

Captage et stockage du CO₂

Enjeux techniques
et sociaux en France

Minh Ha-Duong, Naceur Chaabane,
coordinateurs

Captage et stockage du CO₂

Enjeux techniques et sociaux
en France

Minh Ha-Duong,
Naceur Chaabane,
coordinateurs

Éditions Quæ
c/o Inra, RD 10, 78026 Versailles

Collection *Update Sciences & Technologies*

La démarche qualité dans la recherche publique et l'enseignement supérieur

Claude Granier, Léandre-Yves Mas, Luc Finot, Bernard Arnoux, Nathalie Pasqualini, Vincent Dollé

2009, 376 p.

Homme et animal, la question des frontières

Valérie Camos, Frank Cézilly, Pierre Guenancia, Jean-Pierre Sylvestre, coordinateurs

2009, 216 p.

Le golfe du Lion. Un observatoire de l'environnement en Méditerranée

André Monaco, Wolfgang Ludwig, Mireille Provansal, Bernard Picon, coordinateurs

2009, 372 p.

Politiques agricoles et territoires

Francis Aubert, Vincent Piveteau, Bertrand Schmitt, coordinateurs

2009, 224 p.

La mise à l'épreuve. Le transfert des connaissances scientifiques en questions

Christophe Albaladejo, Philippe Geslin, Danièle Magda, Pascal Salembier, coordinateurs

2009, 280 p.

Contaminations métalliques des agrosystèmes et écosystèmes péri-industriels

Philippe Cambier, Christian Schwartz, Folkert van Oort, coordinateurs

2009, 308 p.

Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the Stics Crop Model

Nadine Brisson, Marie Launay, Bruno Mary, Nicolas Beaudoin, editors

2009, 304 p.

© Editions Quae, 2010

ISBN : 978-2-7592-0370-3

ISSN : 1773-7923

Le code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionnée pénalement. Toute reproduction, même partielle, du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20, rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

Préface

En cette année 2009, la France et le monde sont confrontés à trois crises conjuguées. La crise financière, partie de Wall Street, et l'aggravation des inégalités sociales qu'elle entraîne, à l'intérieur des pays et entre pays, nous obligent à répondre une fois de plus à la question « Quel État pour quel développement ? », en sachant que nous sommes assis sur les ruines de paradigmes échoués, le socialisme réel mais aussi le néolibéralisme outrancier fondé sur le mythe des marchés qui s'autorégulent.

Chemin faisant, il nous faut repenser la mondialisation qui sous ses formes actuelles, loin d'être une solution, pose plutôt problème.

Enfin, nous nous devons de trouver des réponses rapides à la crise environnementale. Sans une réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre, nous nous exposerons à des changements climatiques délétères aux conséquences dramatiques pour l'équipage du vaisseau spatial-terre.

Les solutions, difficiles mais encore possibles, passent par un changement radical du paradigme énergétique. Pour ce faire, il faudra actionner simultanément plusieurs leviers :

- le profil de la demande doit être reformulé dans le sens d'une plus grande sobriété énergétique, ce qui implique des modifications des styles de vie et de consommation ;
- la recherche de l'efficacité énergétique s'inscrit au rang de priorités évidentes ;
- en parallèle, il faut s'attacher à substituer les énergies fossiles par les énergies renouvelables en jouant sur tout le bouquet disponible ;
- le captage et le stockage du CO₂ émis par les activités humaines constituent un complément à la démarche indiquée ci-dessus, en attendant que nous apprenions à nous en servir pour promouvoir la photosynthèse assistée dans les serres spécialement conçues à ce dessein.

L'ouvrage que voici fait le point sur le captage et stockage du CO₂. Il comble ainsi une lacune dans la littérature en langue française et a le mérite de présenter de façon accessible au grand public des questions techniquement pointues. Il insiste encore, à juste titre, sur la nécessité de mener un dialogue social à ce sujet en collaborant avec le monde associatif.

C'est bien la direction que nous devons prendre, en postulant un grand débat sociétal sur l'avenir énergétique de la société française, qui tarde à venir, abordant d'emblée

toutes les dimensions de ce problème pour proposer des voies de sortie aux trois crises conjuguées dans le respect des principes de développement incluant et équitable sur le plan social et respectueux de la nature.

Ignacy Sachs

Table des matières

Préface	3
Remerciements	6
Introduction	7
Chapitre 1. Les enjeux scientifiques du stockage géologique du CO ₂	11
Chapitre 2. Enjeux techniques du stockage géologique du CO ₂	19
Chapitre 3. Les enjeux économiques	29
Chapitre 4. Risque et perception du public	37
Chapitre 5. Acceptabilité sociale et planification territoriale, éléments de réflexion à partir de l'éolien et du stockage du CO ₂	45
Chapitre 6. Le point de vue du RAC-F	61
Chapitre 7. Des recommandations citoyennes sur le captage et le stockage du CO ₂	69
Chapitre 8. Captage et stockage de CO ₂ , le retour du charbon sur la scène internationale	73
Chapitre 9. Quelques ouvertures d'un « atelier de dialogue » : l'acceptabilité sociale du CSC	83
Chapitre 10. Synthèse de littérature sur l'acceptabilité sociale du captage et du stockage du CO ₂	111
Chapitre 11. METSTOR, la cartographie interactive au service de l'implication des citoyens	133
Chapitre 12. CSC en Europe : contribution de la coalition Zero Emission Platform (ZEP).....	147
Conclusion	153
Glossaire	157
Les auteurs	162

Remerciements

Nous remercions au premier chef la soixantaine de participants à l'atelier de travail sur la perception et l'acceptabilité du stockage géologique du CO₂ en France, participants issus des administrations, de la société civile, du secteur industriel et du monde académique. La qualité des débats et des questionnements lors de cet atelier ont été à l'origine de la publication de cet ouvrage.

Nous remercions aussi pour leur soutien financier l'Agence nationale de la Recherche (ANR, projet SOCECO2) et l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'Énergie (Ademe, METSTOR) qui ont financé les projets de recherche sur les problématiques de la perception et de l'acceptabilité du stockage géologique du CO₂ et ont permis la tenue de cet atelier.

Merci à Nadia Belalimat qui a eu la patience de relire le manuscrit et d'y apporter des corrections ô combien nécessaires.

Enfin, nous remercions tous nos collègues qui ont fait du Cired un lieu exceptionnel de liberté intellectuelle et de foisonnement des idées au service des enjeux collectifs.

Introduction

NACEUR CHAABANE, BENOÎT DE GUILLEBON, MINH HA-DUONG

Il n'est aujourd'hui plus possible de nier la réalité du réchauffement climatique ni le fait que l'activité humaine, à travers ses émissions de gaz à effet de serre et en particulier de CO₂, en est le principal facteur. Sous peine de s'engager en *terra incognita* en matière climatique, avec tous les risques que cela représente pour l'humanité, il est impératif que nous réussissions à réduire de manière drastique les émissions de CO₂ dans l'atmosphère au niveau mondial. C'est ce qui a été traduit en France par « l'objectif Facteur 4 », c'est-à-dire l'objectif de diviser par quatre les émissions françaises de CO₂ d'ici 2050.

Pour atteindre un tel objectif, il va falloir à la fois des évolutions technologiques majeures et des changements de comportements qui vont prendre du temps. Un mode de vie durable à long terme serait basé sur les énergies renouvelables avec de fortes économies d'énergie par rapport aux modes de consommation actuels. Mais d'ici là, l'urgence du problème implique de déployer des réponses basées sur les technologies existantes ou rapidement disponibles à l'échelle nécessaire. C'est pourquoi la technologie de captage et de stockage du CO₂ suscite aujourd'hui un intérêt important.

Elle consiste à capter le CO₂ émis par les grandes unités industrielles (centrales électriques au gaz ou au charbon, incinérateurs, chaudières, etc.), puis à l'injecter dans des structures géologiques pour qu'il y soit stocké sur de très longues périodes, c'est-à-dire des millénaires. La technologie de captage et de stockage du CO₂ est désignée par l'acronyme CSC ou CCS en anglais (*Carbon Capture and Storage*).

Moyennant un effort de recherche, développement et démonstration (RD&D) se comptant en milliards d'euros par an pendant les 15 prochaines années, on semble tenir là une option susceptible de réduire significativement les émissions de CO₂ de l'humanité d'ici 2050.

La technologie du CSC a pour objectif évident de lutter contre le changement climatique et par là même d'améliorer la vie des hommes : elle pourrait donc potentiellement jouir d'un *a priori* favorable au sein du public. Mais un potentiel favorable ne suffit pas à constituer un consensus politique national, et encore moins à poser des établissements industriels de captage et de stockage dans les communes de France. Cet ouvrage propose d'entrer dans une discussion dont la problématique générale est la suivante :

– l’invocation de cette technologie s’inscrit dans les débats en cours sur les choix nationaux et internationaux de politique énergétique. Ainsi, certains citoyens ne sont pas vraiment prêts à accepter une énergie plus chère pour minimiser les émissions de CO₂ et limiter le changement climatique. D’autres prônent au contraire un basculement massif et rapide vers les énergies renouvelables, accompagné d’une décroissance de la demande, qui rendrait inutile la solution de transition qu’est le captage et stockage du CO₂ ;

– certains industriels dont le processus de production produit du CO₂, comme dans le ciment et l’acier, sont déjà engagés dans la réduction des émissions de CO₂. Or leurs méthodes actuelles approchent de leurs limites d’efficacité, et ils comptent sur le CSC pour pouvoir aller plus loin ;

– la mise en œuvre du CSC présente des risques, principalement des risques de fuite au niveau du stockage. Ces risques étant localisés géographiquement, se pose, comme dans le cas de l’incinération des déchets par exemple, le problème de l’acceptabilité locale d’installations d’intérêt national voire global ;

– enfin, il s’agit d’une technologie qui doit permettre de garder le CO₂ piégé pendant des centaines voire des milliers d’années. Se pose alors la question de la certitude scientifique, du maintien des compétences et des moyens financiers permettant d’assurer une performance à très long terme.

Historiquement, depuis l’époque moderne et industrielle, on a pu constater que la science et la technique avancent parfois plus vite que la société civile. Cela pourrait bien être le cas pour le CSC : les chercheurs et les industriels sont en effet déjà mobilisés autour de programmes de recherche et de démonstration, comme par exemple le projet pilote de Total à Lacq. Les politiques, et encore plus le grand public, sont-ils bien informés ?

Or une prise de conscience trop retardée, qui ne permettrait pas à tous les acteurs de faire valoir leurs arguments, pourrait entraver l’acceptabilité sociale. L’expérience du nucléaire ou plus récemment de l’éolien, ou dans un autre registre celle des OGM et des nanotechnologies, montrent tout le risque qu’il y a à ne pas mener de front une réflexion technique et une prise de conscience sociale sur les usages et les risques acceptables de la technologie. Cet ouvrage a pour ambition de contribuer à poser un tel dialogue.

Au moment où l’on assiste aux premières expériences scientifiques et industrielles sur le captage et le stockage du CO₂, le regard que porte le public sur cette technologie devient un facteur essentiel, aussi bien pour le succès des projets pilotes, que pour la détermination de la future trajectoire de son développement industriel envisageable à grande échelle. D’une discussion large et bien relayée sur cette technologie peut naître, sinon un consensus, au moins une compréhension commune des choix faits par les décideurs politiques et industriels.

C’est dans cette perspective que le Cired et l’Apesa ont organisé le 27 avril 2007 un atelier de travail sur le captage et stockage du CO₂. Celui-ci a permis, à un stade encore précoce de développement des technologies, des exposés introductifs à visée pédagogiques, suivis d’un échange entre une cinquantaine de personnes sélectionnées pour leur représentativité des différentes parties prenantes (scientifiques, industriels, services de l’état, collectivités, associations, journalistes...). L’atelier visait à dégager les grands enjeux sociaux de la capture et du stockage du CO₂.

À cette occasion, nous avons mesuré le manque d’ouvrages en français sur le sujet. À notre connaissance, aucun n’aborde la question sous l’angle du dialogue social. Les publications existantes sont orientées vers l’exposé de la technique, de la géologie et

minoritairement de l'économie. Il s'agit pourtant d'une nouvelle technologie impliquant l'environnement, le long terme, et mobilisant des quantités industrielles de matière (même si c'est un gaz présent dans l'air que nous respirons). Dans ces conditions, la question de la politique publique sera aussi importante que celle de l'ingénierie.

Ce livre a donc été conçu pour informer un public plus large encore des enjeux de cette technologie. Toutes les parties prenantes intéressées par le captage et le stockage du CO₂ – industriels, membres des associations environnementales, fonctionnaires, élus et citoyens riverains – y trouveront exposés des arguments à même de nourrir des débats mieux éclairés.

L'ouvrage est organisé en trois parties. La première constitue une introduction à la technologie de captage et de stockage du CO₂. En quatre chapitres, les meilleurs spécialistes français abordent successivement les questions scientifiques, techniques, économiques et sociales :

- Cette technologie est-elle une réponse satisfaisante et nécessaire au changement climatique, devant les autres options disponibles ?
- Quel est son potentiel de développement en France, compte tenu des réalités géologiques et industrielles ?
- À quel point son coût pourrait-il majorer notre facture énergétique ?
- Quels débats de politique publique soulève-t-elle ?

La seconde partie de l'ouvrage aborde spécifiquement la question de l'acceptabilité. L'approche se fait sur le mode participatif et non académique : il s'agit d'écouter des parties prenantes. Le chapitre 5 est consacré aux leçons de la planification du développement de l'énergie éolienne, afin d'établir un état des lieux en France quant à la décision participative. On s'intéresse ensuite à la position de deux acteurs clés non gouvernementaux avec le chapitre 6, qui présente le point de vue d'une association environnementale, le Réseau Action Climat France, et le chapitre 7 qui rend compte des recommandations d'un jury de citoyens organisé par l'association EpE, Entreprises Pour l'Environnement. Le chapitre 8 analyse les aspects stratégiques de l'émergence du CSC, essentielle à la survie du charbon dans la bataille industrielle entre les sources d'énergie sous la contrainte climatique.

Enfin, la dernière partie de l'ouvrage propose trois contributions spécifiques du projet de recherche METSTOR à l'origine de cette journée de dialogue. Il s'agit d'abord d'une revue de la littérature sur l'acceptabilité du CSC. Puis nous exposons une synthèse du débat organisé entre scientifiques, industriels, services de l'état, collectivités, associations et journalistes, dialoguant trois heures ensemble pour la première fois en France sur ce sujet. Enfin, nous présentons le système d'information géographique réalisé par le projet. Mis à la libre disposition du public autant que des industriels intéressés par le stockage du CO₂, cet outil caractérise une évolution de l'approche de la décision en matière d'environnement dans la société française du début du XXI^e siècle : mettre la meilleure information disponible à disposition des citoyens, gratuitement, instantanément, anonymement et sans demande de justification.

Chapitre 1

Les enjeux scientifiques du stockage géologique du CO₂

ALAIN BONNEVILLE

Introduction

L'effet de serre est essentiel au maintien de la vie sur Terre, mais son augmentation rapide et mal contrôlée est néfaste car elle entraîne des désordres climatiques. C'est bien tout l'enjeu du combat contre l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère engagé par de nombreux gouvernements ou agences intergouvernementales depuis le début des années 1990. Sans entrer dans le débat sur la validité des modèles de prédiction du réchauffement climatique pour les 100 ans à venir, une chose est certaine : la teneur en gaz à effet de serre dans l'atmosphère, et notamment en CO₂, responsable à près de 63% de cet effet de serre, a crû de façon continue et importante depuis 150 ans à cause de l'activité humaine et il convient de prendre rapidement des mesures pour juguler cette augmentation.

Après avoir rappelé les évidences actuelles du réchauffement global de la Terre et de ses causes les plus probables, nous présenterons la filière Capture et Stockage du CO₂ (CSC) qui est l'un des moyens pouvant être mis en œuvre à courte échéance pour limiter de façon notable les émissions de CO₂.

L'évidence du réchauffement global

Le premier constat que l'on puisse faire est l'évidence du réchauffement global de la surface de la Terre depuis 150 ans. Trois observations tirées du rapport du GIEC de février 2007 (figure 1.1) en témoignent. Tout d'abord, la température moyenne de surface du globe montre une augmentation de plus de 1 °C depuis 1850. Elle s'accompagne de l'augmentation du niveau moyen des mers d'une vingtaine de centimètres sur la même

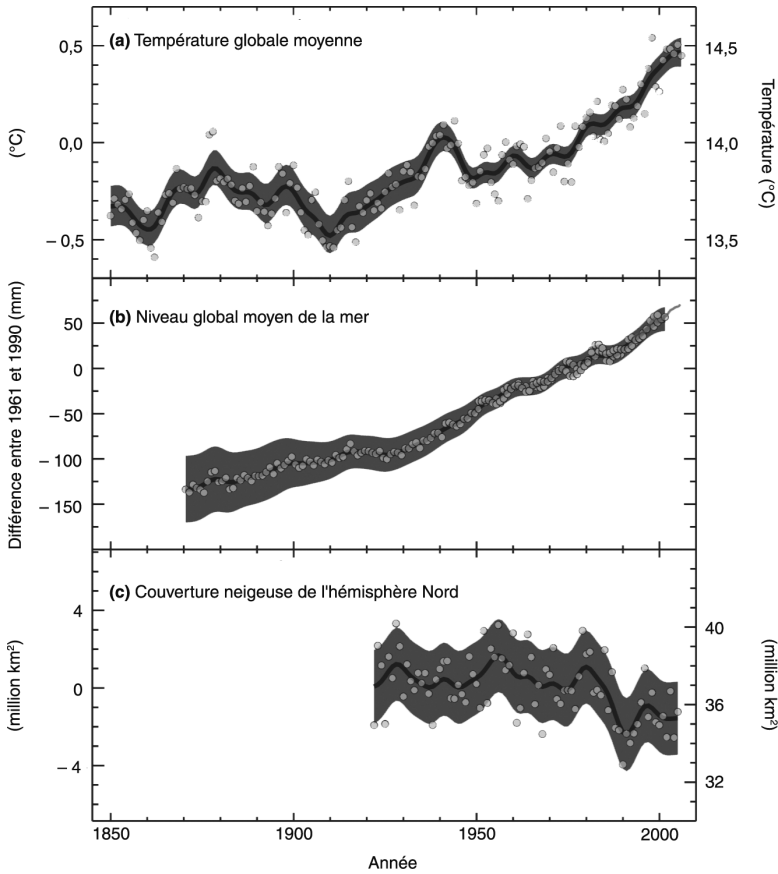


Figure 1.1. Observations des effets du réchauffement global de 1850 à 2005.
Source : IPCC 2007 (WG1-AR4)

période, phénomène qui s'explique principalement par l'expansion thermique des océans et la fonte des glaciers terrestres observée ces dernières années. Enfin, on constate depuis 1920 une diminution de la couverture neigeuse de l'hémisphère nord, qui s'est accentuée depuis 1970. On constate de plus une accélération récente de l'augmentation de la température moyenne du globe avec les 12 années les plus chaudes observées sur la période 1990-2006.

Les origines de ce réchauffement

Quelles peuvent être les contraintes naturelles et anthropiques sur l'augmentation de température moyenne constatée ? Selon le GIEC, la cause principale serait l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre notamment du dioxyde de carbone (CO₂), du méthane (CH₄) et du protoxyde d'azote (N₂O). En effet, la concentration de ces trente dernières années excède de loin les valeurs pré-industrielles qui varient peu jusqu'en 1850. La teneur en CO₂, relativement constante depuis 10 000 ans, est ainsi passée de 280 à 370 ppm durant cette période (figure 1.2).

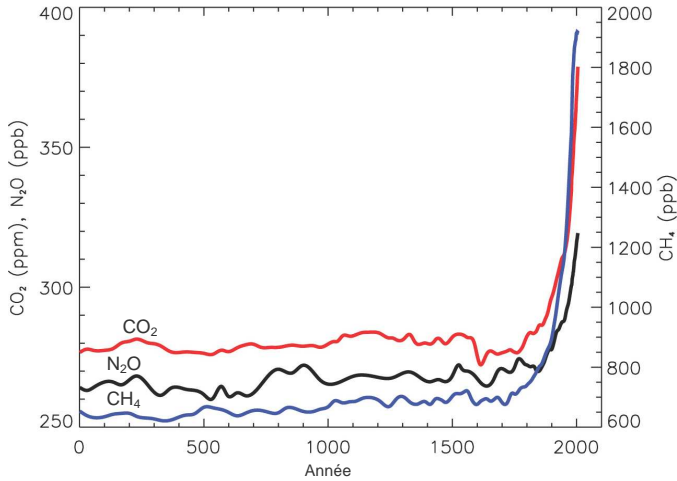


Figure 1.2. Évolution des concentrations en N₂O, CH₄ et CO₂ dans l'atmosphère depuis 2000 ans.

Sur une plus longue période de temps, l'analyse des carottes de glace de l'Antarctique démontre que les concentrations actuelles en CO₂ et en méthane excèdent de loin tout ce qui était connu depuis 650 000 ans (figure 1.3).

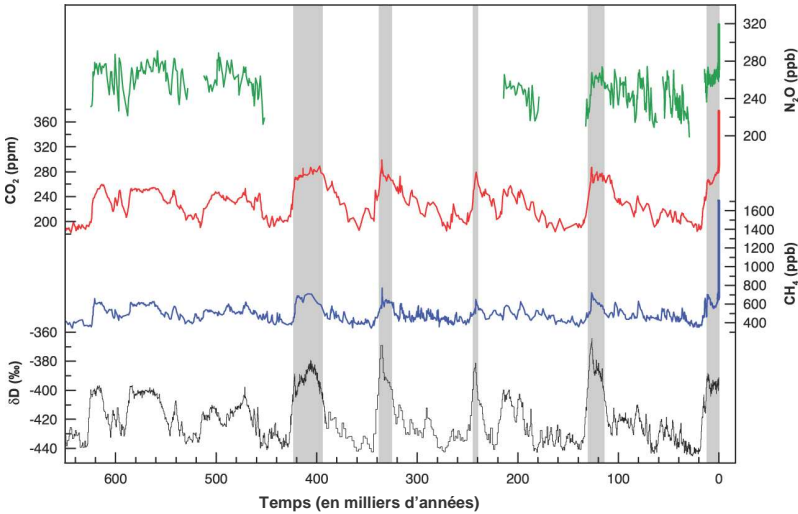


Figure 1.3. Évolution des concentrations en N₂O, CH₄, CO₂ et rapport isotopique δD ¹H/²H depuis 650 000 ans.

Depuis 1850, on observe une corrélation entre l'augmentation de la température moyenne du globe et celle des gaz à effet de serre. Mais corrélation n'est pas raison et connaissant depuis le XIX^e siècle la plupart des mécanismes physiques impliqués dans le bilan thermique de l'atmosphère, il est possible de concevoir des modèles permettant

de déterminer la température de surface de la Terre à partir des différents facteurs de forçage que sont l'activité solaire, les gaz à effet de serre et les éruptions volcaniques. Notons que certains effets sont encore mal maîtrisés et font encore l'objet de nombreuses études (variations de l'albédo terrestre, rétroaction des nuages, etc.).

Ainsi, si l'on ne prend en compte que l'activité du Soleil et l'activité volcanique on peut relativement bien expliquer la tendance au réchauffement jusqu'en 1960 et de façon moins nette jusqu'en 1980 (figure 1.4b). L'augmentation de l'activité solaire depuis le début du XX^e siècle étant la cause majeure du réchauffement alors que les principales éruptions volcaniques du siècle qui ont émis de grandes quantités de poussières dans l'atmosphère se sont traduits par un forçage négatif, à savoir un refroidissement.

En revanche, à partir de 1980, l'activité solaire et les éruptions volcaniques ne peuvent plus rendre compte de l'anomalie de température moyenne du globe observée et on est obligé de rajouter l'impact des gaz à effet de serre (figure 1.4a) pour l'expliquer. L'augmentation des gaz à effet de serre et principalement du CO₂ due à l'activité humaine est très vraisemblablement la principale responsable de l'augmentation de la

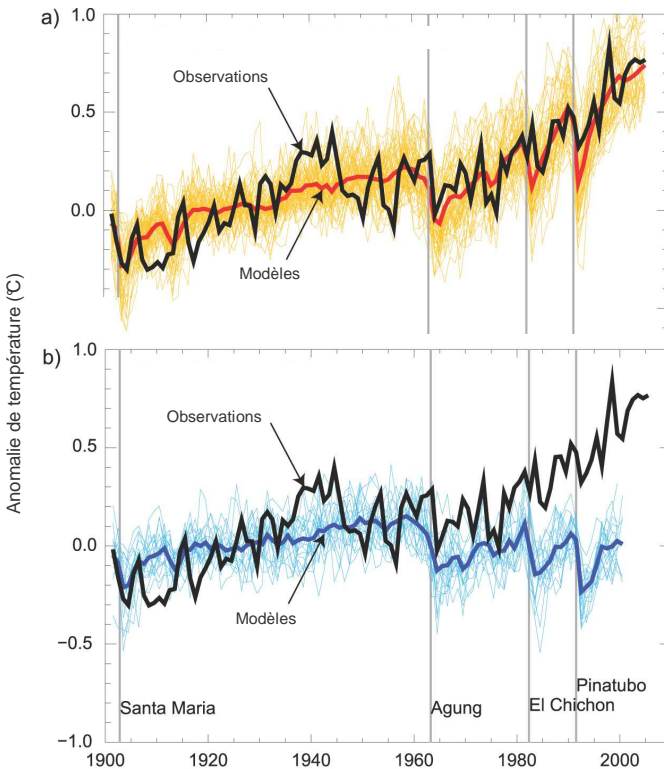


Figure 1.4. Modélisation de la variation de l'anomalie de température de 1900 à 2005 (écart par rapport à la température de 1990) : a) en prenant en compte les gaz à effet de serre émis par les activités humaines ; b) en ne considérant que l'effet du soleil et des éruptions volcaniques. Les valeurs observées sont en trait continu noir et les valeurs prédites en trait gris.

Sources : IPCC Fourth Assessment Report, Climate Change 2007 (AR4).

température du globe depuis 30 ans. Les chiffres sont parlants : les émissions de CO₂ sont passées de 6,4 Gt (1 gigatonne = 10⁹ tonnes) de carbone par an dans les années 1990 à 7,2 Gt dans les années 2000-2005 et elles sont d'environ 8 Gt à l'heure actuelle. Le facteur radiatif forçant du CO₂ a augmenté à lui seul de 20 % entre 1995 et 2005.

Les sources de CO₂

Le CO₂ est le produit direct de la combustion des composés carbonés qui produit des résidus de combustion avec un fort dégagement d'énergie.

Ces comburants sont de nature variée. Ils furent, au cours du temps, le bois, le charbon et, depuis le milieu du XX^e siècle principalement, des hydrocarbures gazeux ou liquides qui ont supplanté progressivement les autres sources de carbone. On parle d'énergies fossiles, car non renouvelables à l'échelle de la vie humaine, et donc en opposition aux énergies renouvelables à cette échelle de temps (solaire, éolien, géothermie). On peut imaginer de se passer complètement des hydrocarbures ou du charbon pour la production d'énergie à l'horizon 2100 et de nombreux scénarii existent de passage à une économie tout hydrogène, mais pour les 40 à 50 ans qui viennent, nous serons encore très dépendants de ces deux sources d'énergie, d'autant plus que de nombreux pays connaissent une très forte croissance, gourmande en énergie, notamment la Chine et l'Inde.

Nous avons des ressources en pétrole pour 50 ans, en gaz pour 200 et en charbon pour cinq siècles. La question urgente n'est donc pas comment envisager de se passer d'hydrocarbures ou de charbon mais plutôt comment diminuer l'impact sur l'environnement de leur consommation, tout au moins pour les 50 ans à venir ; après, le progrès technologique aidant, on peut imaginer que le problème soit résolu.

Avant d'envisager les solutions possibles pour cette diminution, voyons d'où vient le CO₂. L'activité humaine génère annuellement 8 Gt de carbone soit 26 Gt de CO₂ : 67% de ces émissions viennent de sources non concentrées (transport, chauffage urbain, agriculture) et elles représentent la majeure partie des émissions. Sur ces sources, on peut jouer principalement en diminuant la quantité de CO₂ produit (amélioration du rendement des moteurs et des chaudières, isolation des bâtiments...) car une fois le CO₂ rejeté dans l'atmosphère on ne peut pas le recapter facilement. Et puis, il y a des sources concentrées qui émettent typiquement plus de 100 000 t de CO₂ par an : ce sont les sites industriels et principalement les centrales électriques thermiques et les gisements de pétrole ou de gaz, souvent riches en CO₂ qu'il faut éliminer avant de transporter le produit.

Comment stabiliser les émissions ?

On peut déjà effectuer des prévisions pour les 40 prochaines années. Notre émission de CO₂ actuelle correspond à peu près à 8 Gt de carbone par an et si l'on ne fait rien, on arrivera à 14 Gt de carbone par an en 2050. Pour stabiliser la concentration de CO₂ dans l'atmosphère à 500 ppm à l'horizon 2050, sachant qu'elle est actuellement de 380 ppm, il faudrait émettre 7 Gt de carbone par an. Comment passer de 14 à 7 Gt de carbone ? Plusieurs solutions peuvent être mises en œuvre : l'utilisation d'énergies renouvelables, l'augmentation des surfaces couvertes par les forêts, l'utilisation du nucléaire, etc. La capture et le stockage du CO₂ ne représente qu'une solution parmi d'autres et il faut bien comprendre qu'aucune d'entre elles, prise isolément, ne peut résoudre le problème.

C'est bien une stratégie globale qui doit être mise en œuvre pour stabiliser à un niveau raisonnable la concentration en CO₂ dans l'atmosphère à l'horizon 2050.

S'il l'on produit du CO₂, et que l'on veuille diminuer sa teneur dans l'atmosphère, il faut le séquestrer. Les puits de carbone naturels comme l'océan, les forêts et les sols sont les seuls moyens permettant globalement de prélever du CO₂ dans l'atmosphère. L'homme peut augmenter l'efficacité des puits naturels en fertilisant l'océan, en augmentant la surface des forêts ou en ayant une politique active ou raisonnée d'utilisation des sols et notamment des surfaces agricoles. Mais il peut aussi agir à la source en capturant le CO₂ à la sortie des sites de production et en le stockant dans des réservoirs souterrains ; c'est l'ensemble de cette chaîne qui constitue la filière « Capture et stockage du CO₂ ».

Captage et stockage du CO₂

Le capture consiste à séparer le CO₂ du mélange gazeux produit par les sites industriels. Il existe trois types de procédé : la capture post-combustion, l'oxycombustion et la capture pré-combustion.

De nombreux travaux sur la capture du CO₂ ont été menés au niveau international dans le cadre de projets pilotés par des organismes nationaux ou des industries ; c'est un point clé de l'ensemble de la chaîne car il en conditionne le coût. Le programme GHG (*Greenhouse Gas R&D*) sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie (IEA) constitue de ce point de vue une source considérable d'information.

Une fois le CO₂ capturé, il faut le transporter grâce à des gazoducs jusqu'au lieu où il sera stocké. On a envisagé un temps le stockage au fond de l'océan, mais cette option n'est plus retenue et c'est la séquestration dans des formations géologiques souterraines profondes qui lui est actuellement préférée.

Stockage géologique du CO₂

Le CO₂ peut être séquestré dans les formations géologiques de trois façons :

– sous forme d'un gaz ou d'un fluide supercritique, sous un toit imperméable, comme dans un gisement de gaz naturel, ou dans un aquifère. On parle alors de piégeage hydrodynamique. Le CO₂ reste dans le réservoir à la faveur de pièges structuraux ou stratigraphiques et des contrastes de densité entre la phase supercritique CO₂ et l'eau de formation. Ce type de piégeage est aussi connu sur le nom de « piégeage physique » ; le CO₂ supercritique est alors une phase libre occupant les espaces poreux ;

– dissous dans la phase fluide sous la forme de [H₂CO₃], [HCO₃⁻] ou [CO₃²⁻]. Dans ce cas, le CO₂ est dissous par l'eau de formation et est transporté par des mécanismes de diffusion-advection dans l'aquifère ;

– en réagissant avec les minéraux ou la matière organique des formations géologiques jusqu'à faire partie de la matrice solide. Le CO₂ est piégé en formant des carbonates (carbonates de Ca, Fe et Mg). On parle de piégeage minéral. C'est un phénomène lent qui implique une étude précise de la cinétique de ces réactions. Il faut noter que le piégeage minéral peut avoir des conséquences sur la porosité et la perméabilité du réservoir.

Deux grands types de formation géologique favorables au stockage du CO₂ sont généralement considérés :

– les gisements d'hydrocarbures (huile/gaz) exploités ou en fin d'exploitation. Ce sont de bonnes structures de piégeage, étanches (tout au moins aux gaz non réactifs), bien connues et avec un intérêt économique certain si l'injection de CO₂ permet en outre de récupérer du pétrole ou du gaz (récupération assistée) ;

– les aquifères salins, qui présentent une grande capacité de stockage mais sont généralement peu connus. Leur eau est non potable.

Plus marginalement, mais cela peut prendre de l'importance, le stockage dans des veines de charbon non exploitées (récupération de méthane possible, mais volumes poreux et perméabilité faibles) et dans des roches basiques (stockage minéral possible).

Les enjeux

Le principal enjeu du stockage géologique est de contribuer significativement à diminuer la concentration en CO₂ de l'atmosphère et à stabiliser cette teneur à l'horizon de 2050. Son principal défi consiste évidemment à garantir que le stockage soit efficace pour le but recherché et sans danger pour les biens et personnes à proximité.

Une avancée des connaissances est nécessaire pour répondre à quelques questions importantes, et pour lesquelles la communauté française a des atouts certains :

- en géochimie :
 - étudier la stabilité (température, pression...) des phases qui incorporent du CO₂, les mécanismes et les médiateurs d'incorporation (biogéochimiques, géochimiques),
 - évaluer les cinétiques de formation/destruction de ces phases,
 - quantifier les transferts de matière associés ;
- en géophysique, modéliser et surveiller :
 - la stabilité physique du réservoir lors de la montée en pression (évolution du champ de contrainte),
 - la perméabilité/porosité du réservoir en réponse à l'injection de CO₂ (par exemple, ouverture et colmatage des fissures),
 - le fluage des roches soumises à la circulation d'un fluide réactif et l'évolution à long terme (5000 ans) des propriétés mécaniques du réservoir.

Plus particulièrement, l'un des problèmes actuellement mal connus est la réactivité chimique, à différentes échelles de temps et d'espace, de fluides riches en CO₂ avec les principaux minéraux du réservoir. Les études doivent être conduites à des pressions élevées (plusieurs centaines de bars) et des températures de l'ordre de quelques dizaines de degrés, à l'échelle de l'interface fluide/minéral (échelle moléculaire, nm à μm), et dans des conditions thermodynamiques variables : loin de l'équilibre (début du processus) et proches de l'équilibre où les affinités chimiques sont faibles (stade plus avancé du processus). Dans le cas de stockage dans des gisements d'hydrocarbures épuisés, la modélisation du comportement thermodynamique de systèmes (eau salée, CO₂, hydrocarbures) à forte pression et forte température, mérite encore une recherche académique. Par ailleurs, connaître la réactivité de ces fluides profonds avec les roches encaissantes, c'est d'une part étudier la solubilité dans ces fluides des différents minéraux caractéristiques d'un site de stockage éventuel et d'autre part étudier les phases minérales spécifiques nouvellement formées au cours des réactions.

Comprendre les circulations en milieu poreux et les modéliser correctement implique aussi de prendre en compte les aspects de dissolution et de colmatage par le fluide qui circule et leur effet sur les propriétés hydrauliques des roches poreuses ou

fracturées. De même, il faut prendre en compte le régime des contraintes, une compression ayant pour effet d'augmenter localement la solubilité d'un minéral dans un fluide et d'induire des transferts locaux de matière. L'intégration des évolutions géochimiques, mécaniques et thermiques des roches réservoirs et éventuellement des couvertures, ainsi que les différents couplages associés, seront les objets de ces études.

Il est également important d'étudier des analogues naturels du stockage. Il existe par exemple des provinces géologiques dans lesquelles de grandes quantités de CO₂ ont circulé sur de grandes échelles de temps (province carbo-gazeuse du sud-est de la France notamment) permettant d'aborder l'évolution à long terme du milieu poreux naturel soumis à de telles circulations.

Enfin, le devenir du CO₂ en profondeur est probablement lié à l'existence d'une biosphère, ou bien intrinsèque, ou bien injectée lors des forages ou de l'injection du fluide. L'interaction à toutes les échelles de temps, y compris courtes, entre le CO₂ injecté et cette biosphère microbienne du sous-sol, est une question qui se posera quelle que soit l'évolution conceptuelle dans ce domaine. Le rôle exact de cette biosphère et son importance sont encore inconnus.

Conclusion

En agissant sur les sources concentrées de CO₂ qui représentent plus de la moitié des émissions en Europe, la filière Capture et stockage du CO₂ représente un élément incontournable de la stratégie de lutte contre le réchauffement climatique.

De la phase de recherche très spéculative des années 1990, on est passé à une phase plus opérationnelle et il existe déjà plusieurs sites de stockage géologique du CO₂ : Sleipner en mer du Nord, Weyburn au Canada et In Salah en Algérie. D'autres sites de stockage sont actuellement programmés et au moins une dizaine de sites pilote d'injection devraient être opérationnels en Europe à l'horizon 2012. Les projets de taille vraiment industrielle devraient voir le jour dès 2020.

De nombreuses questions fondamentales restent encore à résoudre et des projets ambitieux font l'objet en France d'efforts importants tant dans l'industrie que dans les organismes de recherche publique.