Herzog, 2001), en nette diminution par rapport à des évaluations antérieures (100-200 GtC). Plusieurs projets de R&D de l'ANR ou de l'UE sur ce sujet sont abordés dans ce numéro.

Conclusions

Le stockage du CO₂ en couches géologiques ne relève maintenant plus de la science fiction et les essais réalisés, en champs pétroliers (de longue date, récupération assistée de pétrole ou de gaz et stockage de CO₂), en aquifère (stockage de CO₂) ou en veines de charbon (récupération assistée de méthane et stockage de CO₂) ont déjà des années d'expérimentation à leur actif et, dans nombre de cas, des éléments de faisabilité économique. Par ailleurs, même si les chiffres sont approximatifs, le potentiel de stockage par ces différentes voies serait considérable, plusieurs siècles d'émission au rythme actuel. Selon les chiffres du GIEC (2005), à l'échelle mondiale le potentiel de stockage en formations géologiques s'élèverait au minimum à 2 000 Gt CO₂ (545 Gt C), sans doute beaucoup plus en prenant mieux en compte les aquifères profonds.

Beaucoup de chemin sera encore nécessaire avant de parvenir à généraliser le stockage géologique du CO₂, y compris au niveau politique car la multiplication de tels stockages relève d'un choix de société. En Europe, alors qu'on a envisagé de se focaliser sur le stockage dans les champs pétroliers et les aquifères de mer du Nord, il semblerait qu'on s'oriente vers des solutions de moins

grande ampleur mais largement distribuées sur le territoire européen. Dans cette logique, ce serait l'une ou l'autre des solutions envisageables qui serait adoptée, en fonction du contexte local.

Pour en savoir plus

Publications

- Ademe, Brgm, Ifp., 2005 : Réduire les émissions de gaz à effet de serre. La capture et le stockage géologique du CO₂. BRGM, Col. Les enjeux des géosciences, 44 p.
- Audibert N., 2003 : Limiter les émissions de CO₂ pour lutter contre le réchauffement climatique. Enjeux, prévention à la source et séquestration. Rapport BRGM/RP 52406 FR, 275 p. Téléchargeable sur le site BRGM : www.brgm.fr/domaines/sequestrCO2.htm
- Audibert N., 2004 : Du nouveau dans la séquestration du CO₂. Géochronique n°91, septembre, 30-32.
- Brown S., Sathaye J., Cannel M., Kauppi P., 1996 : Management of forests for mitigation of greenhouse gas emissions. In: R. T. Watson, M. C. Zinyowera et R. H. Moss, eds. Climate change 1995, impacts, adaptations and mitigation of climate change: scientific-technical analyses. Report of Working Group II, Assessment Report, IPCC, 773-797. Cambridge University Press.
- Coll., 2009 : 3^{ème} Colloque international IFP, ADEME, BRGM, 5-6 novembre 2009. Communications sur le site internet de l'IFP : www.colloqueco2.com/IFP/fr Les deux colloques précédents ont eu lieu en 2005 et 2007.
- Goldberg P., Chen Z. Y., O'Connor W., Walters R., Ziock H., 2001 : CO₂ mineral sequestration studies. In: US Proceedings of the First National Conference on Carbon sequestration. Site : www.netl.doe.gov/publications
- Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, IPCC en anglais) : rapports 1990, 1995, 2001 et 2007.
- Herzog H. J., 2001 : Workshop Overview. Proceedings of Workshop on Carbon Sequestration Science. May 22-24, 2001. Site : www.netl.doe.gov/publications
- Le Thiez, Rojey A., 2004 : La « séquestration » du CO₂ : une vue générale. Pétrole et Techniques, n°449, mars-avril, 28-33.
- Mégévand C., 2001 : Fixation de carbone pour lutter contre l'effet de serre : analyse économique et politique. Rapport de DEA Économie de l'environnement et des ressources naturelles. Université de Paris X-Nanterre.
- Nakamura T., Senior C., Olaizola M., Cushman M., Masutani S., 2001 : Capture and sequestration of CO₂ from stationary combustion systems by photosynthesis of microalgae. Proceedings of the First National Conference on Carbon Sequestration. Site : www.fetc.doe.gov/publications
- Nilsson S., Shopfhauser W., 1995 : The carbon sequestration potential of a global afforestation program. Climatic Change, 30, 249-257.
- Stevens S. H., Gale J., 2000 : Geologic CO₂ sequestration may benefit upstream industry. Oil and Gas J., May 15, 40-44.
- Stevens S., Vello A., Kuuskraa Gale J., 2001 : Sequestration of CO₂

13. Afrique du Sud, Allemagne, Australie, Botswana, Canada, Chine, États-Unis, Inde, Kazakhstan, Pologne, Royaume-Uni, Russie, Zimbabwe.

POUR SITUER LA FILIÈRE DE CAPTAGE - STOCKAGE SOUTERRAIN DE CO₂

in depleted oil and gas fields: global capacity, costs and barriers.
In: Proceedings of the 5th International Conference on Greenhouse Gas Control Techniques, ed. Williams D., Durie B., McMullan P., Paulson C. & Smith A. Collingwood, Australia, CSIRO.

Sites internet

- IEA: www.ieagreen.org.uk
- www.co2sequestration.info
- GIEC : www.ipcc.ch
- Club CO₂ : www.clubco2.net
- Réseau européen : www.co2geonet.eu
- Mission interministérielle de lutte contre l'effet de serre (MIES) : www.effet-de-serre.gouv.fr
- DOE (États-Unis) : www.netl.doe.gov
- BRGM : www.brgm.fr/domaines/sequestrCO2.htm
- IFP : www.ifp.fr
- INRA : www.inra.fr