

Direction de la Communication et des Editions
Service de Presse
Danièle Roblin
02 38 64 39 76
d.roblin@brgm.fr

Déjeuner de presse, 16 avril 2004

**Philippe Vesseron, Président du BRGM
Christian Fouillac, Directeur de la Recherche
Isabelle Czernichowski-Lauriol, Ingénieure, Chef de projet**

DOSSIER DE PRESSE

Lutte contre les émissions de gaz à effet de serre

La séquestration géologique du CO₂ une solution porteuse d'avenir pour réduire les risques climatiques

SOMMAIRE

- 1. Réduire les émissions de CO₂ dans l'atmosphère par la séquestration géologique**
- 2. Le rôle du BRGM dans la séquestration géologique du CO₂**
- 3. Les quatre principaux projets européens de recherche**
 - **SACS, le concept de séquestration en aquifère profond**
 - **GETSCO, valider la faisabilité technologique en Europe**
 - **NASCENT, la sécurité à long terme**
 - **WEYBURN, séquestration géologique et récupération assistée de pétrole**
- 4. Vers le monde de l'hydrogène...**
- 5. Pour en savoir plus...**
- 6. Eléments de calcul de coûts pour la capture et le stockage géologique du CO₂**

1. Réduire les émissions de CO₂ dans l'atmosphère par la séquestration géologique

Une option crédible et prometteuse

En un siècle, les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère ont augmenté de 50 % et celle du CO₂ de 31%. Parallèlement, la température a augmenté de 0,6° C en moyenne. Les projections pour 2100 prévoient une augmentation supplémentaire de + 2 à + 6° C, en l'absence de mesures d'intervention spécifiques.

Aujourd'hui, les experts scientifiques s'accordent pour penser que le gaz carbonique produit par les activités humaines contribue aux désordres climatiques.

Pour éviter que le réchauffement de la planète ne continue à progresser rapidement, la maîtrise des consommations d'énergie, la promotion de l'efficacité énergétique, le recours au nucléaire et à l'utilisation des énergies renouvelables (géothermie, énergie éolienne, énergie solaire) constituent des réponses mises en œuvre par les programmes nationaux (programme national de lutte contre le changement climatique) et internationaux (protocole de Kyoto).

Toutes les voies de recherche doivent être ouvertes pour mettre au point des techniques nouvelles pour réduire la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

La séquestration géologique du CO₂ constitue aujourd'hui, à moyen terme, une solution porteuse d'avenir pour réduire les risques de désordre climatique. Elle consiste à récupérer le CO₂ au niveau des principales sources d'émissions industrielles, liées essentiellement à l'utilisation des énergies fossiles, et à l'injecter dans des formations géologiques où il peut être stocké en grandes quantités pendant plusieurs milliers ou millions d'années.

La séquestration géologique du gaz carbonique, une solution porteuse d'avenir

La séquestration géologique du CO₂ qui doit répondre à des critères de faisabilité technique et économique, de faible impact environnemental et de sécurité, est une option crédible et très prometteuse car elle offre :

- **un potentiel de séquestration** dans les formations géologiques **extrêmement important** (de quelques dizaines à quelques centaines d'années d'émissions mondiales totales)
- **une séquestration très longue** (supérieure à plusieurs milliers ou millions d'années, voire définitive) permettant d'isoler efficacement le CO₂ de l'atmosphère. Il faut rappeler que la géologie enseigne que des accumulations naturelles de CO₂ dans les formations profondes perdurent depuis plusieurs millions d'années. En France notamment, des gisements naturels de CO₂ sont bien connus des géologues.
- **plusieurs éléments technologiques nécessaires à une filière** de séquestration déjà éprouvés : capture, transport et injection de CO₂ (dans une optique de récupération assistée du pétrole), stockage de gaz naturel
- **une emprise au sol** des installations de séquestration géologique extrêmement limitée par comparaison aux filières reposant sur la croissance de la biomasse

Le CO₂ peut être piégé en grandes quantités :

- **dans l'espace intergranulaire des roches poreuses et perméables** de certaines couches géologiques
- **par adsorption dans des veines de charbon.**

Il est nécessaire que le CO₂ soit injecté à une profondeur suffisante (supérieure à 800 m) afin d'atteindre les conditions de pression et de température qui déterminent son passage à l'état supercritique (au-delà de 31°C, 73 bars). Le CO₂ est alors dans un état dense et occupe beaucoup moins de place que s'il était à l'état gazeux. Il est donc stocké à l'état supercritique dans les roches réservoirs. Au cours du temps, une partie de CO₂ peut se dissoudre dans les fluides interstitiels et entraîner des réactions géochimiques avec les minéraux des roches. Ces processus, bien que lents, peuvent faciliter la séquestration du CO₂.

Trois options principales pour la séquestration géologique

☉ Les gisements de pétrole et de gaz naturels épuisés ou en voie d'épuisement

Depuis plus d'un siècle d'une exploitation intensive, des milliers de gisements de pétrole et de gaz naturel arrivent en fin de production et certains d'entre eux pourraient constituer des sites intéressants de séquestration géologique. Parmi les avantages :

- de faibles coûts d'exploration, la géologie étant parfaitement connue
- la preuve que ces réservoirs ont pu piéger des liquides et des gaz pendant des millions d'années
- des équipements de production et/ou d'injection qui pourront être réutilisés pour transporter et injecter le CO₂
- la récupération assistée de pétrole ou de gaz

☉ Les aquifères profonds

Ces réservoirs profonds (au-delà de 800 mètres de profondeur) sont nombreux. Ils contiennent une eau très salée totalement impropre à la consommation humaine et à l'irrigation et pourraient donc être des lieux de séquestration privilégiés.

En effet, l'espace disponible dans ces roches aquifères est immense puisqu'on les trouve dans les bassins sédimentaires présents un peu partout dans le monde. Leurs dimensions peuvent excéder quelques kilomètres d'épaisseur et s'étendre sur des centaines voire des milliers de km².

☉ Les gisements de charbon inexploités

Dans les gisements de charbon on peut piéger durablement du CO₂ par adsorption sur le charbon. Le méthane (souvent présent naturellement dans le gisement) est alors chassé par le CO₂ et peut être récupéré pour être valorisé.

L'avantage est donc double : augmentation de la production de méthane et séquestration du CO₂.

2. Le rôle du BRGM dans le domaine de la séquestration géologique du CO₂

Une collaboration aux principaux programmes européens de recherche initiée voilà plus de dix ans

La réduction des émissions implique très vraisemblablement la conjugaison d'options de différentes natures : maîtrise de la demande en énergie, amélioration de l'efficacité énergétique, changement des comportements, évolution des procédés industriels, utilisation des énergies renouvelables, séquestration chimique et biologique... La séquestration géologique du CO₂ constitue, à moyen terme, une solution porteuse d'avenir pour contribuer à cette réduction.

Une dynamique est donc enclenchée au niveau international et on assiste à l'émergence de nombreux projets de recherche et pilotes industriels. Pour sa part, le BRGM fait partie des pionniers au niveau international dans le domaine du stockage géologique du gaz carbonique. Ses activités sur ce thème ont commencé en 1993 et connaissent, depuis l'année 2000, une croissance très importante. Le BRGM a d'ores et déjà collaboré à plus de 10 programmes de recherche.

I. La mission du BRGM dans le domaine de la séquestration géologique du CO₂

Le BRGM a pour mission de fournir des données incontestables tant en termes de faisabilité que de sécurité des sites.

Dans la problématique de recherche sur la séquestration géologique du CO₂, **le BRGM concentre son activité sur la sécurisation de la séquestration du CO₂ en aquifère profond.**

Les aquifères profonds se présentent comme une potentialité forte de stockage géologique dont les conditions sont encore mal connues.

Les travaux de recherche du BRGM dans **les 3 ans à venir** ont notamment pour objectifs :

- d'identifier les sites de stockage, éventuellement proches de lieux d'émission (territoire national ou non)
- de proposer des critères de sécurité.

La détermination des conditions de stockage en aquifère est stratégique car elle permettra ainsi :

- non seulement de compléter les capacités de stockage ailleurs que dans les sites d'hydrocarbures
- mais également de localiser ces sites de stockage à proximité des lieux d'émissions et donc de réduire très sensiblement les coûts.

II. BRGM, une contribution importante aux principaux programmes de recherche

☉ De **1993 à 1995**, le **BRGM** a participé au projet européen **Joule II** « The underground disposal of carbon dioxide » qui a conclu à la faisabilité du concept de stockage géologique du CO₂. Les principaux résultats ont conduit à souligner :

- **l'importance du potentiel de séquestration** du CO₂ en aquifère profond
- **la durée très longue de séquestration** (plusieurs milliers à plusieurs millions d'années)
- **la maîtrise de plusieurs éléments technologiques** nécessaires à une filière (capture, transport et injection du CO₂)
- **les critères d'évaluation des zones** susceptibles de recevoir des installations de séquestration.

Le BRGM a particulièrement assuré la modélisation géochimique et la modélisation couplée (géochemie-transport hydrodynamique), l'inventaire des capacités de stockage en Europe du Sud et la pré faisabilité d'un monitoring microsismique.

☉ De **1998 à 2002**, le BRGM a participé aux projets européens **SACS et SACS 2** dont l'objectif était de **valider le concept de séquestration en aquifère profond** et accompagner l'opération industrielle de réinjection de CO₂ à Sleipner dans le sous-sol de la mer du Nord.

Le BRGM a notamment assuré l'interprétation d'expériences en laboratoires et contribué à l'élaboration d'un « Manuel des bonnes pratiques » pour les stockages en aquifères profonds.

☉ De **2000 à 2003**, le BRGM a participé au projet européen **GESTCO** pour évaluer **le potentiel et la faisabilité technico-économique** de la séquestration géologique de CO₂ dans des aquifères profonds, des gisements d'hydrocarbures sur le déclin ou des veines profondes de charbon. Des scénarios capture-transport-stockage de CO₂ sont étudiés sur quelques secteurs géographiques représentatifs en Europe.

Le BRGM a assuré l'inventaire des principales sources d'émission de CO₂ industriel en France, étudié les potentiels de stockage dans le Bassin parisien ainsi que les potentialités du couplage séquestration géologique du CO₂ et exploitations géothermiques.

☉ Depuis **2001 et jusqu'à fin avril 2004**, le BRGM participe au projet européen **NASCENT** afin de démontrer, à partir des accumulations naturelles de CO₂ dans le sous-sol, le comportement et **la sécurité à long terme** de sites de séquestration géologique en aquifère profond.

Le BRGM a assuré l'étude de la province carbogazeuse française, puis s'est concentré sur le gisement naturel de CO₂ (teneur à 97%) de Montmiral (Drôme) : caractérisation détaillée du gisement, échantillonnage des fluides, analyses chimiques et isotopiques (forages, sources) et analyses minéralogiques.

☉ Depuis **2001 et jusqu'à fin juin 2004**, le **BRGM** participe au projet européen **WEYBURN** qui accompagne la première opération industrielle couplant la séquestration de CO₂ à la récupération assistée de pétrole, menée depuis septembre 2002 sur le champ pétrolier de Weyburn au Canada (Saskatchewan).

Le BRGM a participé à la caractérisation détaillée du site (géologie, hydrogéologie et géochimie), la modélisation géochimique, la modélisation hydrodynamique, la modélisation couplée géochimie-hydrodynamique, le monitoring des gaz des sols et le monitoring microsismique.

☉ En **2002 et 2003**, le BRGM a participé à **SAMCARDS**, projet destiné à développer une méthodologie et des outils de modélisation numérique pour l'évaluation des risques liés au stockage géologique du CO₂.

Ce projet fait partie du projet international « CO₂ Capture Project » piloté par 9 industriels (BP, Chevron, ENI, Norsk-Hydro, PanCanadian, Shell, Statoil, Suncor, Texaco) dont l'objectif est de développer les technologies de capture et de stockage.

Le BRGM a assuré la modélisation géochimique et la modélisation couplée géochimie-transport hydrodynamique et les calculs de sensibilités.

☉ De **2002 à 2005**, le BRGM participe au projet français « Etude du stockage géologique du CO₂ en France » co-financé par le Réseau des Technologies Pétrolières et Gazières (RTPG) qui comprend trois volets :

- piégeage de CO₂ dans les réservoirs (PICOR)
- étude de la faisabilité d'un pilote de stockage de CO₂ dans un gisement d'hydrocarbures
- la filière du charbon propre en France : un pilote de séquestration du CO₂ pour les centrales thermiques à charbon.

Le BRGM étudie la thermodynamique et la cinétique des systèmes eaux-roches-gaz. Il assure la modélisation géochimique, la modélisation couplée géochimie-transport hydrodynamique. Il a créé la base de données des gisements naturels de CO₂ et d'H₂S et a procédé à des modélisations sur des tests expérimentaux.

En 2004 et 2005, le BRGM étudiera principalement les potentialités de stockage à proximité des sites de Gardanne et de Carling.

☉ De **2003 à 2006**, le BRGM participe à **CO2STORE**, programme européen qui étudie le comportement à long terme du CO₂ injecté à Sleipner (suite du programme **SACS**) et qui est chargé d'étudier **4 autres sites potentiels de stockage en aquifère profond**, deux on-shore et deux off-shore (Danemark, Pays de Galles, Allemagne et Norvège).

☉ De **2004 à 2008**, le BRGM participe au projet intégré européen **CASTOR** visant à réduire le coût de capture du CO₂ après combustion et à valider le concept de séquestration sur quatre sites concrets.

Le BRGM étudiera principalement le cas de deux sites offshore (champ pétrolier de Casablanca en Méditerranée au large de l'Espagne et un champ de gaz de GDF en Mer du Nord, au large des Pays-Bas).

III. BRGM, un rôle de premier plan dans l'animation des réseaux européens

☉ En **2001 et 2002**, le BRGM a participé au réseau **CO2NET** et depuis **2003**, il participe à **CO2NET2**. Ce réseau thématique du 5^{ème} programme cadre de la Commission européenne regroupant chercheurs, développeurs et utilisateurs de la technologie de la séquestration du CO₂ a pour but de faciliter la coopération entre les différents acteurs. Ce réseau est notamment chargé de déterminer des stratégies de recherche, d'élaborer des codes de bonne pratique et de veiller à la diffusion des informations et des connaissances. Cinquante cinq organisations représentant 14 pays européens participent à **CO2NET2**.

☉ **Depuis 2004 et pour une durée de cinq ans, environ**, le BRGM participe au réseau d'excellence **CO₂GEONET** sur la séquestration géologique du CO₂ qui a pour objectif de renforcer l'intégration et la coordination des équipes de recherche. Ce réseau comprend 13 organismes européens de recherche dont l'expertise est reconnue au plan international.

Le BRGM participe à toutes les activités du réseau, notamment : mise au point d'outils numériques de prédiction, modélisation des interactions roches-eaux, mise au point de technologies de monitoring, récupération assistée d'hydrocarbures, mesure du risque. Il participe par ailleurs à la diffusion des informations et des connaissances.

IV. Le BRGM animateur des comités français

Le BRGM (Jacques Varet, Directeur de la Prospective) **assure la Présidence du Comité scientifique de la MIES** (Mission Interministérielle sur l'Effet de Serre) et le **Secrétariat du Club CO₂** (Christian Fouillac, Directeur de la Recherche) avec l'IFP. Ce club fédère l'activité d'entreprises émettrices de CO₂ et d'instituts de recherche dans le domaine des études, de la recherche et du développement technologique en matière de capture et de stockage. La Présidence est assurée par l'ADEME. Participent à ce réseau, Total, Usinor, Air Liquide, Alstom, le CNRS, EDF, GDF, Géostock...

3. Les quatre principaux projets européens de recherche

3.1. Le projet SACS

(Saline Aquifer CO₂ Storage)

«Le concept de séquestration en aquifère profond»

La compagnie pétrolière norvégienne Statoil a démarré fin 1996, à partir de la plate-forme « off-shore » de gaz naturel de Sleipner Vest, en mer du Nord, la première opération industrielle de séquestration géologique de CO₂ (environ un million de tonnes de CO₂ injectées par an) dans un aquifère profond (1000 m sous le plancher océanique), dans la formation sablo-gréseuse d'Utsira.

Cette séquestration était destinée à ramener la proportion de CO₂ dans le gaz produit de 9 à 2,5 %, maximum autorisé par les critères de vente, et à éviter de rejeter le CO₂ dans l'atmosphère car il existe en Norvège une taxe sur le CO₂ émis.

A la suite du démarrage de cette opération, un projet de recherche cofinancé par l'Union Européenne a été mis en place.

SACS, la séquestration en milieu aquifère profond

Le programme a conduit à démontrer sur le site de Sleipner, pilote au niveau mondial, la validité du concept de séquestration du CO₂ en milieu aquifère salin, à tester des méthodologies scientifiques pour surveiller et prévoir la migration du dioxyde de carbone et enfin, à établir un « manuel de bonnes pratiques », véritable guide pour toutes les futures opérations de stockage en aquifère profond.

La participation du BRGM à SACS

Le BRGM a été principalement chargé :

- d'étudier l'**impact des réactions chimiques entre le CO₂, l'eau et la roche du réservoir aquifère** par modélisation et interprétation des différentes expériences réalisées en laboratoire par les partenaires du projet
- de coordonner tous **les travaux de géochimie** réalisés par les partenaires scientifiques impliqués dans ce domaine de recherche,
- d'étudier la faisabilité d'une méthode de suivi de la migration du CO₂ par **surveillance microsismique**.

Les partenaires du projet

- organismes de recherche : BRGM, IFP (France), BGS (Royaume-Uni), GEUS (Danemark), NITG-TNO (Pays-Bas), SINTEF (Norvège)
- industriels : Statoil (coordinateur du projet), BP Amoco, Exxon Mobil, Norsk Hydro, Vattenfall
- ministères et agences (France, Norvège, Danemark, Pays-Bas, Royaume –Uni)
- assistants : IEA/GHG (Royaume-Uni), GECO (Norvège), NERSC (Norvège).

3.2. Le projet GESTCO

(Assessing the European potential for Geological Storage of CO₂ from fossil fuel combustion) «Valider la faisabilité technologique en Europe»

Ce programme a permis d'étudier la viabilité de la séquestration à grande échelle de CO₂ dans des sites géologiques sélectionnés sur quelques zones géographiques en Europe. Par ailleurs, un des volets du projet a été consacré au recueil et à l'examen de la sensibilité du public au concept de stockage souterrain du dioxyde de carbone.

GESTCO, l'évaluation du potentiel européen de séquestration géologique

Quatre types de sites de séquestration dont les propriétés géologiques sont particulièrement favorables au stockage ont été étudiés :

- **aquifères profonds** : sud de l'Angleterre, Pays-Bas, Belgique, Danemark, Grèce, Norvège, nord de la France et de l'Allemagne, mer du Nord)
- **réservoirs géothermiques basse énergie** : bassin de Paris, région de Copenhague et sud de la Suède
- **gisements houillers et anciennes mines** : Belgique, Pays-Bas, Allemagne et nord de la France
- **gisements d'hydrocarbures abandonnés ou en déclin** : Allemagne, Pays-Bas, mer du nord et mer Egée.

GESTCO a conduit à évaluer le potentiel de séquestration dans chacun des secteurs géographiques retenus en croisant les capacités géologiques et les sources d'émission industrielles du CO₂.

Le projet a également réalisé une estimation des coûts pour les scénarios les plus réalistes en prenant en compte la capture du CO₂ à son point d'émission, son transport jusqu'au site de séquestration et son injection dans le sous-sol.

La participation du BRGM à GESTCO

Les travaux du BRGM ont plus particulièrement porté sur :

- l'inventaire des sources d'émissions industrielles et des sites potentiels de séquestration du bassin Parisien
- la coordination du thème «séquestration dans les réservoirs géothermiques»
- le calcul des capacités de séquestration, l'évaluation de la sécurité des sites et des conflits d'usages potentiels
- la construction de scénarios « sites de séquestration-sources de CO₂ »
- la modélisation économique de ces scénarios.

Les partenaires du projet

- organismes de recherche : les 8 services géologiques nationaux de France (BRGM), Danemark (GEUS), Grande-Bretagne (BGS), Pays-Bas (NITG-TNO), Belgique (GSB), Norvège (SINTEF), Allemagne (BGR) et Grèce (IGME)
- industriels (associés en tant qu'utilisateurs finaux) : EcoFys, Vito Engineering, Compagnie nationale d'électricité de Grèce (PPCG), la Compagnie nationale du pétrole du Danemark (DONG) et la Compagnie française de Géothermie (CFG, filiale du BRGM)
- associé : Agence internationale de l'énergie, programme de réduction des gaz à effet de serre (IEA-GHG)

3.3. Le projet NASCENT

(Naturel Analogs for the Storage of CO₂ in the Geological ENvironment) «La sécurité à long terme»

Ce programme a conduit à évaluer l'impact à long terme et les risques potentiels de la séquestration géologique du CO₂ à partir de l'étude de gisements naturels de ce gaz piégés dans le sous-sol depuis des millions d'années.

NASCENT, les enseignements tirés de l'étude des gisements naturels de CO₂

Des gisements naturels de CO₂ existent dans le sous-sol de nombreux pays (Etats-Unis, Hongrie, Turquie, Grèce, France...). Ils constituent de véritables analogues naturels à la séquestration géologique du CO₂.

Le projet NASCENT a conduit à :

- déterminer jusqu'à quel point les accumulations naturelles peuvent permettre d'envisager, avec un maximum de confiance, la sécurité et la viabilité de la séquestration géologique du CO₂ sur le long terme
- connaître le plus précisément possible les structures géologiques qui ont effectivement piégé le CO₂
- évaluer les risques environnementaux qui pourraient découler de la séquestration géologique
- utiliser les observations faites sur les accumulations naturelles pour calibrer les modélisations numériques sur le comportement à long terme du stockage
- faire le point sur les techniques d'ingénierie utilisées sur les accumulations qui sont exploitées industriellement.

La participation du BRGM à NASCENT

- inventaire et caractérisation d'accumulations naturelles de CO₂
- prélèvements et analyses de fluides, de roches et de gaz
- modélisation des réactions chimiques entre l'eau, le CO₂ et la roche réservoir
- évaluation des risques

Les travaux du BRGM porteront essentiellement sur l'étude de la ceinture carbogazeuse du Massif Central qui présente différentes situations d'accumulations naturelles de CO₂ ou de « fuites » à la surface, révélées par des campagnes d'exploration pétrolière ou d'eau minérale, ou tout simplement par la présence de sources riches en CO₂.

Par ailleurs, le BRGM est chargé de la coordination de tout l'aspect de modélisation des réactions chimiques.

Les partenaires du projet

- organismes de recherche : les services géologiques européens de France (BRGM), Grande-Bretagne (BGS), Allemagne (BGR et Université d'Aachen), Hongrie (MAFI), Italie (Université de Rome), Grèce (IGME), Pays-Bas (TNO-NITG)
- industriels : BP Amoco (Royaume Uni), Statoil (Norvège)
- agence Internationale de l'Energie, programme de recherche sur les gaz à effet de serre (IEA-GHG).

3.4. Le projet WEYBURN

«Séquestration géologique et récupération assistée de pétrole»

Ce projet a permis d'évaluer la pertinence du concept combinant la séquestration géologique à long terme de CO₂ dans un réservoir pétrolier carbonaté et la récupération assistée de pétrole, en se fondant sur l'opération industrielle menée sur le champ pétrolier de Weyburn (au sud de la province du Saskatchewan, Canada).

Depuis septembre 2000, 5000 tonnes de CO₂ sont injectées chaque jour dans le réservoir pétrolier de Weyburn pour favoriser la récupération du pétrole encore enfoui. Le CO₂ carbone qui provient d'une usine de gazéification du charbon située dans le nord du Dakota (Etats-Unis) est acheminé jusqu'au site de Weyburn par un pipe-line de 330 km.

Cette opération doit permettre de piéger dans le sous-sol et de façon permanente un total d'environ 18 millions de tonnes de CO₂.

WEYBURN, une contribution européenne au projet international de séquestration géologique de CO₂ dans le réservoir pétrolier de Weyburn

Le projet international de recherche et de démonstration s'est mis en place en 2000 sous la coordination du Petroleum Technology Research Centre (PTRC) du Canada et sous l'égide de l'IEA GHG (Agence internationale de l'énergie, programme de réduction des gaz à effet de serre).

Le projet européen WEYBURN, qui apporte la contribution d'équipes européennes a été chargé d'examiner trois problématiques principales :

- la sécurité et la performance à long terme de la séquestration géologique par le développement d'un outil d'analyse du risque
- les cheminements des fluides dans le sous-sol et jusqu'en surface par une étude hydrogéologique du site, un suivi des concentrations en gaz dans les sols et les eaux souterraines et une surveillance microsismique
- l'impact des réactions chimiques entre le CO₂ et le réservoir pétrolier par des expériences en laboratoire, des observations de terrain et des modélisations numériques.

La participation du BRGM à WEYBURN

- caractérisation de l'état initial du site avant l'injection du CO₂ : hydrogéologie et géochimie des fluides
- modélisation des réactions chimiques entre le dioxyde de carbone et le réservoir pétrolier et évaluation de leurs impacts sur le comportement et l'environnement du stockage
- surveillance des gaz dans les sols
- surveillance microsismique.

Le BRGM a assuré la coordination de l'ensemble des travaux européens sur la caractérisation de l'état initial du site, ou état de référence, qui conditionne le comportement du stockage et qui permet, dans le futur, d'attribuer ou non à l'injection du CO₂ tout changement observé sur le site.

Le BRGM a également assumé, au niveau européen, la responsabilité de la modélisation des interactions chimiques et de la surveillance micro-sismique. Ces travaux ont été menés en étroite collaboration avec les équipes nord-américaines du projet.

Les partenaires du projet

- organismes de recherche : BRGM (France), BGS (Royaume-Uni), GEUS (Danemark), ING (Italie), Quintessa (Royaume-Uni), PTRC (Canada).
- Agence internationale l'énergie (IEA-GHG).

4. Vers le monde de l'hydrogène ...

La décarbonisation des combustibles fossiles et la production associée d'hydrogène ouvrent également la voie à des économies d'émissions de CO₂ significatives

La production massive d'hydrogène, utilisé 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.

Deux grandes filières peuvent être mises en œuvre pour conjurer cette contradiction

- **produire l'hydrogène par électrolyse de l'eau**, l'électricité nécessaire étant fournie par l'énergie nucléaire ou par des énergies renouvelables ; les rendements de ces réactions ne sont pas très favorables et on obtient donc un hydrogène avec des coûts de production élevés.
- **produire de l'hydrogène par vapo-reformage de gaz naturel (CH₄) ou par oxydation partielle de charbon suivie de vapo-reformage des gaz produits**. On fait réagir à une température de 800° à 1000°C un hydrocarbure gazeux avec de la vapeur d'eau, ce qui produit en deux étapes imbriquées, l'hydrogène et du CO₂.

Dans les deux cas de figure, on dispose de technologies très matures, économiquement favorables et qui ont déjà fait leurs preuves depuis plusieurs décennies. Ces deux procédés produisent donc de l'hydrogène et du CO₂ de grande pureté qu'il est alors aisé de capter et de stocker en formations géologiques.

On voit ainsi que la séquestration géologique du CO₂ peut

- **non seulement proposer une solution à la réduction des émissions de CO₂, conséquentes de production énergétique et des principales filières industrielles d'aujourd'hui**
- **mais qu'elle peut également trouver sa place dans les premières mises en œuvre concrètes de la production massive d'hydrogène qui constitue les premiers pas vers une société industrielle de l'hydrogène.**

5. Pour en savoir plus ...

Réduire les émissions de gaz à effet de serre

La convention cadre sur le changement climatique des Nations Unies, adoptée à Rio de Janeiro en 1992, a marqué la prise de conscience de la communauté internationale.

En 1997, les représentants de 159 pays ont approuvé le Protocole de Kyoto engageant 38 pays industrialisés à réduire leurs émissions.

Au sommet de La Haye, le 13 novembre 2000, la communauté internationale s'est réunie pour définir les modalités d'application du Protocole de Kyoto et depuis les négociations se poursuivent : en 2001 à Bonn et à Marrakech, en 2002 à New-Delhi, en 2003 à Milan...

Plusieurs états sont désormais convaincus que la séquestration géologique du CO₂ constitue, à moyen terme une solution porteuse d'avenir pour la contribuer à la réduction des émissions de CO₂. Il en va de même pour des instances internationales comme l'Agence Internationale de l'Energie.

Le Groupement Intergouvernemental sur l' Evolution du Climat (GIEC) prépare, pour début 2005, un rapport spécial sur cette technologie du stockage géologique afin de faire le point sur les aspects techniques, économiques et environnementaux et aider ainsi les prises de décisions politiques

Les six principaux objectifs de la réduction des émissions

Tous les gaz à effet de serre n'ont pas le même pouvoir de réchauffement global. Certains gaz émis en faible quantité peuvent cependant avoir un rôle très néfaste. C'est le cas notamment des hydrofluorocarbures (HFC), perfluorocarbures (PFC) hexafluorures de soufre (SF₆).

Pour la France, le Programme national de lutte contre le changement climatique (Pnlcc) mis en œuvre par la Mission interministérielle contre l'effet de serre (MIES) a notamment fixé les objectifs suivants :

1. Accroître la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité

L'énergie de la France est à 75 % d'origine nucléaire. A l'horizon 2010, la France s'est fixé comme objectif de produire 20 % de son électricité à partir des énergies renouvelables, contre 15 % actuellement. Ceci passe par le développement du solaire, de l'éolien et de la géothermie.

2. Diminuer la part des engrais chimiques dans l'agriculture

Une taxe sur les engrais devrait inciter à cette limitation. Par ailleurs, le méthane des lisiers et des décharges d'ordures ménagères peut être récupéré et brûlé pour fournir de l'énergie.

3. Produire mieux en consommant moins d'énergie

Les industriels sont incités à poursuivre leurs efforts pour modifier et améliorer leurs produits, leurs procédés et progresser dans le domaine de la récupération et l'élimination des gaz à effets de serre.

4. Mobiliser les filières professionnelles du bâtiment

Les émissions de CO₂ proviennent principalement de l'énergie utilisée pour le chauffage des locaux, de la production d'eau chaude et de la climatisation.

La nouvelle réglementation thermique permettra d'améliorer le bilan énergétique des bâtiments neufs. Quant aux bâtiments existants, ils feront l'objet de travaux contribuant à économiser l'énergie.

5. Améliorer l'état des transports

Cette amélioration passe, entre autres, par :

- des adaptations des moteurs thermiques
- des recherches sur les véhicules alternatifs
- l'organisation des systèmes de transports et des déplacements urbains

6. Développer les techniques de séquestration

Trois voies sont offertes :

➤ *La séquestration chimique*

Elle consiste à produire un composé chimique très stable dans le temps, à partir des effluents gazeux de centrales électriques ou de procédés industriels :

- carbone comme charge de bétons ou comme matière première en carrosserie automobile
- polymères synthétiques qui sont autant de produits de bases de nombreux procédés de l'industrie chimique

➤ *La séquestration biologique*

- production de biomasse
- technologies fondées sur la microbiologie (bactéries, algues monocellulaires...)
- utilisation de souches bactériennes, d'organismes génétiquement modifiés, réactions enzymatiques

➤ *La séquestration géologique*

Les deux premières opérations industrielles ont démontré la faisabilité de la technologie (Sleipner en mer du Nord, Weyburn au Canada).

Ainsi, pour permettre le déploiement à grande échelle de cette technologie, les efforts doivent continuer à porter sur :

- la compréhension des mécanismes de piégeage dans les réservoirs
- l'identification des potentialités de confinements des différents lieux de stockage envisagés
- la métrologie de mesure des quantités injectées et de leur confinement
- les impacts environnementaux d'un stockage massif et de longue durée
- les aspects réglementaires et juridiques
- la réduction des coûts

Cependant, il n'y a pas de solution unique mais une conjugaison d'actions parmi lesquelles le stockage géologique du CO₂ doit jouer un rôle majeur à court et moyen termes.

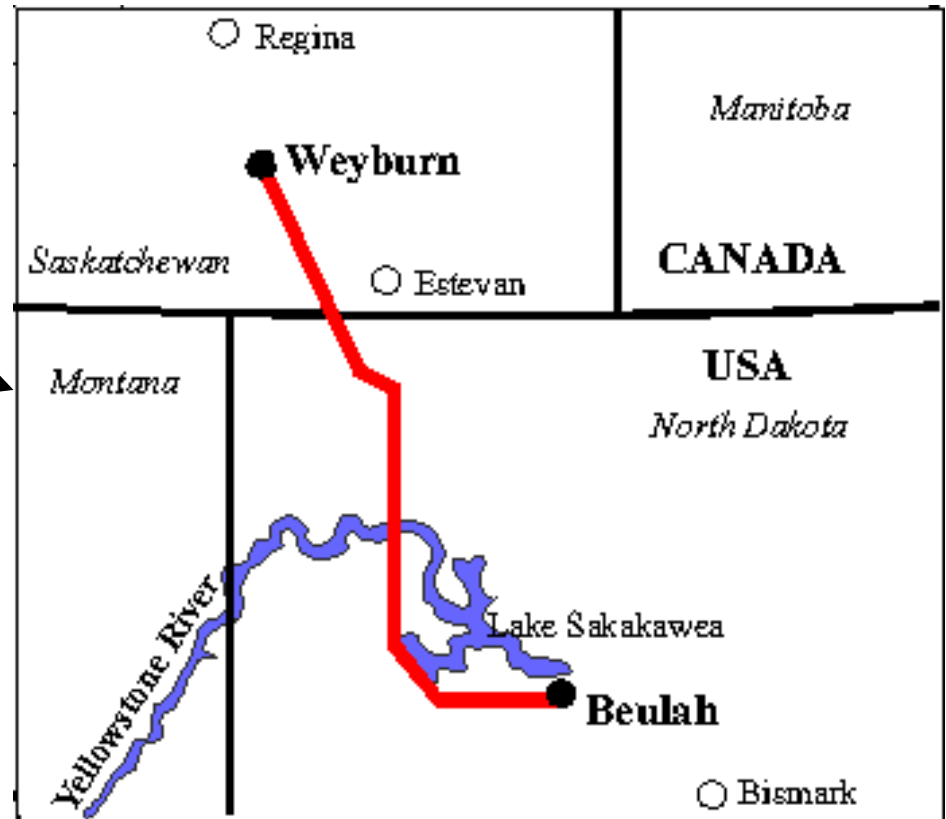
En effet, il n'est pas réaliste de viser un « zéro émission de CO₂ » tant que les énergies fossiles demeureront prépondérantes dans la consommation énergétique, d'autant plus que de nouveaux et grands pays émergents vont devenir fortement producteurs de gaz à effet de serre (Chine, Brésil, Inde...). Cette solution devrait donc être transitoire entre les actuelles énergies fossiles, l'énergie nucléaire et les futures énergies (hydrogène, piles à combustible, solaire...). La technologie pourrait donc se déployer à grande échelle à partir de 2010.

Les projets de stockage géologique de CO₂ au BRGM

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
EU 3ème PCRD	JOULE															
EU 4ème PCRD						SACS										
EU 5ème PCRD								SACS2								
										CO2STORE						
								GESTCO								
									NASCENT							
									WEYBURN							
EU 6ème PCRD										CO2NET	CO2NET2					
												CASTOR				
FR RTPG													CO ₂ GeoNet			
										A - PICOR						
												B				
CCP SAMCARDS													C			
										SAMCARDS						

IEA Weyburn CO₂ Monitoring and Storage Project

Stockage de CO₂ dans le champ pétrolier de Weyburn, combiné à la récupération assistée de pétrole



The Weyburn Unit



IEA Weyburn CO₂ Monitoring and Storage Project

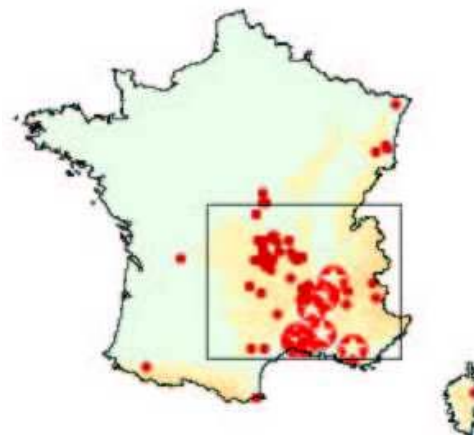
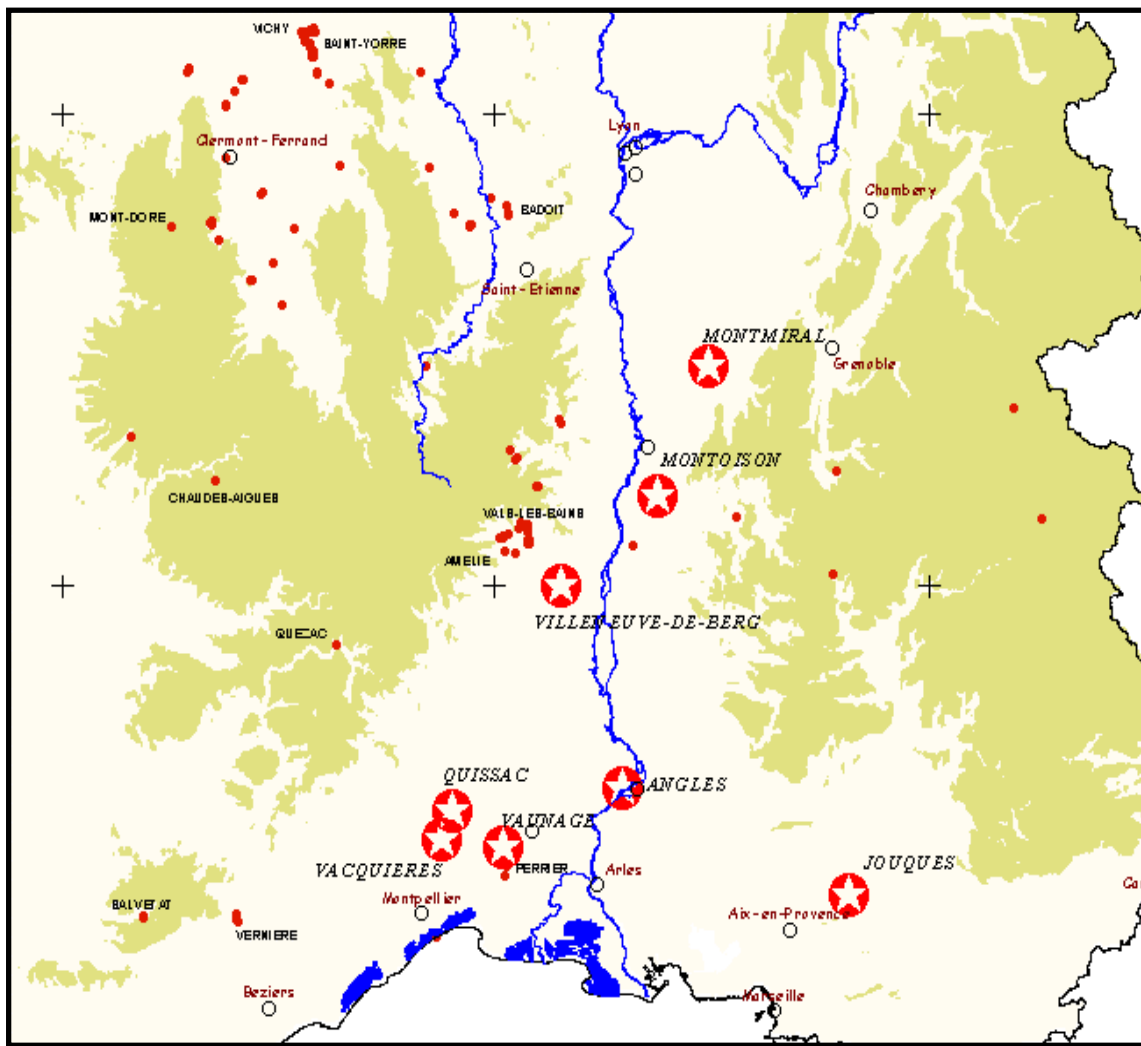
1,8 Mt/an depuis sept. 2000



Pipeline 330 km
5000 t CO₂ / jour



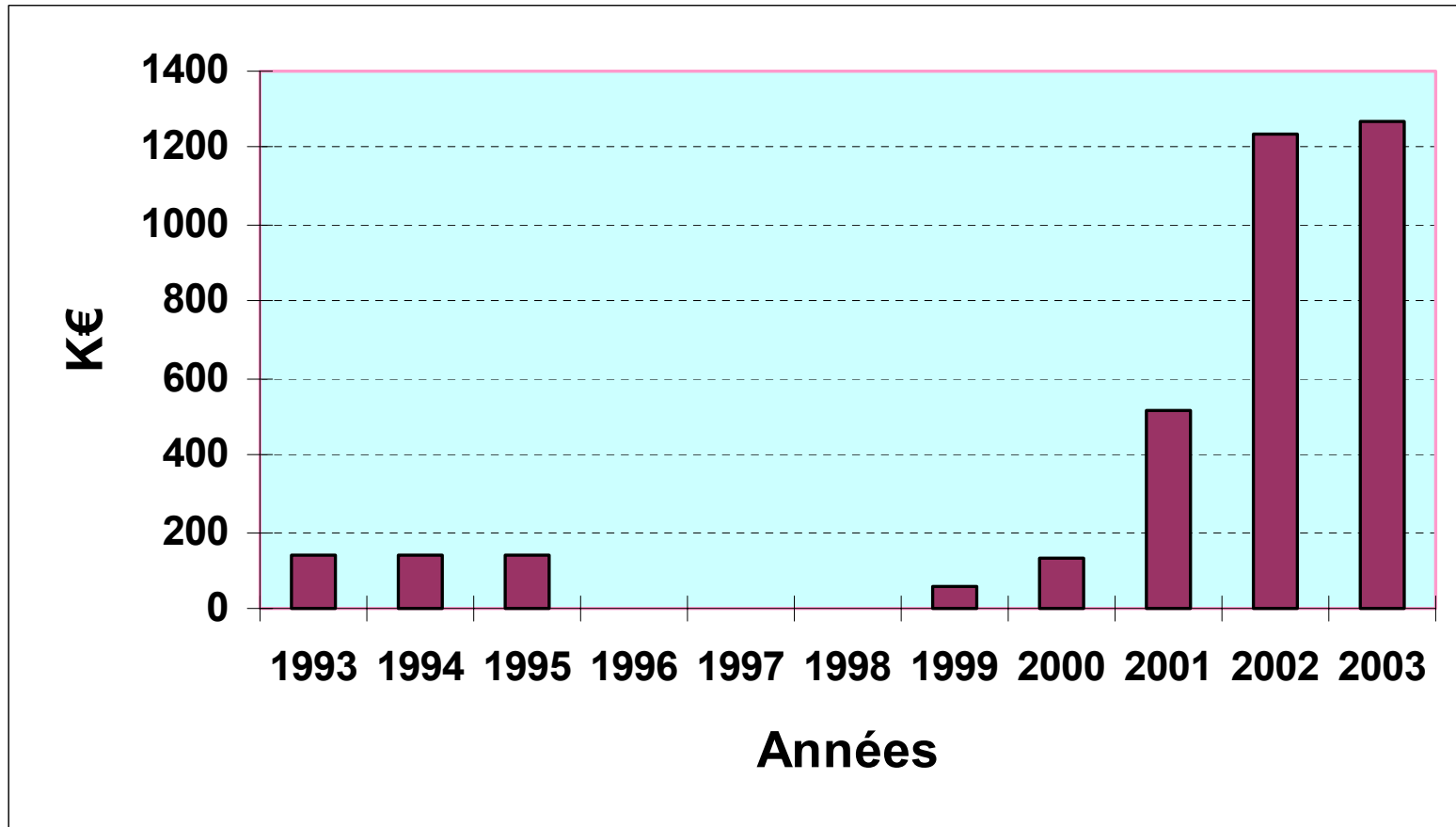
La province carbogazeuse française

N·A·S·C·E·N·T

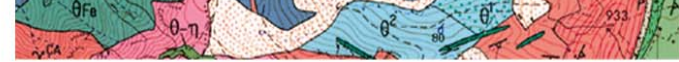


-  Gisements naturels de CO₂
-  Eaux carbogazeuses exploitées (boissons, thermalisme)

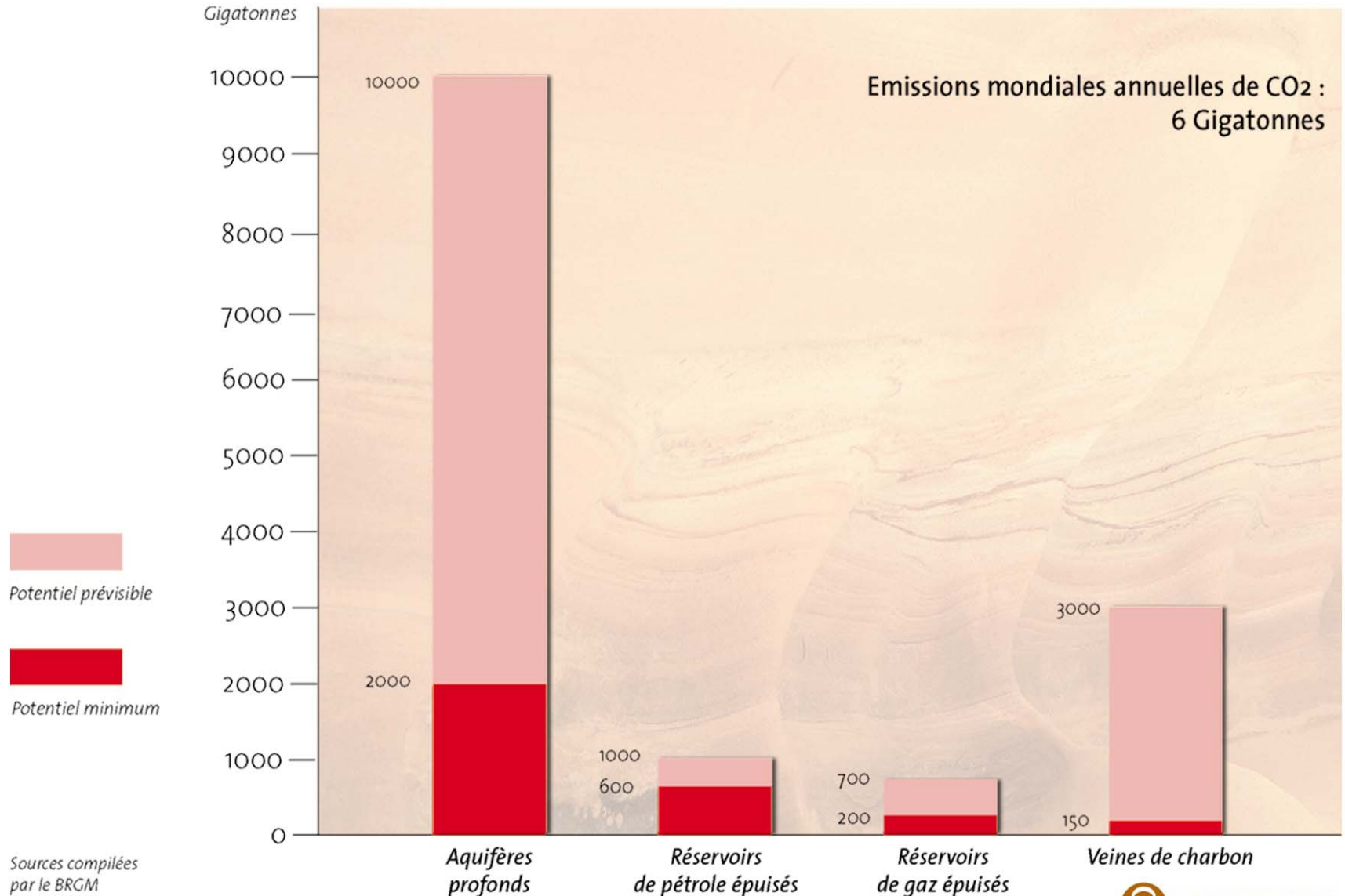
Les budgets BRGM sur la séquestration géologique du CO₂



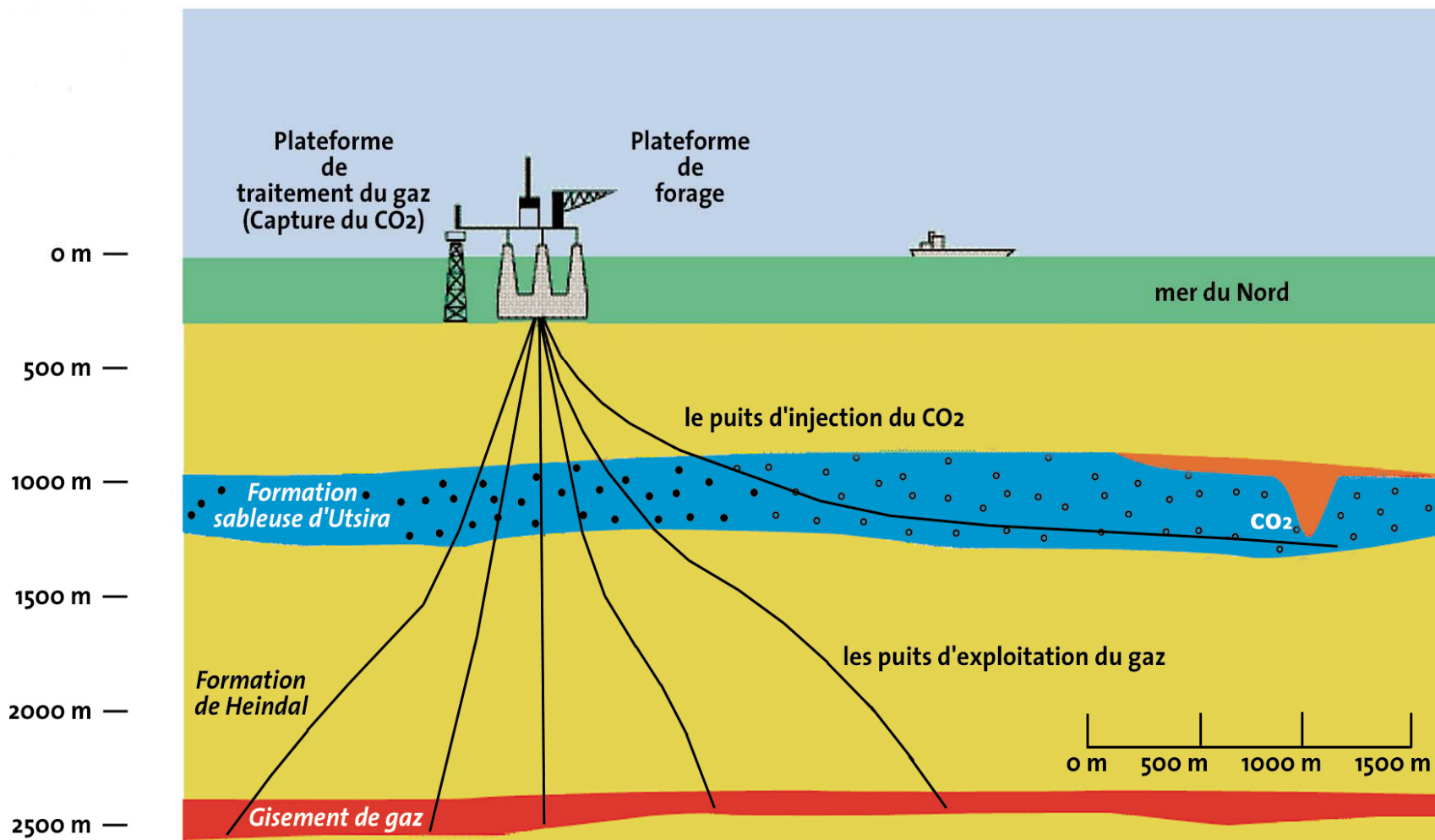
environ 50% de cofinancements : Union Européenne, industriels...



Potentiel mondial de stockage géologique du CO₂.



Sleipner, (mer du Nord - Norvège) premier site mondial de séquestration de CO₂ en aquifère profond.



6. Eléments de calcul de coûts pour la capture et le stockage géologique du CO₂

Capture

Cette compilation correspond à plusieurs schémas de production d'électricité à partir de combustibles fossiles. On peut établir des calculs pour le gaz naturel, ou pour le charbon, les paramètres à prendre en considération sont nombreux, ils incluent :

- le coût et la composition du combustible
- la température moyenne du site de production et celle de l'eau de refroidissement
- le pourcentage de CO₂ que l'on veut capturer (typiquement 80 à 90%)
- La concentration et la pression de CO₂ dans les gaz de combustion et donc le schéma du cycle de combustion considéré
- La taille de l'unité de production et sa durée annuelle de fonctionnement
- La durée de vie de l'installation et le temps nécessaire à sa construction
- Des paramètres financiers (taux de crédit...)

On doit considérer des schémas où le CO₂ est extrait des Gaz après la combustion (Capture Post Combustion) ou ceux pour lesquels le combustible est traité avant la combustion de telle sorte que son contenu en carbone soit diminué (Capture Pré-Combustion). Enfin selon que la combustion sera réalisée dans l'air ou dans de l'oxygène pur (en fait dans un mélange Oxygène CO₂), la concentration du CO₂ dans les gaz d'échappement sera très variable. Pour chaque schéma, on évalue la quantité de CO₂ capturé par rapport à un scénario de référence sans capture, ainsi que le coût additionnel lié aux opérations de capture. On peut ainsi calculer le « coût de la tonne évitée ». Plusieurs travaux de recherche originaux ou des compilations assez exhaustives ont été produites dans la période 1998-2002. Les différents auteurs publient des chiffres très semblables pour les technologies de combustion les plus anciennes et donc les mieux maîtrisées, en revanche, il peut y avoir des divergences de quelques petites dizaines de pourcents pour les technologies de combustion les plus innovantes et donc les plus récentes

- Cycle combiné à Gaz
 - ⇒ Capture Post Combustion ~ 32 US \$ par tonne de CO₂ évitée
 - ⇒ Capture Pré Combustion ~ 39 US \$ par tonne de CO₂ évitée
- Cycle à charbon pulvérisé (cycle le plus répandu)
 - ⇒ Capture Post Combustion ~ 47 US \$ par tonne de CO₂ évitée
- Cycle Intégré de gazéification –combustion de charbon (le plus récent)
 - ⇒ Capture Post Combustion ~ 37 US \$ par tonne de CO₂ évitée

Ces calculs seraient différents pour les grandes filières industrielles telles que ciment, acier, verre, pétrochimie, engrais. Dans ces derniers cas, il est très difficile de fournir des coûts moyens homogènes, car les schémas de production peuvent varier fortement d'une industrie à l'autre et d'un site à l'autre.

Transport

Les transports peuvent s'envisager au moyen de gazoducs dans lequel le CO₂ comprimé est véhiculé sous forme liquide. La technologie ainsi que la prévision des coûts sont extrêmement fiables. Les paramètres influant les coûts sont la longueur du gazoduc et sa capacité. En effet, le diamètre des canalisations conditionne les montants de l'investissement mais aussi les propriétés

de l'écoulement et donc des pertes de pression qu'il faut contrebalancer au moyen de stations de re pressurisation.

On calcule typiquement des coûts :

- 3 US \$ par tonne de CO_2 par 100 Km pour une capacité de 0,1 millions de tonnes par an
- 1 US \$ par tonne de CO_2 par 100 Km pour une capacité de 5 millions de tonnes par an
- 0,5 US \$ par tonne de CO_2 par 100 Km pour une capacité de 50 millions de tonnes par an

Lorsque la solution du gazoduc n'est pas envisageable, par exemple pour des transports maritimes de longues distances, on peut envisager le transport par navire spécialisé. Pour une distance typique de 500 Km et une capacité de 22.000 m³, on obtient un coût global proche de 2 US\$ par tonne de CO_2 . Le transport du CO_2 liquéfié ne nécessite que des températures de moins 55 °C, alors que le transport de gaz naturel nécessite des températures de moins 163 °C environ.

Stockage géologique

Le stockage géologique implique des coûts spécifiques et leur évaluation repose sur des critères comme la capacité du réservoir qui influera sur la durée du stockage et l'amortissement des investissements. On a également des influences complémentaires liées à la nature géologique du réservoir, à ses propriétés physiques, à la profondeur et au nombre de puits à forer ainsi qu'au débit de CO_2 .

Ces paramètres donnent des résultats différents sachant que les installations off shore donnent à profondeur de stockage égale des coûts plus élevés d'environ un facteur 3 que les stockages on shore (sur le continent).

On considère qu'une profondeur d'au moins 800 m est nécessaire pour le stockage, en effet, à ces profondeurs et au delà, le CO_2 est dans un état particulier « super critique ». c'est un état physique particulier, ni complètement gazeux, ni complètement liquide. Il est alors plus dense, ne se dissout pas dans l'eau et présente une réactivité chimique très faible vis à vis des minéraux des roches. Il est également beaucoup moins mobile que le CO_2 gazeux et présente donc des propriétés de confinement très intéressantes.

En off shore, les coûts estimés varient de 6 à 15 US \$ pour des profondeurs de 1.500 à 3.500 m.

En on shore, les coûts estimés varient de 1 US \$ à 6 US \$ pour le même intervalle de profondeur.

Le stockage géologique peut permettre de retrouver éventuellement des bénéfices associés lorsque le stockage de CO_2 se combine à la production assistée de pétrole ou à la production assistée de gaz naturel initialement inclus dans les charbons inaccessibles. Dans ces 2 cas, les coûts spécifiques du stockage peuvent être totalement équilibrés par la production d'hydrocarbure.

A l'heure actuelle, les coûts de monitoring des études de qualification et de certification des sites ne sont pas connus dans le détail mais sont généralement considérés comme faibles devant les coûts de stockage proprement dits et à fortiori très faibles devant les coûts de capture.

En conclusion, les coûts de capture sont de loin les plus importants et c'est leur diminution qui rendra la technologie de plus en plus acceptable ; les coûts de transport et de stockage sont beaucoup moins importants mais ils correspondent à des technologies matures et ne comportent donc pas le même potentiel de réduction dans l'avenir.

ESTIMATION GLOBALE DES COÛTS PAR TONNE DE CO₂ SOUSTRAIT A L'ATMOSPHERE

La compilation de ces informations nous montre que le coût, par tonne de CO₂ soustrait à l'atmosphère, varie, selon les sources et les conditions, entre 10 et 75 €/t.

La moyenne se situant entre 40 et 60 €/t de CO₂ soustrait.

Le tableau ci-après résume l'estimation des coûts et leurs écarts pour chaque phase de la filière :

En €/t CO ₂ soustrait	Tendance minimum	Fourchette moyenne	Tendance maximum
Séparation	1 (industries chimiques)	20-40	50
Compression		7-8	14
Transport	0 (stockage sur site)	2.5 - 6	Fonction de la distance et du diamètre des tuyaux
Stockage	1 (installations existantes sur site)	1-3	5.5 (réservoirs profonds complexes)
Ensemble	10	30-55	75