



HAL
open science

Captage et stockage du CO₂: une technologie de transition socialement acceptable ?

Bastien Beley, Laurent Levent, Antonin Pottier

► To cite this version:

Bastien Beley, Laurent Levent, Antonin Pottier. Captage et stockage du CO₂: une technologie de transition socialement acceptable?. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2010. hal-01781753

HAL Id: hal-01781753

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-01781753>

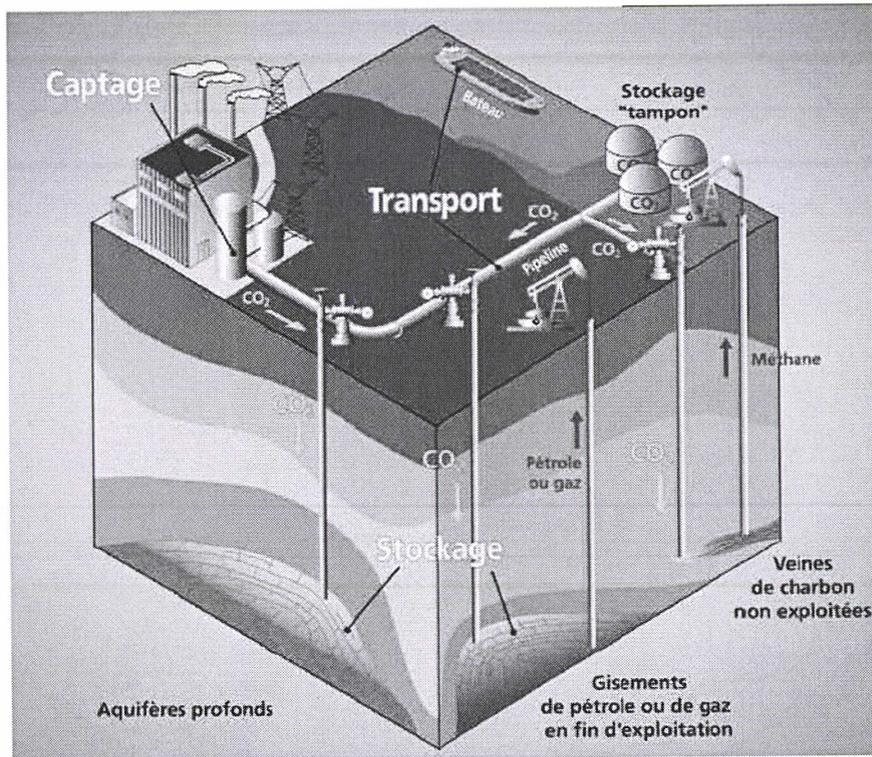
Submitted on 30 Apr 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Captage et stockage du CO₂

Une technologie de transition socialement acceptable ?



MINES ParisTech
Bibliothèque
IE 1 [512]

Bastien BELEY
Laurent LEVENT
Antonin POTTIER

Septembre 2010

Avant-propos

Ce mémoire a été réalisé dans le cadre de la dernière année de formation des ingénieurs des Mines. Invités à nous interroger sur le thème du CO₂, nous avons choisi dans ce vaste sujet de traiter la question de l'acceptabilité sociale de la technique de captage et stockage du dioxyde de carbone (que l'on abrégera en CSC dans la suite), dans le cadre de la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre (GES). Cette problématique nous a paru intéressante pour montrer les enjeux et les difficultés de toute politique industrielle, ainsi que les stratégies des acteurs participant à cette politique, ce qui nous entraîne loin parfois de notre objet initial.

Pour mener à bien ce travail, nous avons procédé à des lectures de documentation scientifique, de brochures d'informations, de sites internet – quelques-unes de ces références seront citées au fil du mémoire ; surtout nous avons rencontré de nombreux acteurs de la filière, tant au sein des entreprises, de l'Etat que des associations. Ce mémoire doit beaucoup aux personnes qui ont gracieusement accepté de nous recevoir, et nous les remercions vivement de toute l'aide qu'ils nous ont apportée.

Aborder notre sujet par les acteurs eux-mêmes et leur perception nous permet de rendre compte des dynamiques internes. La matière fournie par tous nos entretiens apporte, croyons-nous, une originalité par rapport à des études similaires. Quoiqu'il en soit, le mémoire n'est pas une transcription fidèle des entretiens, mais une élaboration personnelle à partir des matériaux récoltés lors de ceux-ci; il exprime une interprétation subjective critique des vues qui ont été exposées devant nous, interprétation construite à partir tant de la documentation consultée que des recoupements, rapprochements, confrontations au sein des entretiens, de leur contexte, de ce qu'ils disaient comme de ce qu'ils taisaient.

Une note de dix pages, esquisse des thèses de ce mémoire, a été envoyée au mois de mars aux différentes personnes rencontrées. Grâce aux réactions que nous avons reçues, nous avons ainsi affiné et développé nos réflexions. Les opinions exprimées dans ce mémoire sont nos opinions propres, à nous élèves, et n'ont pas de liens avec la position éventuelle de l'Ecole des Mines, du Corps des Mines, ni des parties interrogées.

Le mémoire débute par un chapitre précisant le contexte du réchauffement climatique et de la lutte engagée contre les gaz à effet de serre. Les parties suivantes traitent ensuite de la technique du captage et du stockage du CO₂, des enjeux pour la France, des risques pour l'environnement et les personnes, et des intérêts des acteurs de la filière. La dernière partie regroupe nos propositions, tirées des analyses développées auparavant, pour envisager de manière sereine l'avenir de la filière du CSC en France, grâce à une politique de déploiement réussie impliquant les acteurs sociaux.

Chapitre I

Eléments de contexte : effet de serre et politiques climatiques

Le propos de ce chapitre introductif est de présenter le cadre général de la politique de lutte contre les gaz à effet de serre. Après une brève présentation historique sur la découverte de l'effet de serre, nous présentons les enseignements des travaux scientifiques sur le réchauffement climatique et sa cause. Nous analysons ensuite les différentes sources d'émissions de gaz à effet de serre. Nous exposons enfin les ambitions et les conséquences d'une politique de limitation du réchauffement climatique, ainsi que les moyens d'y arriver.

I.1 Une prise de conscience

En 1824, Joseph Fourier dans « Remarques générales sur la température du globe et des espaces planétaires » émet l'hypothèse que l'atmosphère retient la chaleur de la Terre dissipée par rayonnement. Il compare ce mécanisme à celui de la serre dont le principe a été mis en évidence à la fin du XVIII^e par le genevois Saussure.

Expliquons quel est ce mécanisme d'effet de serre. En l'absence d'atmosphère, la Terre dissipe la chaleur reçue du Soleil par rayonnement et atteint une température d'équilibre T_1 . La présence de l'atmosphère retient une partie du rayonnement émis par la Terre, qui est renvoyée vers la surface. Pour que l'énergie rayonnée, une fois passée le filtre de l'atmosphère, soit égale à l'énergie reçue du Soleil, la Terre doit donc émettre plus d'énergie, comparativement à la situation sans atmosphère. Elle s'échauffe donc jusqu'à une température T_2 , supérieure à T_1 . L'atmosphère joue pour la Terre le même rôle qu'une vitre pour une serre.



Rôle de l'effet de serre sur la température

Pouillet (1790-1868) et Tyndall (1820-1893) précisent ensuite le rôle de la vapeur et du gaz carbonique dans l'absorption du rayonnement infrarouge en provenance de la Terre. Svante Arrhénius établit définitivement la théorie de l'effet de serre en 1896. La publication de son ouvrage¹ *L'évolution des mondes* en 1907 vulgarise sa théorie ; dans ce livre Arrhénius s'interroge déjà sur l'effet de l'homme sur le climat. « On voit comment de très faibles

¹ Svante Arrhenius, *L'évolution des mondes*, Ch. Béranger éditeur, 1910.

changements de la composition de l'air atmosphérique peuvent avoir des conséquences considérables. La disparition de la moitié de l'acide carbonique existant causerait un refroidissement d'environ 4 degrés [...]. L'acide carbonique doublerait-il en quantité, que nous gagnerions 4 degrés. » Il ne manque pas de s'interroger sur les conséquences de la civilisation industrielle en plein essor. « La consommation annuelle de houille a atteint en 1907 environ 1 200 millions de tonnes et elle augmente rapidement. Cette quantité répand dans l'air environ 1/500 de sa teneur totale en acide carbonique. Bien que l'océan, en absorbant ce gaz, agisse comme un puissant régulateur, qui dissout environ les cinq sixièmes de celui produit, on peut concevoir que la très faible quantité répandue dans l'atmosphère puisse être modifiée, au cours des siècles, par la production industrielle. »

Après les réflexions d'Arrhénius, la recherche scientifique s'empare à nouveau des gaz à effet de serre dans les années 1950. Un article de 1957 de Revelle et Suess souligne que le carbone s'accumule dans l'atmosphère car l'océan est incapable de le recycler entièrement : « Les êtres humains procèdent actuellement à une expérience de géophysique à grande échelle d'un genre qui n'aurait jamais pu se produire dans le passé et qui ne pourra se reproduire dans l'avenir. En l'espace de quelques siècles, nous renvoyons dans l'atmosphère et les océans du carbone organique concentré accumulé sur des centaines de millions d'années dans les roches sédimentaires. » En 1958, Keeling lance à Hawaï une campagne de mesure de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère. Il constate d'une part l'oscillation annuelle due à la différence de végétation entre hémisphère Nord et hémisphère Sud et d'autre part un taux de croissance de la concentration de CO₂, d'environ 0,2 % dans la décennie 1960. Le débat sur le réchauffement climatique et son origine humaine est lancé dans la communauté scientifique. Les efforts des chercheurs seront dirigés dans les décennies suivantes pour préciser les nombreux mécanismes à l'œuvre et mieux comprendre les détails de l'effet de serre.

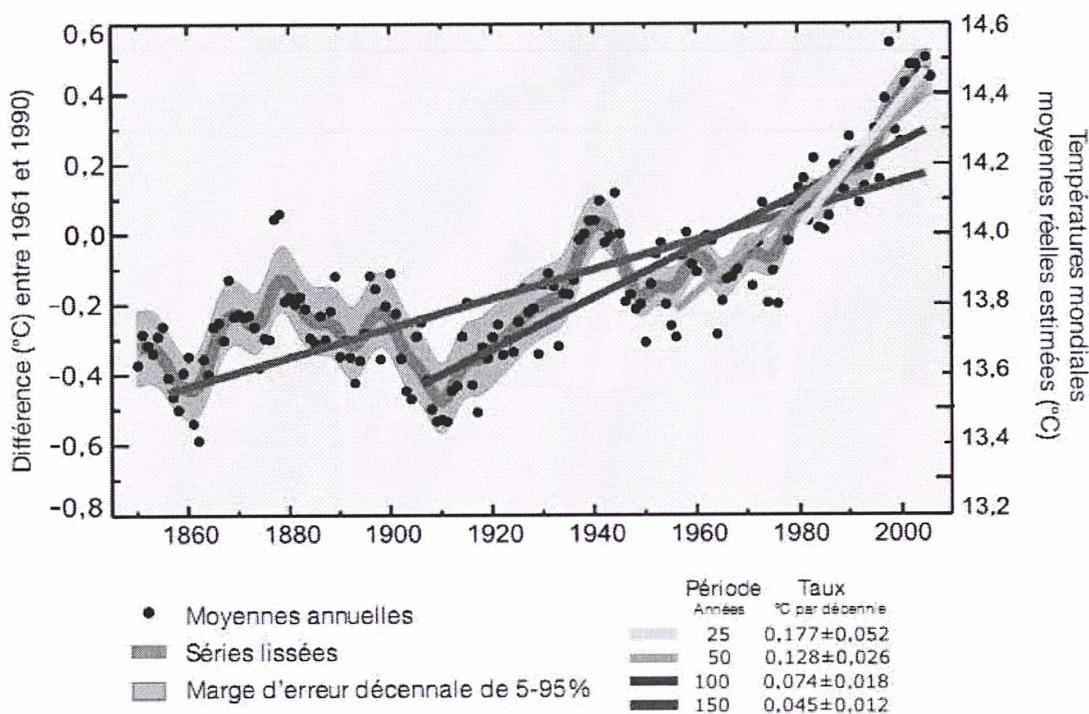
Le problème du réchauffement sort définitivement de l'ombre pour la communauté internationale en 1985, à Villach avec la conférence mondial sur le climat. La conférence de 1988 à Toronto sur ce thème est suivie par la création du GIEC, groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (en anglais Intergovernmental panel on climate change) sous l'égide du Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) et de l'Organisation météorologique mondiale (OMM). « Le GIEC a pour mission d'évaluer, sans parti pris et de façon méthodique, claire et objective, les informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique qui nous sont nécessaires pour mieux comprendre les fondements scientifiques des risques liés au changement climatique d'origine humaine, cerner plus précisément les conséquences possibles de ce changement et envisager d'éventuelles stratégies d'adaptation et d'atténuation. Il n'a pas pour mandat d'entreprendre des travaux de recherche ni de suivre l'évolution des variables climatologiques ou d'autres paramètres pertinents. Ses évaluations sont principalement fondées sur les publications scientifiques et techniques dont la valeur scientifique est largement reconnue. L'une des principales activités du GIEC consiste à procéder, à intervalles réguliers, à une évaluation de l'état des connaissances relatives au changement climatique. » (site internet du GIEC qui reprend les principes régissant le travail du GIEC, adoptés à la 14^{ème} Session, le 1^{er} octobre 1998, à Vienne, Autriche).

Cette colligation s'effectue au sein de trois groupes de travail² et donne lieu à publication de rapports d'évaluation à intervalle régulier (en 1990, 1995, 2001 et 2007 ; le prochain est prévu en 2014). La publication des rapports d'évaluation du GIEC est toujours un temps fort des débats sur le réchauffement climatique. Un résumé pour les décideurs des rapports est aussi écrit. Il s'agit là d'un texte destiné à être la base sur laquelle se prendront les décisions politiques, en conséquence il est voté mot à mot par les représentants des gouvernements. Si les formulations font la base de tractations diplomatiques, elles sont toujours prises dans le respect des faits scientifiques (voir le détail du processus de relecture mis en place sur le site internet du GIEC). Ce processus a fait l'objet de nombreuses critiques mais devrait être vu comme le garant d'une certaine prudence des communiqués du GIEC : les faits qui ne sont pas étayés scientifiquement ne passeraient pas cette barrière et certains Etats, en particulier les Etats pétroliers comme l'Arabie Saoudite, font valoir tous les travaux qui pourraient remettre en cause la théorie du réchauffement climatique.

Que nous apprend la lecture de ces rapports ?

I.2 Le réchauffement

A un niveau factuel, les rapports du GIEC mettent en évidence un réchauffement de la Terre. L'augmentation de la température globale de la Terre depuis les débuts de la révolution industrielle est d'environ 0,7 °C. Cette augmentation a tendance à être de plus en plus rapide comme le montre le graphique ci-dessous.



Moyennes annuelles mondiales de température et tendance linéaire
Source : [RT I, GIEC, 2007]

² Le groupe de travail I évalue les aspects scientifiques du système climatique et de l'évolution du climat ; le groupe de travail II s'occupe des questions concernant la vulnérabilité des systèmes socioéconomiques et naturels aux changements climatiques, les conséquences négatives et positives de ces changements et les possibilités de s'y adapter ; le groupe de travail III évalue les solutions envisageables pour limiter les émissions de gaz à effet de serre ou atténuer de toute autre manière les changements climatiques.

Pour interpréter correctement ces données, il faut prendre quelques précautions, indispensables en climatologie. Tout d'abord, ce qui fait l'objet de notre discussion ici est le climat. Le concept est difficile à appréhender, car le climat se caractérise par une série de paramètres comme la température annuelle moyenne, les précipitations annuelles, les variabilités de ces paramètres, les distributions de la température et des précipitations, le régime des vents etc. Le climat des différentes régions de la Terre est principalement déterminé par les mouvements des océans et de l'atmosphère. La différence de répartition de l'énergie venant du rayonnement solaire entre les pôles et l'équateur entraîne de gigantesques convections de ces enveloppes fluides. Entraînés par la rotation de la Terre, ces mouvements engendrent des grandes bandes parallèles à l'équateur (cellules de Hadley, de Ferrel, polaire). Interagissant avec les masses continentales, ils forment la circulation de Walker, une structure est-ouest. La rencontre de ces cellules atmosphériques et des courants océaniques avec le relief et la topographie de chaque région achève de donner la grande diversité de climats que connaît la Terre.

Il est important de souligner qu'un climat se perçoit sur une longue période, au moins 30 ans, valeur couramment admise. En conséquence les variations annuelles n'ont pas grand sens dans cette perspective, malgré leur retentissement médiatique disproportionné. La climatologie qui s'occupe de la machine thermique terrestre est donc différente de la météorologie, qui prédit le temps au jour le jour.

Une dernière précision concernera la notion de température globale. Cette notion de moyenne de la température à l'échelle du globe est difficile à comprendre, et la valeur compliquée à calculer ; les climatologues ont cependant les outils théoriques et pratiques pour le faire. Mais l'augmentation de la température globale n'est pas le seul indice du réchauffement climatique, même si il est le plus médiatique. Il y a un faisceau concordant de preuves qui montrent que la Terre se réchauffe : montée du niveau de la mer, avancement des dates de floraison, diminution de la surface de la banquise, recul des glaciers continentaux, évolution des climats équatoriaux, normalement très stables, etc.

Le constat du réchauffement climatique est général. Se pose maintenant la question de savoir quelle en est la cause.

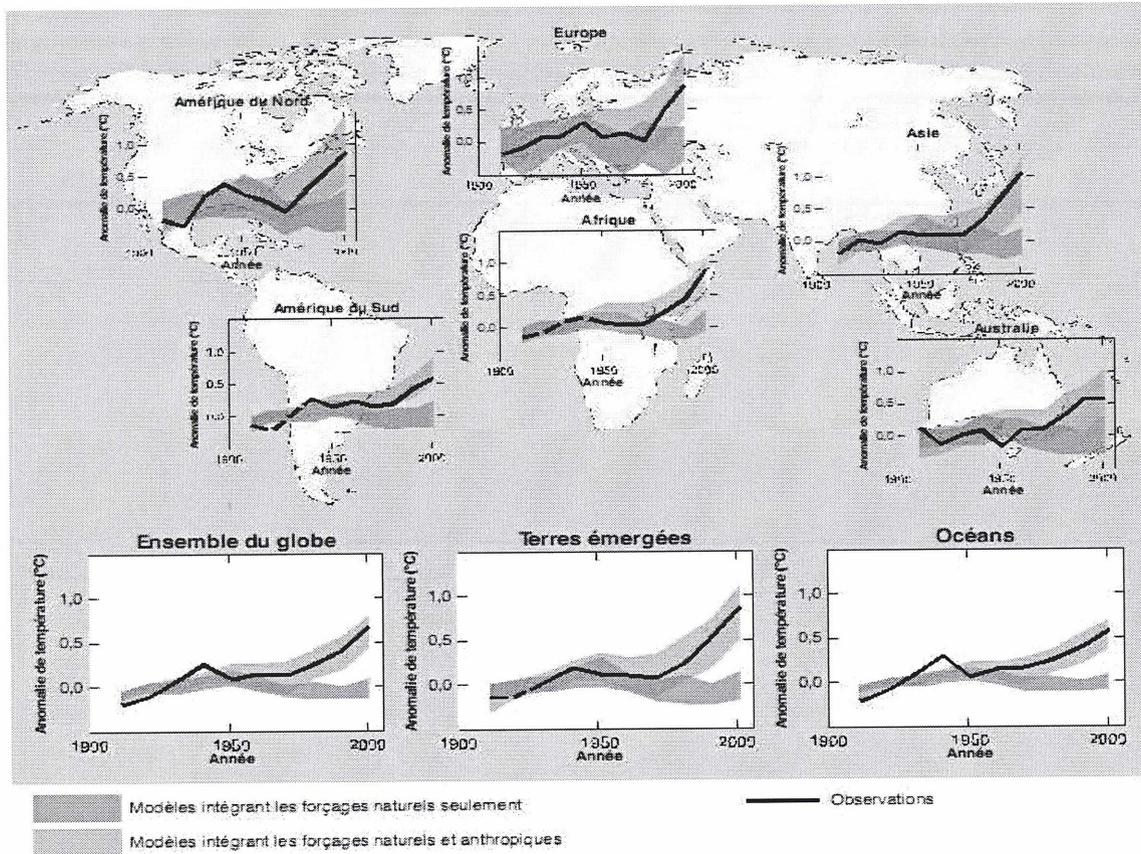
I.3 L'origine du réchauffement : l'effet de serre

Une fois établis les faits, la démarche scientifique cherche à expliquer et à comprendre. Pour certaines sciences il est possible de recourir à l'expérience qui permet de reproduire le phénomène étudié et de discriminer éventuellement entre les différentes théories explicatives. Pour les sciences « historiques », qui n'observent qu'un seul état du monde réalisé (comme la cosmologie, la planétologie, la géologie, la théorie de l'évolution), la démarche est différente. Il s'agit de produire un modèle interprétatif, reposant sur un certain nombre de principes, qui rend compte des faits observés. Généralement, les principes du modèle peuvent être testés en laboratoire, ce qui permet de vérifier chacun des maillons. C'est l'agencement de tous ces maillons théoriques qui crée la complexité, la sensibilité aux conditions initiales et rend une explication déterministe quasi impossible.

Pour comprendre le réchauffement climatique, les climatologues s'appuient sur des principes physiques et chimiques de base (rayonnement des corps, mécanique des fluides, thermodynamique) et construisent des modèles de circulation générale des fluides terrestres avec lesquels ils tentent de mimer le climat. Ces modèles sont devenus au fil des recherches de plus en plus complexes et intègrent maintenant l'atmosphère, l'océan, les sols, la banquise, les effets des aérosols, la dynamique végétale... Ces modèles retrouvent à peu près le climat

observé de la Terre en prenant des conditions aux limites qui sont les forçages radiatifs (la quantité d'énergie injectée dans le système climatique) dus au rayonnement solaire ou aux gaz à effet de serre. Précisons qu'il s'agit de véritables modèles physiques de fonctionnement du climat terrestre et non de simples régressions statistiques, comme on le croit parfois.

Ceci posé, voici le diagnostic que nous donnent les sciences du climat. **Les modèles actuels n'arrivent pas à rendre compte du réchauffement constaté sans le forçage dû aux émissions humaines de gaz à effet de serre (GES).** Ce fait est illustré ci-dessous.



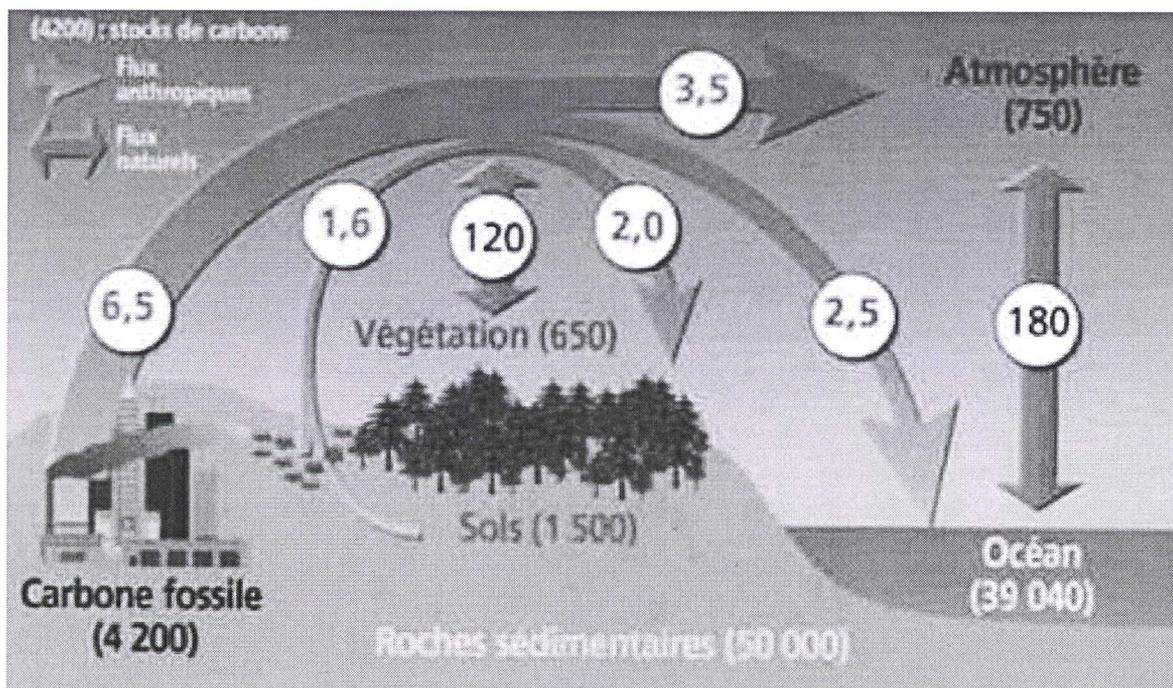
Anomalies de température aux niveaux mondial et continental
 Source : [RT I, GIEC, 2007]

En raccourci, et de manière imprécise, le réchauffement climatique observé est d'origine humaine. La confiance dans ce résultat s'est renforcée au fil des années avec la progression des recherches, comme en témoigne l'assurance croissante des rapports du GIEC. Extrait des *Résumés des éléments scientifiques à l'intention des décideurs* :

- 1995 : Le faisceau d'éléments disponibles suggère qu'il y a une influence perceptible de l'homme sur le climat global.
- 2001 : L'essentiel du réchauffement observé ces cinquante dernières années est probablement dû à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre.
- 2007 : L'essentiel de l'accroissement observé sur la température moyenne globale depuis le milieu du XX^e siècle est très probablement dû à l'augmentation observée des concentrations des gaz à effet de serre anthropiques.

Des controverses sont pourtant lancées dans les média grand public au sujet de l'attribution du réchauffement climatique aux activités humaines. Il est vrai qu'il subsiste des incertitudes et des imprécisions, que des points sont mal compris, comme toujours en science. Toutefois il est faux de dire qu'il existe des modèles alternatifs d'explication, en particulier fondés sur la variation du rayonnement solaire. Celle-ci ne peut expliquer qu'une part infime du réchauffement climatique. Il est certes toujours possible qu'un bouleversement scientifique vienne moduler ces conclusions ; mais dans l'état actuel de nos connaissances, seule l'hypothèse d'un réchauffement d'origine anthropique est scientifiquement légitime.

Voici donc, dans les grandes lignes, la compréhension que l'on a du phénomène du réchauffement climatique. L'homme, par ses activités agricoles et industrielles, émet dans l'atmosphère un certain nombre de GES. Certains (SF_6 , perfluorocarbures, hydrofluorocarbures) ne se trouvaient pas à l'état naturel dans l'atmosphère et s'y accumulent du fait de leur dégradation chimique lente. D'autres, comme le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) ou l'oxyde nitreux (N_2O , appelé aussi protoxyde d'azote) font partie des grands cycles biogéochimiques qui font circuler les éléments chimiques comme l'azote, le carbone ou l'oxygène à travers les organismes et les couches géologiques. Les activités humaines créent un petit déséquilibre entre les gigantesques flux d'absorption et d'émission, qui se traduit par une accumulation dans l'atmosphère de ces gaz. Dans le schéma ci-dessous est représenté le cycle du carbone avec les grands flux annuels et les réservoirs de carbone.



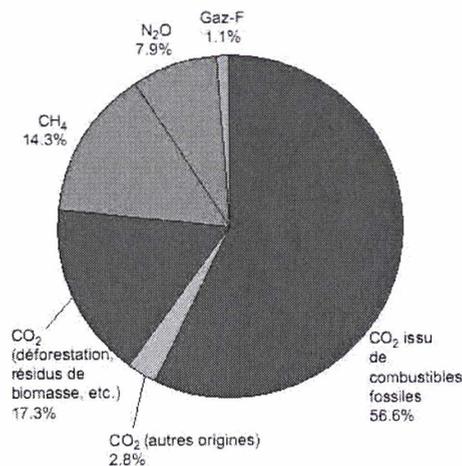
Flux nets de CO_2 Terre/atmosphère (GtC/an) en 1997
 Source : [BRGM, 2007]

Les deux activités humaines qui engendrent l'accumulation de CO_2 dans l'atmosphère sont la déforestation, qui diminue le stock de carbone de la biosphère, et la combustion des énergies fossiles, qui transforme le carbone hydrogéné stocké dans la lithosphère en CO_2 , rejeté dans l'atmosphère et absorbé en partie par l'océan. Le mécanisme est donc bien celui décrit par Arrhénius, quoique celui-ci ait eu quelque chance à tomber juste dans ses calculs,

car il avait oublié deux effets qui se compensaient. Ayant compris les grandes lignes du mécanisme du réchauffement climatique, il est temps pour nous de rentrer dans les détails des émissions de GES et des activités qui les génèrent.

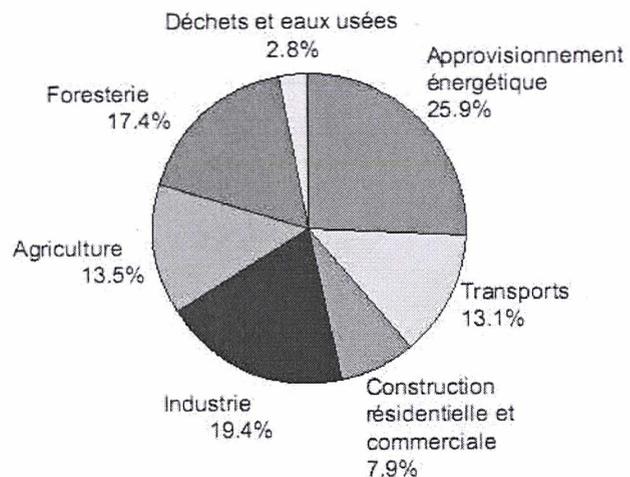
I.4 Les émissions

Les principaux GES contribuant au réchauffement climatique émis par les activités humaines sont le CO₂, le CH₄, le N₂O, SF₆ et les fluorocarbures. Pour l’ozone et la vapeur d’eau, du fait de leur cycle très complexe, les effets sont ambigus. Pour comparer la contribution de ces gaz au réchauffement, il faut adopter une mesure commune : ce sera l’énergie renvoyée par ce gaz pendant cent ans. On exprime cette énergie relativement au CO₂. Chaque GES est donc caractérisé par son pouvoir de réchauffement global (PRG), qui correspond au rapport entre l’énergie renvoyée vers le sol en cent ans par un kilogramme de gaz et celle que renvoie un kilogramme de CO₂. Le PRG du méthane est de 21, celui du N₂O de 298 et celui du SF₆ de 22 800. On peut ainsi parler d’émission totale de GES en tonne équivalent CO₂ en additionnant les poids de chacun des gaz émis pondérés par leur PRG. Les diagrammes qui suivent donnent les émissions mondiales selon les différents gaz, ainsi que selon les différentes activités.



Emissions mondiales de GES en 2004.

Source : [RT III, GIEC, 2007]



Emissions mondiales de GES par secteur en 2004

Les tableaux³ suivants donnent les émissions totales et par habitant des plus gros émetteurs ainsi que de certains ensembles régionaux, puis les taux de croissance des émissions de différents pays, ce qui permet d’évaluer la dynamique d’évolution des émissions.

³ Tirés de [WRI, 2005]. Ce document est une source d’informations très riche que nous recommandons.

Country	MtCO ₂ equivalent	% of World GHGs
1. United States	6,928	20.6
2. China	4,938	14.7
3. EU-25	4,725	14.0
4. Russia	1,915	5.7
5. India	1,884	5.6
6. Japan	1,317	3.9
7. Germany	1,009	3.0
8. Brazil	851	2.5
9. Canada	680	2.0
10. United Kingdom	654	1.9
11. Italy	531	1.6
12. South Korea	521	1.5
13. France	513	1.5
14. Mexico	512	1.5
15. Indonesia	503	1.5
16. Australia	491	1.5
17. Ukraine	482	1.4
18. Iran	480	1.4
19. South Africa	417	1.2
20. Spain	381	1.1
21. Poland	381	1.1
22. Turkey	355	1.1
23. Saudi Arabia	341	1.0
24. Argentina	289	0.9
25. Pakistan	285	0.8
Top 25	27,915	83
Rest of World	5,751	17
Developed	17,355	52
Developing	16,310	48

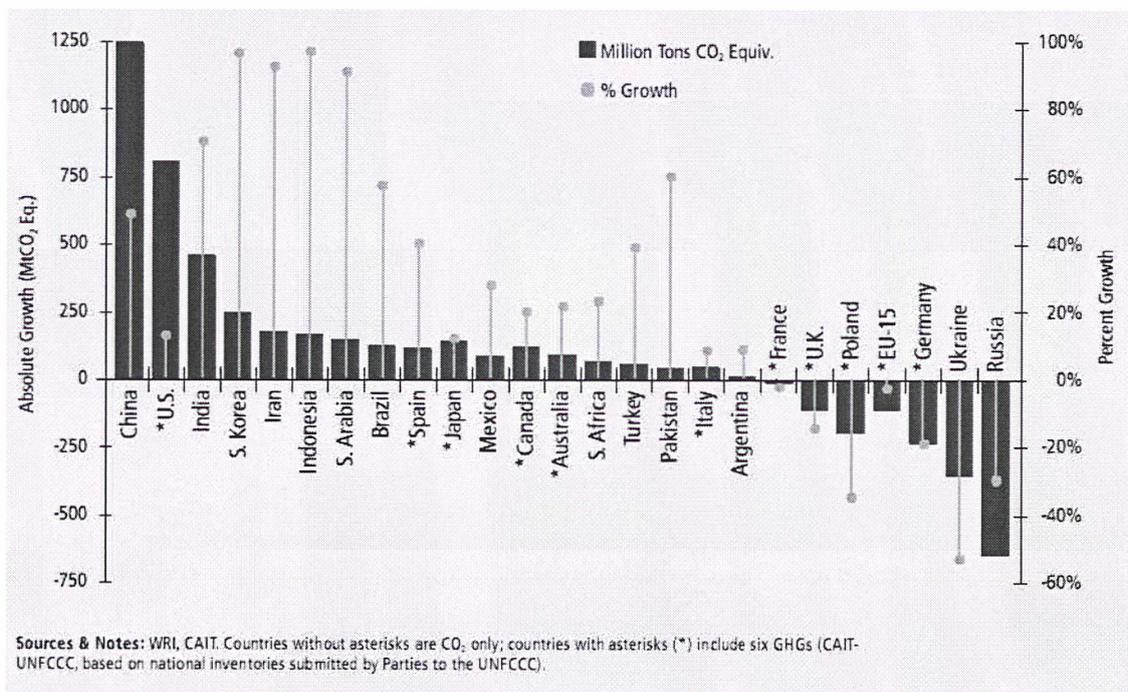
Notes: Data is for 2000. Totals exclude emissions from international bunker fuels and land use change and forestry.

Pays les plus émetteurs de GES

Country	GHGs (Tons CO ₂ Equiv.)	(Rank)	CO ₂ Only (Tons)	(Rank)
Qatar	67.9	(1)	60.0	(1)
United Arab Emirates	36.1	(2)	25.2	(3)
Kuwait	31.6	(3)	26.8	(2)
Australia	25.8	(4)	17.3	(7)
Bahrain	24.8	(5)	20.6	(4)
United States	24.5	(6)	20.4	(5)
Canada	22.1	(7)	17.1	(8)
Brunei	21.7	(8)	13.7	(10)
Luxembourg	21.0	(9)	19.2	(6)
Trinidad & Tobago	19.3	(10)	16.7	(9)
New Zealand	18.9	(11)	8.6	(32)
Antigua & Barbuda	18.5	(12)	4.9	(52)
Ireland	17.3	(13)	10.9	(18)
Estonia	16.6	(14)	11.3	(17)
Saudi Arabia	16.4	(15)	13.4	(11)
Belgium	14.5	(16)	12.2	(14)
Czech Republic	13.9	(17)	12.1	(15)
Singapore	13.9	(18)	13.1	(12)
Turkmenistan	13.8	(19)	7.6	(40)
Netherlands	13.5	(20)	10.9	(19)
Finland	13.3	(21)	10.9	(20)
Russia	13.2	(22)	10.6	(21)
Palau	12.9	(23)	12.7	(13)
Nauru	12.8	(24)	11.4	(16)
Denmark	12.5	(25)	9.7	(27)
Germany	12.3	(27)	10.4	(22)
United Kingdom	11.1	(32)	9.4	(30)
South Korea	11.1	(33)	9.9	(26)
EU-25	10.5	(37)	8.5	(34)
Japan	10.4	(39)	9.5	(29)
Poland	9.8	(43)	7.8	(41)
Ukraine	9.7	(44)	6.9	(47)
South Africa	9.5	(46)	7.9	(39)
Spain	9.4	(47)	7.5	(44)
Italy	9.2	(48)	7.7	(42)
France	8.7	(50)	6.2	(48)
Argentina	8.1	(52)	3.9	(70)
Iran	7.5	(60)	5.3	(56)
Turkey	5.3	(75)	3.3	(78)
Mexico	5.2	(76)	3.9	(71)
Brazil	5.0	(83)	2.0	(100)
China	3.9	(99)	1.7	(88)
Indonesia	2.4	(122)	1.4	(111)
Pakistan	2.1	(131)	0.8	(132)
India	1.9	(140)	1.0	(120)
Developed	14.1		11.4	
Developing	3.3		2.1	
World	5.6		4.0	

Notes: Countries shown are the top 25 per capita emitters, plus other countries among the top 25 absolute emitters. Countries not among the top 25 absolute emitters are shown in italics. Emission figures exclude CO₂ from international bunker fuels and land use change and forestry.

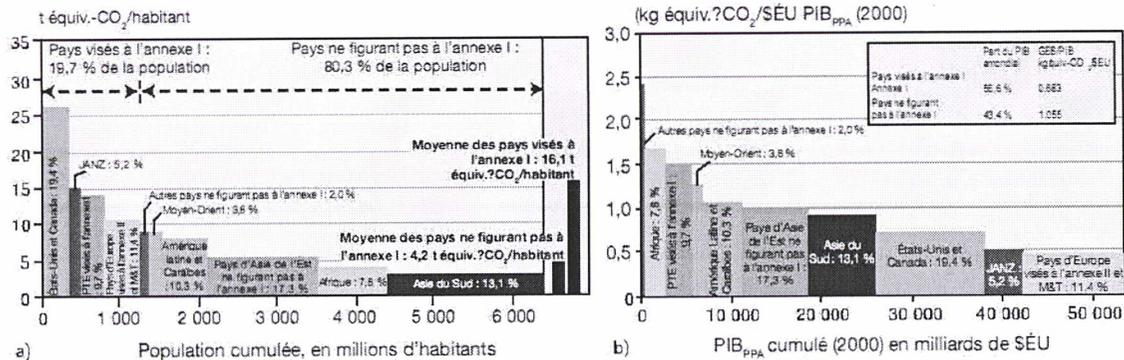
Emissions de GES par habitant



Croissance des émissions de GES, 1992-2000

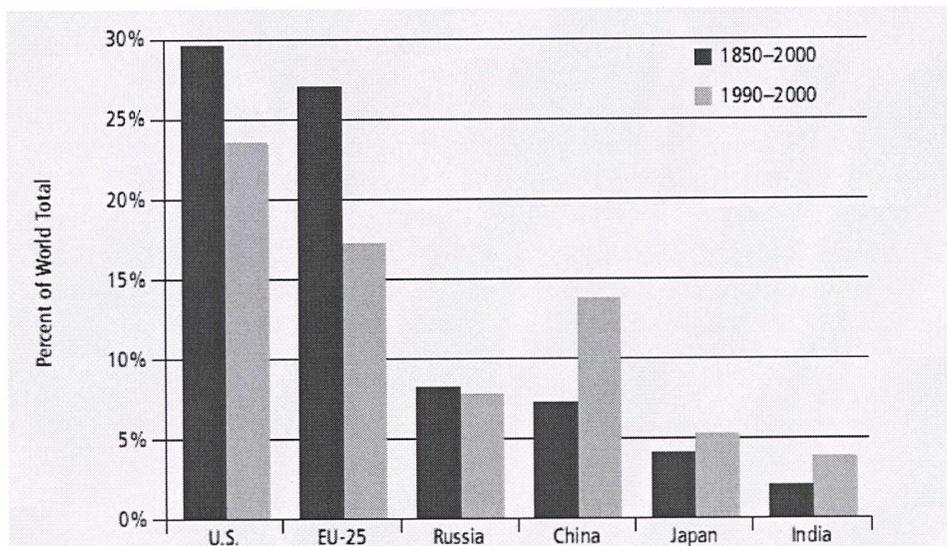
Source : [WRI, 2005]

Le tableau suivant permet d'apprécier la différence entre la population, le PIB et les émissions de CO₂. La contribution de chaque ensemble correspond à l'aire de chaque rectangle coloré.



Répartition régionale des émissions de GES en fonction de la population a) et du PIBPPA b).
Source : [RT III, GIEC, 2007]

Il est aussi intéressant de connaître les émissions cumulées pour apprécier la responsabilité « commune mais différenciée » des différents pays. On voit sur le graphique que les pays développés prennent une large portion des émissions historiques mais que la tendance est plutôt à la diminution de leur contribution relative du fait de l'arrivée des pays émergents (ce qui confirme l'analyse à partir des taux de croissance des émissions).



Emissions cumulées de CO₂ sur différentes périodes
Source : [WRI, 2005]

I.5 Agir contre le réchauffement climatique

En quoi le réchauffement climatique est-il un problème ? Pour Arrhenius déjà – et certains continuent de penser comme lui – le réchauffement climatique était une aubaine qui permettrait la culture de nouvelles terres dans les régions glacées de l'hémisphère nord et qui préviendrait la survenue d'une prochaine glaciation. Aujourd'hui, il est possible d'utiliser les modèles climatiques qui ont décelé l'origine anthropique du réchauffement comme outils de prospective en les associant à des scénarios d'émission de GES, issus eux-mêmes d'outils de prospective économique. Les modèles montrent alors que dans le scénario de référence la température globale en 2100 serait plus chaude de 3 °C à 6 °C par rapport à l'ère préindustrielle. Ce changement de température globale représente une différence considérable en très peu de temps, dans la mesure où seulement 6 °C en moins nous sépare d'une ère glaciaire. En d'autres termes, si nous ne changeons rien, le climat à la fin du siècle sera franchement différent de ce qu'il est aujourd'hui, avec des conséquences dramatiques pour les populations, en particulier les plus vulnérables, ainsi que pour les écosystèmes qui ne peuvent pas s'adapter à un rythme aussi rapide.

Des économistes ont essayé de chiffrer les pertes pour l'économie mondiale qui résulteraient d'un tel changement climatique. Les prédictions sont difficiles car les modèles donnent des résultats incertains, des prévisions non localisées. De plus, les échelles de temps en jeu sont considérables, de l'ordre du demi-siècle. Le rapport Stern⁴ a pourtant tenté de faire une analyse coût – avantage de la lutte contre le changement climatique. Malgré certaines critiques qui lui ont été adressées, en particulier sur la question du taux d'actualisation, qui détermine quel poids on accorde au futur, ce rapport fait toujours référence. Pour Stern, une action vigoureuse est justifiée par l'ampleur des pertes potentielles. Au pire, argumente-t-il, si le réchauffement climatique s'avère moins catastrophique que prévu, l'humanité aura inventé de nouvelles techniques de production d'énergie, appris à mieux consommer son énergie, plus efficacement : ce ne peut être que bénéfique.

Au regard des incertitudes portant tant sur les scénarios d'émission que sur les réactions du climat à l'horizon 2100, l'analyse coût – avantage de la lutte contre le changement climatique pousse le calcul économique à ses extrêmes limites⁵. Plus convaincante est l'argumentation de Martin Weitzman. Pour lui, il ne faut pas raisonner en moyenne mais sur les potentialités les plus dramatiques, même si elles sont moins probables. Ainsi la possibilité que l'augmentation de la température dépasse les 7 °C est comprise suivant les modèles entre 5 et 10 %. Face à une telle situation catastrophique, la bonne question est : combien sommes-nous prêts à payer pour que cela n'arrive pas ? Dans cette perspective, la lutte contre les émissions de GES doit être comprise comme une assurance contre des événements indésirables ; le double dividende mis en avant par Stern est lui toujours valable. Cette façon de voir est défendue dans un article récent par Paul Krugman.

Convaincu que nous devons agir, examinons comment il faudrait s'y prendre. Une politique climatique doit marcher sur deux jambes : l'atténuation et l'adaptation. L'atténuation, ou réduction des émissions de GES, a pour but d'arrêter à terme l'accumulation de GES dans l'atmosphère. Elle permet surtout de se laisser le temps de réduire l'incertitude sans engager l'humanité et la Terre sur une trajectoire irréversible aux conséquences vraisemblablement néfastes. Mais pendant ce temps, les conséquences du réchauffement se

⁴ *Stern Review Report: the Economics of Climate Change*, 2006.

⁵ Voir par exemple O. Godard, « Long terme et actualisation, la controverse suscitée par le rapport Stern sur le changement climatique », *Revue de Philosophie économique*, 2008, Vol. 9, n°2, p.67-89 ou encore Frank Ackerman, *Debating Climate Economics : The Stern Review vs. Its critics*, Friends of the Earth, 2007.

feront quand même sentir. Le système climatique réagit avec retard aux concentrations de GES. Ce temps de latence est extrêmement important car il signifie que le futur proche est quasi-déterminé par les émissions passées. On considère en général que les deux prochaines décennies du climat sont déjà jouées mais que le climat de la fin du XXI^e siècle dépend des actions d'atténuation de ces prochaines décennies.

Il est donc nécessaire d'avoir une politique d'adaptation aux effets déjà irrémédiables du changement climatique, hérité des émissions passées. En retour, l'atténuation acquiert un autre but, celui de freiner la vitesse du changement climatique pour faciliter les actions d'adaptation. Le tragique du changement climatique actuel réside plus dans sa vitesse que dans son ampleur. Enfin, l'adaptation aide aussi l'atténuation en veillant à ce que les petits émetteurs s'engagent dans un développement faiblement intense en carbone. Ce va-et-vient constant entre l'adaptation et l'atténuation façonne la politique climatique.

I.6 L'action internationale

Les politiques d'adaptation sont essentiellement locales ; elles visent à augmenter la résilience des écosystèmes, à favoriser la migration des espèces, à intégrer le climat futur dans les infrastructures et l'urbanisme. En revanche, les politiques d'atténuation produisent des bénéfices mondiaux : dans l'atmosphère, le CO₂ n'a pas d'origine territoriale, seule la concentration totale importe pour le climat ; tout le monde profitera, via un climat préservé, des émissions réduites. Au regard du climat, nous sommes tous dépendants les uns des autres ; de là on pourrait déduire une solidarité nécessaire, mais en réalité le contraire se produit. La structure du problème est celle du passager clandestin, mis en évidence par la théorie des jeux de von Neumann. Si chacun bénéficie des efforts de tous, chacun a intérêt à laisser les autres faire les efforts et à s'en dispenser lui-même. De l'analyse du problème vient la conclusion suivante : même si tout le monde a intérêt à la réduction des émissions mondiales de GES, personne ne le fera seul. Il faut un accord international qui organise la coopération entre les pays et la coordination des politiques d'atténuation, et qui prévoit, c'est évident mais il n'est pas inutile de le rappeler, des mesures de rétorsion contre les passagers clandestins du climat.

L'action internationale, pour difficile qu'elle soit, n'est cependant pas impossible. Le protocole de Montréal, adopté en 1988 pour lutter contre la destruction de la couche d'ozone, en est la preuve. Les conditions qui ont permis ce succès sont connues : une claire estimation des dommages à court terme, des solutions de remplacement disponibles et peu coûteuses, un leadership des Etats-Unis. Ces conditions ne sont pas réunies dans le cas du changement climatique. Comme nous l'avons vu, les dommages sont très difficiles à évaluer ; comme ce mémoire en témoignera sur le cas particulier du stockage géologique du carbone, les solutions sont difficiles à mettre en place car la volonté politique est faible.

Pour compliquer le tableau, la structure du passager clandestin se double d'une dimension intertemporelle. La responsabilité des pays développés est indéniable dans le changement climatique, mais à l'époque de leurs émissions, ils n'en connaissaient pas encore les conséquences. On peut donc qualifier leur responsabilité de rétrospective ou de rétroactive. Les pays émergents ou en développement émettaient peu mais commencent à émettre beaucoup, et leurs émissions ont toutes les chances de continuer à augmenter. On peut donc qualifier leur responsabilité de prospective ou d'anticipée. Les pays développés accusent les pays en développement d'être des laxistes imprévoyants tandis que les pays en développement accusent les pays développés de ne pas vouloir payer pour leurs erreurs passées. On conçoit la difficulté qu'il y ait à mettre en place un cadre juridique international qui tienne compte de ces caractéristiques.

L'histoire des accords internationaux sur le climat demanderait une étude sérieuse à elle seule. Rappelons juste quelques jalons pour comprendre le contexte dans lequel se déroulent aujourd'hui les politiques d'atténuation et pour illustrer la problématique du passager clandestin.

La conférence de 1988 à Toronto où est créé le GIEC propose déjà des objectifs de réduction : réduire de 20 % de 1988 à 2005 les émissions de gaz à effet de serre. Volontaires, ces objectifs n'ont pas été respectés. Le sommet de la Terre de Rio en 1992 met en place un véritable cadre institutionnel avec la création de la Convention-cadre des Nations Unies sur le changement climatique (CCNUCC). La CCNUCC, qui siège à Bonn, a pour but de « stabiliser les concentrations de GES dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique » (article 2 de la Convention) ; elle organise chaque année une conférence des Parties.

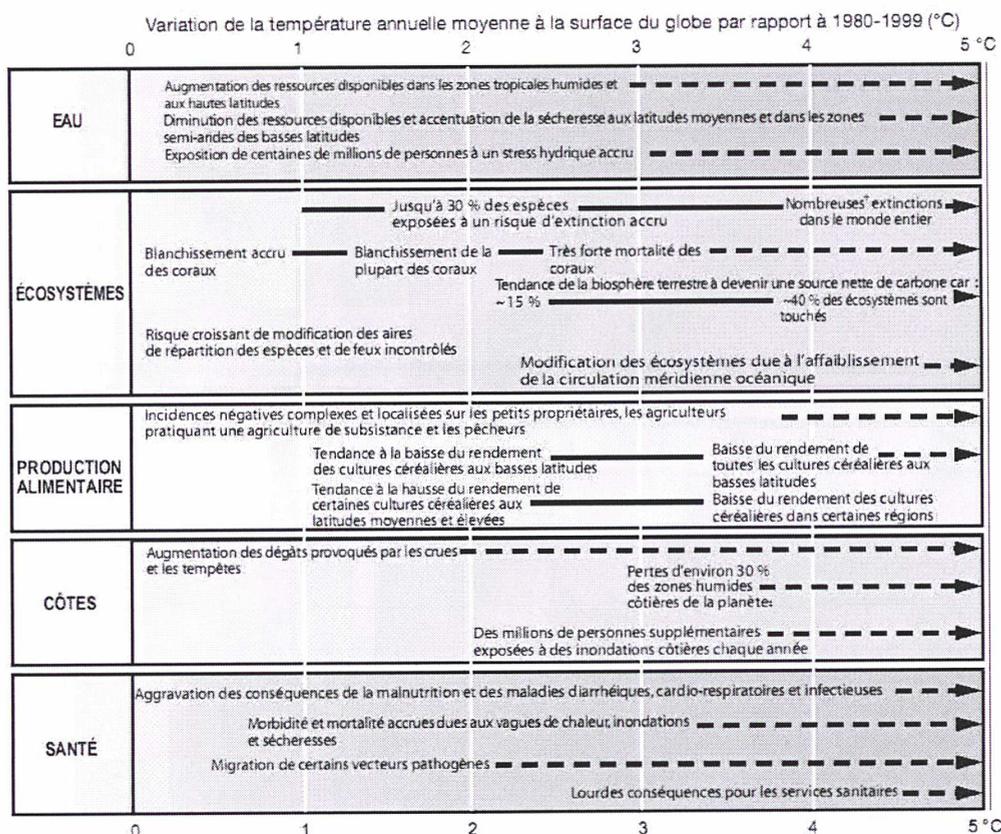
La conférence de 1997 à Kyoto marque une avancée avec la rédaction du protocole de Kyoto qui divise le monde en deux, les pays développés et les pays non-développés, et assigne aux premiers des objectifs de réduction d'émission. Ce protocole n'a jamais été ratifié par les Etats-Unis, plus gros émetteur de la planète, au motif que les pays émergents n'avaient pas de contraintes. L'Europe et les pays non développés le ratifient. Le protocole entre en vigueur en 2005, suite à la ratification par la Russie. Pour satisfaire à ces obligations découlant du protocole, l'Union européenne a mis en place un instrument communautaire avec des quotas de CO₂ pour les gros émetteurs (installations industrielles et centrales thermiques) et un marché d'échange.

L'inconvénient majeur du protocole de Kyoto est qu'il ne prévoit rien contre les pays qui ne le ratifient pas et peu contre ceux qui ne respectent pas leurs engagements. Il expire en 2012 et la recherche d'un accord climatique post-Kyoto est l'objet de toutes les négociations climatiques. La dernière conférence en décembre 2009, à Copenhague, grosse de tous les espoirs, n'a accouché que d'un accord de principe entre pays du G20, hors du cadre de la CCNUCC. Il exprime la volonté de limiter le réchauffement à 2 °C, sans indiquer les moyens d'y arriver, laissant à chaque Etat le soin de faire des propositions. Un accord plus ambitieux a échoué parce que les Etats-Unis ne veulent rien signer sans la Chine et que la Chine refuse tout contrôle international. L'Europe, impuissante et désunie, a regardé faire.

I.7 Le budget carbone du XXI^e siècle

L'objectif de 2 °C comme réchauffement maximum qui se trouve dans l'accord de Copenhague est unanimement préconisé par les spécialistes du climat pour éviter les effets les plus catastrophiques du changement climatique. Au-delà de 2 °C, les modifications du climat deviennent de plus en plus drastiques. Surtout, autour de ce seuil pourraient intervenir des « surprises climatiques ». Il s'agit de l'apparition d'effets « boule de neige », comme la disparition de la banquise polaire, la libération du méthane piégé dans le permafrost, qui amplifient le réchauffement. Au contraire des rétroactions négatives qui sont stabilisatrices, ces rétroactions positives rendraient le réchauffement climatique incontrôlable. Il est donc prudent de limiter la hausse de la température globale à 2 °C.

Le graphique suivant regroupe les impacts dans différents domaines en fonction de l'augmentation de la température.

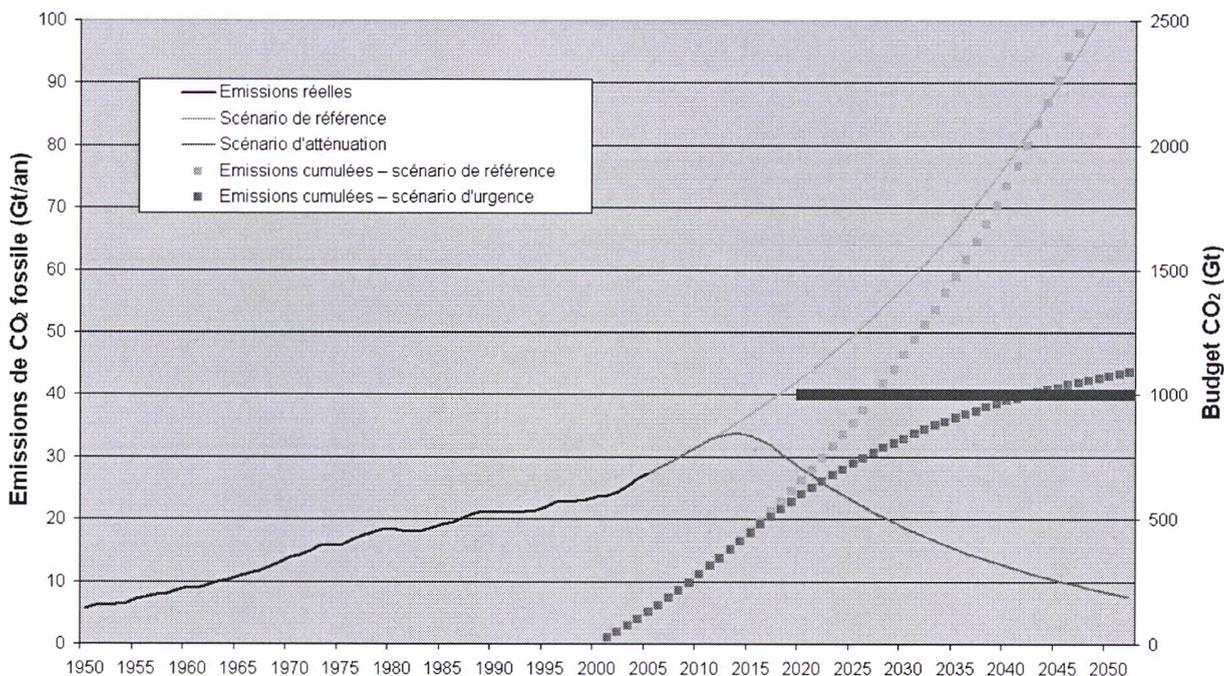


Exemples d'incidences associées à la variation de la température moyenne à la surface du globe (les incidences varieront selon le degré d'adaptation, le rythme du réchauffement et le mode de développement socioéconomique)
 Source : [RT II, GIEC, 2007]

Examinons l'ampleur de l'effort d'atténuation à fournir pour ne pas dépasser cet objectif de 2 °C. Les modèles climatiques nous apprennent que, pour avoir une chance sur deux de ne pas dépasser notre objectif, la concentration en CO₂ doit se stabiliser autour de 450 ppm. Nous cherchons à établir la somme totale des émissions mondiales au cours du XXI^e siècle (en nous limitant pour simplifier aux seules émissions de CO₂) pour atteindre cette concentration. Cette somme est comparable à un budget donné à l'humanité et qu'elle est libre de dépenser comme bon lui semble. Si les émissions dépassent le budget alors l'augmentation de la température excédera les 2 °C avec une probabilité supérieure à 0,5. L'ordre de grandeur peut être apprécié de la façon suivante. La concentration en 2000 était autour de 380 ppm, en 2050 il faudra qu'elle soit autour de 450 ppm. Cette variation de concentration représente un accroissement de la masse de dioxyde de carbone de $(450-380) \times 8 \approx 500$ Gt CO₂ car 1 ppm dans l'atmosphère représente environ 8 Gt CO₂. La capacité d'absorption naturelle du CO₂ étant d'environ 10 Gt CO₂ par an, cela fait donc un total de $50 \times 10 + 500 = 1000$ Gt CO₂ pour la première moitié du XXI^e siècle.

Ces calculs de coin de table ne reflètent pas les vrais mécanismes à l'œuvre qui sont plus complexes mais permettent d'appréhender les ordres de grandeur. Des études précises sont nécessaires pour intégrer tous les effets grossièrement négligés. Le rapport sur le développement humain du PNUD (*Human Development Report 2007/2008, Fighting climate change : Human solidarity in a divided world*) donne un budget autour de 1500 GtCO₂ pour

le XXI^e siècle, ce qui est cohérent avec l'estimation proposée. Des estimations⁶ plus précises à l'aide de modèles climatiques donnent des valeurs du même ordre de grandeur, quoique supérieures. Nous retiendrons la valeur de 1000 GtCO₂ pour illustrer notre propos concernant les réductions d'émissions de CO₂ à l'échelle mondiale à l'horizon 2050.



Scénarios d'émission pour 2050 et budget CO₂
 Source : données WRI, projections personnelles

Le graphique montre les émissions mondiales annuelles de CO₂ de 1950 à 2005. Ensuite il y a deux scénarios : un scénario de référence (*business as usual*) avec poursuite du rythme actuel de croissance des émissions (3 % par an) et un scénario d'atténuation où les émissions se réduisent de 4 % par an à partir de 2015.

Dans le premier cas, le budget carbone est épuisé avant 2030 tandis que dans le second cas, il est à peu près respecté (mais cela laisse quand même une chance sur deux de dépasser les 2 °C !!). On voit qu'une baisse très forte des émissions de CO₂ est nécessaire pour ne pas épuiser le budget carbone avant son terme.

La plus importante leçon que l'on doit tirer des considérations sur le budget carbone est qu'il faut agir très rapidement. Retarder les actions de quelques années oblige ensuite à une diminution draconienne des émissions pour respecter le budget, diminution souvent irréaliste. Ainsi, repousser à 2020 la stabilisation puis la baisse des émissions obligent à des réductions de l'ordre de 10 % par an dès cette date pour espérer respecter le budget. Plus tôt les actions sont engagées, plus elles libèrent de la marge de manœuvre pour l'avenir.

Le scénario d'atténuation propose donc une cible mondiale d'émissions de CO₂ en 2050 autour de 10 GtCO₂. On retrouve ainsi le slogan de la division par deux des émissions

⁶ Meinshausen *et al.*, « Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C », *Nature*, Vol 458, avril 2009, p. 1158-1163.

en 2050, mais considéré par rapport aux émissions de 1990 (autour de 20 GtCO₂). Par rapport aux émissions d'aujourd'hui (en 2010, autour de 30 GtCO₂), cela correspond à une division par trois !

A partir de cette enveloppe d'émissions déterminée pour l'ensemble des pays du monde, il faut passer à des émissions par pays. Pour cela, nous devons trouver une clef de répartition des émissions pour allouer sa quote-part à chaque pays. Aujourd'hui, le niveau des émissions résulte de l'histoire. Qu'en sera-t-il en 2050 ? Les pays développés aimeraient continuer à pouvoir émettre en raison de leurs droits historiques (grand fathering), c'est-à-dire que la contribution de chaque pays aux émissions resterait constante en valeur relative. Les pays émergents souhaiteraient que les pays développés réduisent considérablement leurs émissions sans qu'ils en fassent autant, sous prétexte qu'ils ont les mêmes droits à polluer pour se développer que les pays déjà développés. La clef de répartition fera l'objet de tractations, de marchandages pour aboutir à un accord ; celle qui sera in fine retenue sera bien sûr l'aboutissement du processus diplomatique. Nous pensons qu'un bon compromis⁷ pourrait être de répartir les émissions selon la population. Cette solution a le mérite de la clarté ; elle a aussi une portée symbolique en affirmant l'égalité de chacun devant une contrainte qui s'applique à tous.

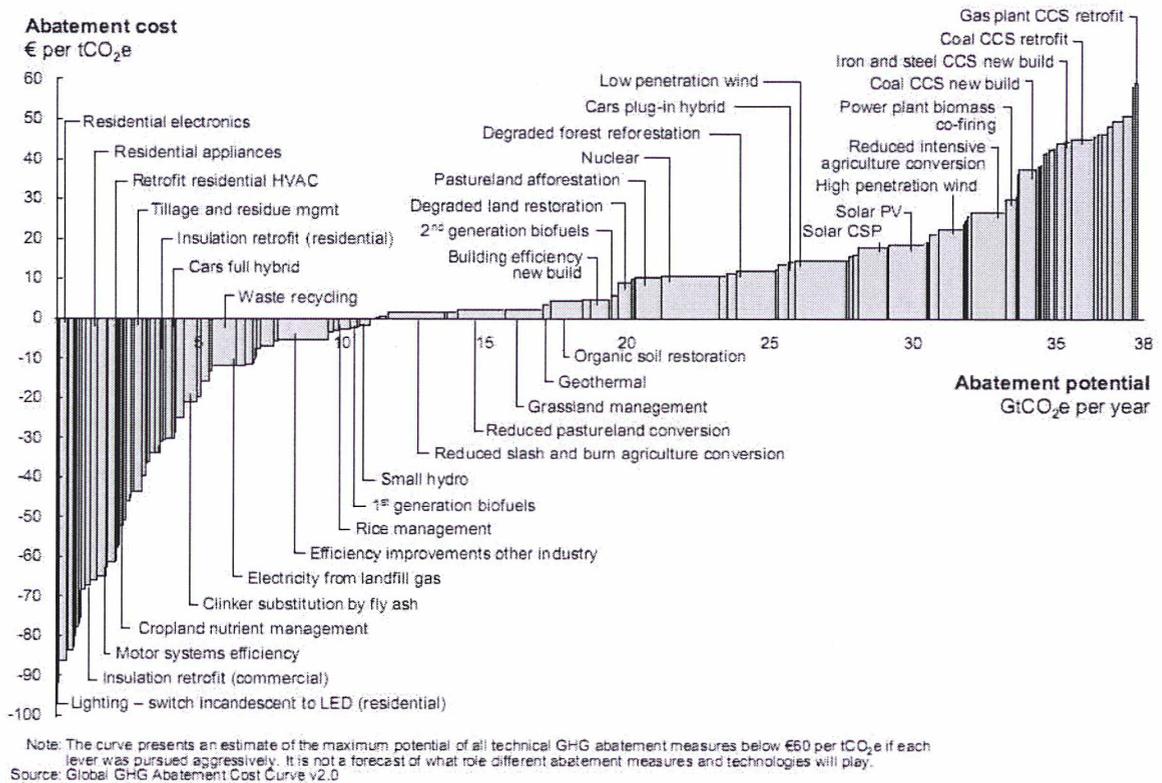
Avec une population mondiale de dix milliards, chaque personne a droit à un quota de 1 tCO₂ par an. Pour une France peuplée de 80 millions d'habitants, notre pays se verrait ainsi attribuer en 2050 un quota de 80 Mt CO₂. Par rapport aux émissions de 1990, cela représente une division par 6, soit plus que le facteur 4 qui est le leitmotiv de l'action politique en France sur le climat, depuis la loi de Programme fixant les orientations de la politique énergétique du 13 juillet 2005. Le facteur 4 est donc un peu en-dessous de l'effort qu'il faudrait fournir pour aboutir à une justice climatique en 2050, mais il sera déjà très difficile d'y arriver. En effet les possibilités techniques de réduction d'émissions ne sont pas entièrement suffisantes.

I.8 Les solutions de réduction des GES

Voyons au niveau mondial quels sont les potentiels estimés de réduction d'émissions. Le graphique ci-dessous provient d'une étude⁸ réalisée par le cabinet de conseil Mc Kinsey. Il présente toute la gamme de solutions en les classant par ordre de coûts croissants (en ordonnées) ; en abscisse on trouve le potentiel de réduction de chaque solution. A la vue de ce graphique une chose est frappante : il n'y a pas de solution miracle, pas de gros blocs non plus, mais une ribambelle de petites mesures dont chacune contribue un peu à la réduction des émissions de GES.

⁷ Cette solution est défendue par l'Inde sur la scène internationale. Elle est expliquée avec beaucoup de détails dans l'opuscule *The Greenhouse Development Rights Framework : The right to development in a climate constrained world*, Heinrich Böll Foundation, 2008, qui en tire des conséquences étonnantes sur les contributions des différents pays.

⁸ *Pathway to a Low Carbon Economy*, Mc Kinsey, 2009.



Courbe des coûts de réduction des émissions mondiales par rapport au scénario business as usual en 2030
Source : [McKinsey, 2009]

On remarque aussi qu'un tiers du potentiel de réduction est représenté par des économies d'énergie à coût négatif, c'est-à-dire globalement bonnes pour l'économie. Ces économies d'énergie ne sont aujourd'hui pas toujours réalisées, en raison d'imperfections de marché, de déficits d'information ou d'incitations séparées (par exemple l'isolation du logement qui profite au locataire mais que paye le propriétaire).

Les solutions sont à mettre en œuvre dans beaucoup de domaines. Le secteur agricole demande de nombreux changements, parfois minimes, des pratiques culturelles et des modes de gestion et de conversion des terres. En ce qui concerne le système énergétique, il faut promouvoir la sobriété énergétique, l'efficacité énergétique et le développement des énergies sans carbone.

Si l'humanité se lance dans la lutte contre le réchauffement climatique, si les gouvernements parviennent à se mettre d'accord, une bataille de longue haleine s'engagera. La lutte contre le changement climatique demande une action vigoureuse, une prise à bras le corps des problèmes. La société se transformera, tant du point de vue des techniques de production que des comportements. Les mutations seront profondes et nous ne sommes pas en mesure de toutes les prévoir. Nous voulons signaler quatre enjeux majeurs de cette transition : l'urgence (agir avant 2015), la durée (agir pendant 40 ans), la difficulté (les modes de vie se modifient généralement très lentement) et l'incertitude (sur la réussite de l'action). Cette transition, si elle est lancée, sera éprouvante pour le corps social : elle nécessite une cohésion sociale et une volonté politique, conditions qui ne sont pas encore réunies.

Après ce panorama qui brosse à grands traits le contexte des réductions de GES, nous allons nous intéresser à une des techniques particulières, aujourd'hui en cours d'élaboration : le captage, transport et stockage géologique du dioxyde de carbone (CSC). Nous avons choisi de nous focaliser sur cette technique car elle touche de près l'industrie et la production électrique, domaines de compétence du Corps des mines. Il nous a paru intéressant d'étudier *in statu nascendi* la structuration d'un champ social autour de cette technique. Les parties prenantes sont bien identifiables et peu nombreuses ; on entrevoit les logiques de chacun, les conflits d'intérêt, les blocages potentiels. Le CSC promet aussi d'être riche de mélange entre les aspects techniques et sociaux ; les controverses qu'il suscitera peuvent être éclairées par les expériences tirées d'autres usages du sous-sol. L'impulsion politique et l'accompagnement institutionnel paraissent, ici comme dans toute la politique climatique, primordiaux. Le mémoire est donc comme une étude en modèle réduit des questions de transformation technique et sociale que pose la lutte contre le changement climatique.

Chapitre II

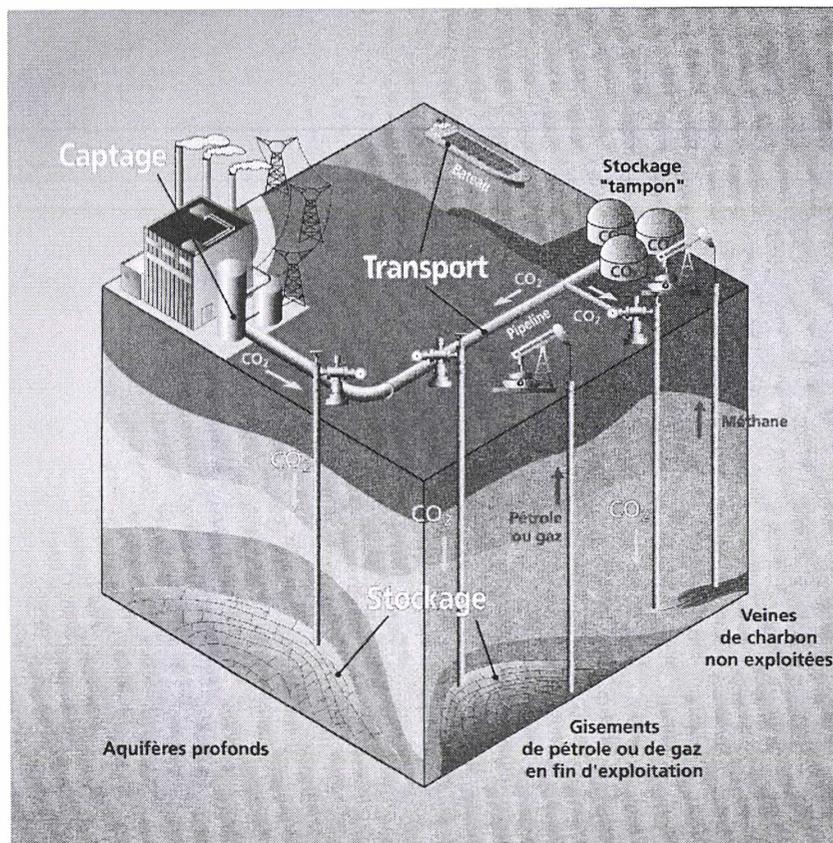
Aspects technologiques et industriels du CSC

Ce chapitre a pour objet de présenter au lecteur la filière CSC en se limitant aux données essentielles à la compréhension de cette étude axée sur l'acceptabilité sociale du CSC. Il décrit succinctement les principaux projets de pilotes et démonstrateurs au niveau mondial et de la France.

Pour plus d'informations techniques, il est conseillé de se reporter aux ouvrages réalisés par les organismes de recherche français tels le BRGM et l'IFP ([BRGM, 2007] et [IFP, 2010]).

II.1 La filière CSC

La filière CSC comprend trois étapes : le captage, le transport et le stockage du CO₂.

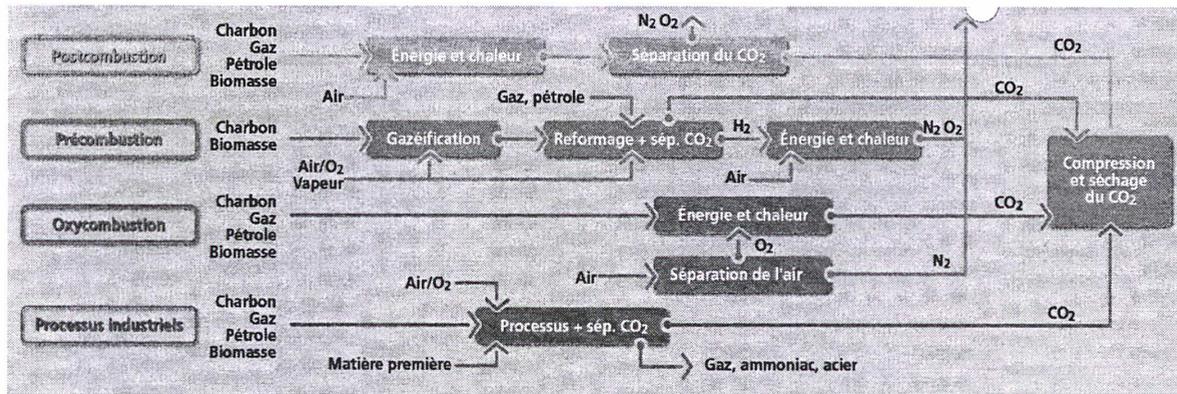


Captage, transport et stockage géologique du CO₂
Source : [BRGM, 2007]

II.1.1 Le captage du CO₂

Le principe du CSC consiste à capter le CO₂ au niveau des sources fixes industrielles. L'objectif est de concentrer la quantité de CO₂ en vue de son transport et son stockage.

On distingue trois grands procédés de captage : le captage en postcombustion, le captage en oxycombustion et le captage en précombustion.



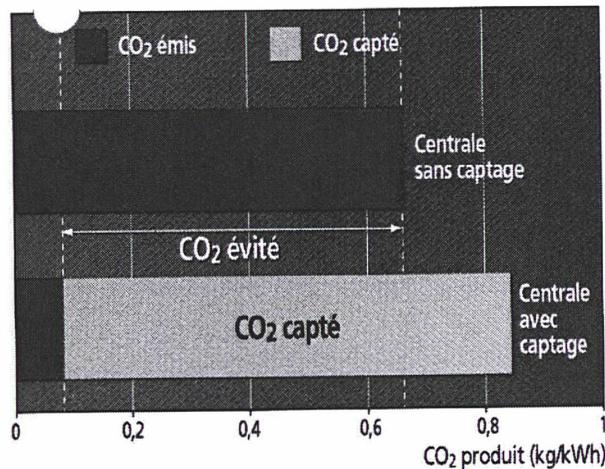
Les principaux procédés et systèmes de captage du CO₂
Source : [BRGM, 2007]

Le captage en postcombustion consiste à capter le CO₂ directement dans les fumées, au sortir de l'installation de combustion ou industrielle (processus industriels). Un des atouts de ce type de captage est sa possible mise en œuvre sur des installations existantes, ou sur des installations conçues selon le concept « CO₂ Capture Ready ». Ses principaux inconvénients concernent la nature et les volumes de fumées à traiter qui d'une part engendrent des coûts importants, d'autre part nécessitent des installations volumineuses.

Le captage en oxycombustion consiste à faire une combustion soit à l'oxygène, soit à l'aide d'une masse oxyde. Les fumées produites contiennent essentiellement du CO₂ et de l'eau. Le captage du CO₂ consiste essentiellement en une condensation de l'eau. Cette technique est particulièrement adaptée à la remise à niveau d'installations existantes. L'utilisation de l'oxygène la rend toutefois coûteuse, d'où l'utilisation d'une masse oxyde en cours de développement.

Le captage en précombustion consiste à transformer le combustible initial en un mélange H₂ + CO₂ et, après extraction du CO₂, à réaliser la combustion à l'hydrogène. Le CO₂ est donc capté « à la source », c'est-à-dire avant la combustion.

Il est important de souligner que le captage du CO₂ nécessite d'utiliser de l'énergie supplémentaire, elle-même génératrice de CO₂. Les émissions de CO₂ évitées sont donc calculées en faisant la différence entre une centrale (ou autre installation industrielle) sans captage et une centrale avec captage. La quantité de CO₂ capté est donc toujours supérieure à la quantité de CO₂ évité, comme l'explique le diagramme ci-après.



Le CO₂ évité
Source : [BRGM, 2007]

II.1.2 Le transport

Le transport du CO₂ peut s'effectuer par canalisation terrestre, par canalisation sous-marine ou par bateau. Il ne pose pas de véritable problème technique. La mise en place, la gestion et la régulation d'un réseau de transport sécurisé entre les lieux d'émissions et les lieux de stockage constituent toutefois une étape importante dans le développement de la filière CSC.

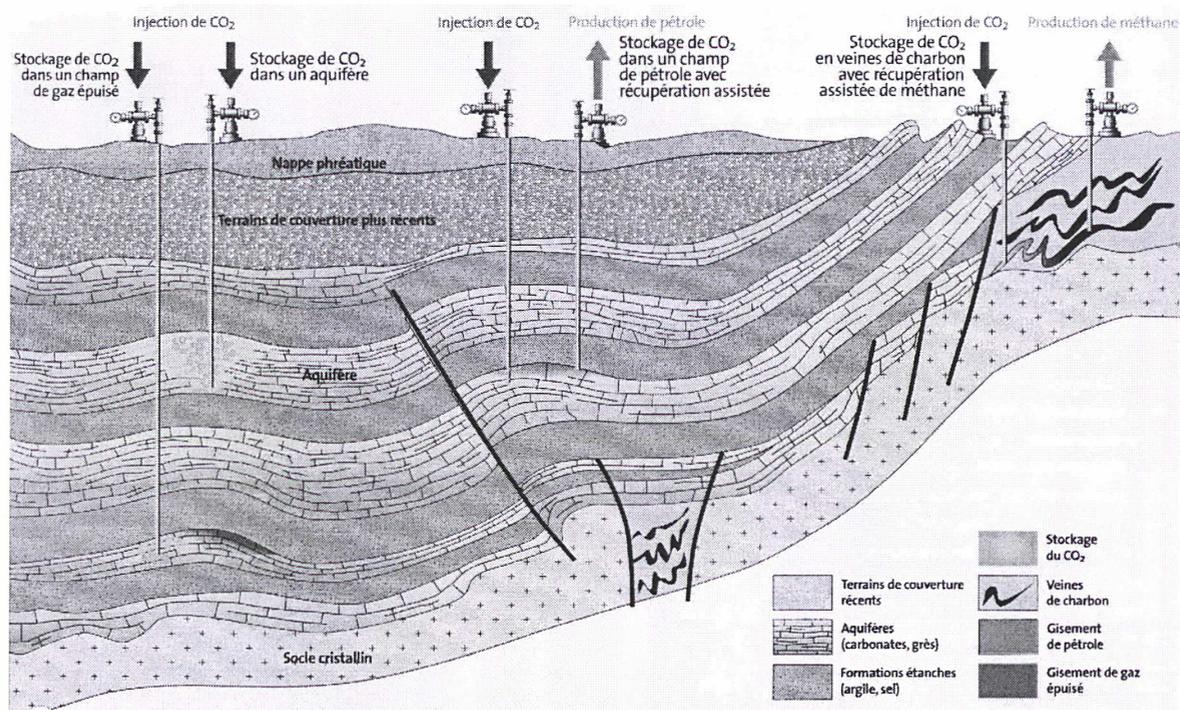
II.1.3 Le stockage

Le stockage géologique du CO₂ peut s'effectuer on-shore ou off-shore. Dans ce dernier cas, il est important de rappeler que le stockage dans la colonne d'eau n'est pas autorisé.

Le CO₂ doit être injecté au-delà de 800 m de profondeur afin d'être stocké à l'état supercritique (plus de 31 °C et 73 bars), où il est dense et occupe un volume réduit.

Trois types de formations géologiques peuvent permettre le stockage du CO₂ : les aquifères profonds, les gisements de pétrole et de gaz épuisés ou en phase de déclin, et le stockage dans les veines de charbon inexploitées.

Le stockage en gisement d'hydrocarbures est déjà utilisé dans l'industrie pétrolière pour améliorer la productivité de certains champs de pétrole (récupération assistée de pétrole, en anglais enhanced oil recovery (EOR)). Toutefois, le stockage du CO₂ dans les aquifères profonds semble être l'option géologique la plus favorable pour deux raisons principales : l'importance des capacités de stockage pouvant atteindre au niveau mondial 10 000 milliards de tonnes de CO₂, et la grande répartition géographique de ces aquifères favorisant la proximité entre sources d'émission et lieux de stockage. Le potentiel de stockage dans les veines de charbon profondes inexploitées reste quant à lui limité.



Les différents types de stockage géologique du CO₂
 Source : [BRGM, 2007]

Les 3 principaux types de stockage du CO ₂			
	Capacités (en Gt de CO ₂)	Avantages	Inconvénients
Gisements d'hydrocarbures	930 Gt	Structures piégeantes étanches aux gaz non réactifs. Objets bien connus. Intérêt économique via EOR.	Généralement loin des sites d'émission de CO ₂ . Capacités de stockage souvent limitées.
Aquifères salins profonds	400 à 10 000 Gt	Très large répartition géographique et grand potentiel de stockage. Facilitent la recherche de sites de stockage à proximité des sources d'émissions de CO ₂ . Eau non potable.	Peu caractérisés jusqu'à présent.
Veines de charbon non exploitées	40 Gt	Près des sites d'émissions de CO ₂ . Intérêt économique via la récupération du méthane.	Difficultés d'injection dues à la faible perméabilité du charbon. Capacités de stockage limitées.

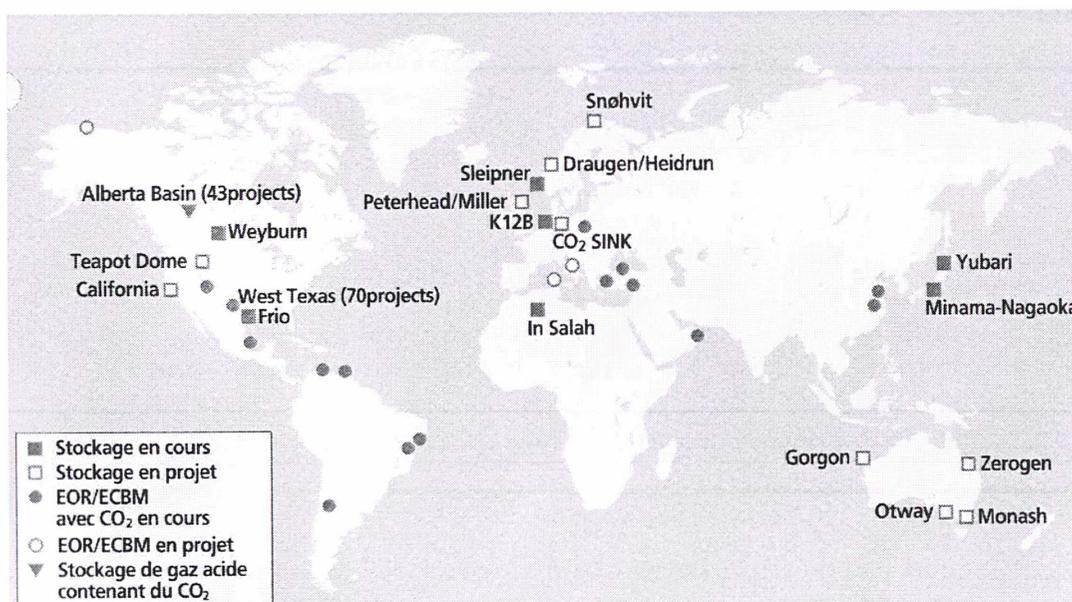
Les trois principaux types de stockage du CO₂, avantages et inconvénients
 Source : [BRGM, 2007]

II.2 Les principaux pilotes et démonstrateurs

Nous axerons la présentation d'une part sur les principaux projets dans le monde avec stockage de CO₂, d'autre part sur les projets en France portant soit sur le captage, soit sur le stockage du CO₂.

II.2.1 Les principaux projets dans le monde avec stockage du CO₂

D'après le BRGM, plus de la moitié des projets ont en priorité l'objectif de stocker du CO₂. D'autres sont avant tout destinés à la récupération assistée de pétrole (EOR) ou à la production de méthane dans les veines de charbon (ECBM).



Principales opérations en cours et en projet dans le monde avec stockage du CO₂
Source : [BRGM, 2007]

Le stockage en aquifère profond de Sleipner en Norvège

Cette installation est la première opération industrielle de stockage géologique de CO₂ à des fins environnementales. Elle permet, depuis 1996, l'injection en aquifère profond d'un million de tonnes de CO₂ par an sur le site de Sleipner en mer du Nord.

Sleipner est un gisement de gaz naturel situé au centre de la mer du Nord à environ 200 km des côtes, exploité par la société Statoil. Le CO₂ résultant du traitement du gaz naturel, est traité sur une plate-forme voisine (extraction par un procédé d'absorption par des amines) et injecté dans le plus grand aquifère local, à environ 1000 m sous le fond de la mer.

En 1998, le projet de recherche européen SACS (Saline Aquifer CO₂ Storage), financé par l'Union européenne et des industriels, a permis des avancés scientifiques notamment dans l'évaluation des interactions du CO₂ injecté et la roche hôte, le monitoring sismique pour suivre la propagation du CO₂ dans le milieu poreux et la modélisation à long terme du CO₂. Ce projet de a été complété sur la période 2003-2006 par le projet CO₂STORE. Le BRGM et l'IFP ont participé en tant qu'organismes de recherche à ces projets.

A l'instar de Sleipner, dans le cadre de l'exploitation du Champ de gaz de Snøhvit en Norvège (mer de Barents) par Statoil, 700 000 tonnes de CO₂ par an seront injectés dans une formation géologique à environ 2 600 m de profondeur, sous le réservoir de gaz.

Une récupération assistée de pétrole par injection de CO₂ à Weyburn au Canada

La société EnCana mène depuis 2000, une opération de récupération assistée de pétrole par injection de CO₂ sur le champ pétrolier de Weyburn. Le CO₂ provenant d'une unité de gazéification de charbon située dans le Nord des Etats-Unis, est acheminé jusqu'à Weyburn par un pipeline de 330 km. 20 millions de tonnes de CO₂ seront stockées sur 15 ans (1,8 millions de tonnes de CO₂ par an), permettant de produire 130 millions de barils supplémentaires de pétrole.

L'AIE a lancé en 2001 un programme de recherche international « IEA Weyburn CO₂ Monitoring and Storage Project ». L'Union européenne participe au financement de ce projet. Le BRGM y est impliqué.

Après une première phase (2001-2004) qui a permis des avancées en matière de modélisation et de surveillance de la propagation du CO₂ dans le sous-sol ainsi qu'en matière d'évaluation des performances et des risques du stockage, la deuxième phase permettra d'évaluer l'avenir du stockage du CO₂ dans les réservoirs d'hydrocarbures.

Un stockage de CO₂ à In Salah en Algérie

Ce projet de BP, Sontrach et Statoil, a pour finalité de stocker le CO₂ séparé du gaz naturel, dans une partie plus profonde de la couche géologique contenant le gaz. Cette couche géologique se présente comme un aquifère dont la capacité est estimée à 17 Mt de CO₂. Depuis 2004, un million de tonnes de CO₂ par an sont injectées dans ce réservoir.

Ce projet n'est pas motivé par la récupération assistée des hydrocarbures, mais par une volonté d'acquérir des compétences en vue de futures mises en œuvre à plus grande échelle.

L'injection de CO₂ dans le gisement de gaz naturel K12B aux Pays-Bas

Gaz de France, dans le cadre d'une démarche d'étude avec les Pays-Bas, a installé un pilote pour réinjecter dans le gisement de gaz naturel arrivé à épuisement, les dernières tonnes de CO₂ extraites. L'objectif est d'estimer les capacités de stockage de ce réservoir en vue d'accueillir du CO₂ en provenance d'autres plates-formes. Le potentiel d'injection du gisement est de 480 000 t/an de CO₂.

II.2.2 Les projets européens de pilotes et démonstrateurs des producteurs d'électricité

Les projets industriels cités ci-dessus ont tous été initiés par des compagnies pétrolières et gazières s'appuyant sur leurs compétences d'exploitation du sous-sol.

Toutefois, depuis quelques années, les industries émettrices de CO₂, en particulier les grands producteurs d'électricité ayant un parc de centrales thermiques fonctionnant au charbon, ont des projets de pilotes et démonstrateurs de CSC.

L'Allemagne est très moteur sur le sujet avec différents projets tels que :

- la construction dans le Land de Brandebourg, par le groupe Vattenfall, de la première centrale électrique (pilote de 30 MW) au lignite sans émissions de CO₂ afin de tester la technologie de captage du CO₂ par le procédé « oxyfuel » (oxycombustion). Un projet d'une installation de démonstration de 300 MW d'électricité est prévu pour 2015 avec

une première utilisation commerciale dans une centrale au lignite de 1000 MW programmée pour 2020 ;

- le groupe EON prévoit une unité pilote pour le captage de CO₂, par le procédé de captage en postcombustion (lavage des fumées). Une unité de démonstration est programmée pour 2014 ;
- l'entreprise RWE souhaite réaliser en 2016 une installation de captage en postcombustion sur une centrale à charbon de 1000 MW à Tilbury en Angleterre ;
- l'entreprise RWE a par ailleurs annoncé pour 2014 la création d'une centrale de 450 MW dans laquelle l'hydrogène sera produit à partir de charbon et utilisé dans une turbine à gaz pour produire de l'électricité sans émission de CO₂ (technologie IGCC : Integrated Gasification Combined Cycle). 2,3 millions de tonnes par an de CO₂ seront ainsi stockées dans un réservoir de gaz épuisé ou dans un aquifère profond.

Toutefois, depuis quelques mois, l'Allemagne connaît les premières difficultés dans le développement de ses projets sur son territoire du fait d'une opposition de la société allemande au CSC.

II.2.3 Les projets de pilotes et démonstrateurs en France

Le projet pilote le plus connu est celui que Total met en œuvre dans le bassin de Lacq. C'est une chaîne complète de production de vapeur dans l'usine de traitement de gaz de Lacq, captage du CO₂ par le procédé d'oxycombustion, transport par pipeline sur une distance de 30 km et stockage à 4 500 m de profondeur dans un gisement déplété de gaz situé à Rousse. 150 000 tonnes de CO₂ par an seront injectées durant deux années. Ce projet, dont le coût s'élève à 60 M€, est réalisé en partenariat avec Air Liquide et Alstom. L'IFP et le BRGM collaborent également à ce projet dont l'objectif est de démontrer la faisabilité industrielle d'une telle chaîne.

Par ailleurs, suite à l'appel à projets lancé en 2008 sur le CSC, quatre projets démonstrateurs viennent d'obtenir un financement de l'ADEME pour un montant total de 45 M€ sur une durée de 6 à 8 ans. Le fonds démonstrateur de recherche, créé par le Grenelle de l'environnement et confié à l'ADEME a en effet pour objectif de soutenir le potentiel des industriels français pour les positionner dès à présent sur le marché des technologies innovantes, tant sur le captage que sur le stockage du CO₂. En plus de la validation technologique au stade préindustriel en vue d'un lancement industriel vers 2020, l'objectif est également de mesurer l'acceptabilité sociale du CSC et de déterminer les critères de sécurité des différentes installations.

Le projet Pil-Ansu

Ce projet a pour objectif la réalisation d'un démonstrateur de captage du CO₂ par anti-sublimation (givrage / dégivrage des gaz) sur les fumées d'une centrale au charbon. Il fait suite à une recherche menée par l'Ecole des Mines de Paris avec le soutien de l'ADEME. Alstom, EDF, GDZ Suez et Armines se sont par la suite associés pour démontrer la faisabilité de ce procédé à une échelle industrielle sur une centrale de production d'électricité au charbon existante.

Le projet France-Nord

Ce projet, piloté par Total associé à plusieurs industriels et organismes de recherche français et européens, a pour objectif d'étudier l'implantation, dans le bassin sédimentaire situé dans le centre-nord de la France, d'une infrastructure pilote de transport et de stockage de CO₂, utilisée par plusieurs unités émettrices de CO₂. A l'issue de deux années d'études, les partenaires, en concertation avec les pouvoirs publics et la population locale, devraient être en mesure de proposer un site de stockage dans un aquifère salin profond où sera réalisé le pilote.

Le projet ULCOS

Le secteur de l'acier s'est engagé en Europe à réduire fortement ses émissions, dans le cadre du programme européen « Ultra Low CO₂ Steelmaking (ULCOS) ». Ce programme réunit l'ensemble des sidérurgistes européens (ArcelorMittal, TKS, Corus, ...), mais aussi des organismes de recherche et des universités (BRGM, CNRS, Cirad, ...), ainsi que d'autres industriels comme EDF.

Dans le cadre de ce programme, ArcelorMittal, coordinateur du projet, s'intéresse au développement de la technologie du CSC. Le groupe travaille sur le déploiement d'un pilote dans son usine d'Eisenhüttenstadt en Allemagne et d'un démonstrateur industriel sur son site de Florange en France afin de valider le principe de captage du CO₂ et de recyclage des gaz dans le haut fourneau. Le démonstrateur de Florange sera assorti d'un projet de captage et stockage du CO₂.

Le projet C2A2

Ce projet prévoit la réalisation d'un démonstrateur de recherche de captage de CO₂ sur l'unité n°4 de la centrale de production d'électricité au charbon EDF du Havre. La technologie, proposée par Alstom et retenue par EDF, est celle du captage post-combustion aux amines. Ce démonstrateur aura pour objectif de réduire la consommation d'énergie et d'amines de l'installation. Il permettra aussi de vérifier les performances de cette technologie en milieu industriel et d'analyser sa flexibilité en exploitation.

Chapitre III

Les enjeux du CSC pour la France

La technologie du CSC présente pour la France deux enjeux principaux.

Le premier enjeu consiste en la maîtrise des procédés en vue d'exporter la technologie à l'étranger. Il convient à cet effet de s'interroger sur les émissions évitables par la technologie CSC au niveau mondial.

Le second enjeu porte sur la capacité de la France à atteindre ses objectifs de réduction de ses émissions de CO₂ et de proposer aux industriels fortement émetteurs de CO₂ une réelle possibilité de poursuivre leurs activités en France dans le respect de l'environnement, voire d'en accueillir de nouveaux sur notre territoire. Il est donc nécessaire de cerner la quantité d'émissions que cette technologie permettrait d'éviter sur le sol français et de s'interroger sur les capacités de stockage de notre territoire.

Dans le cadre de notre réflexion sur l'acceptabilité sociale de la technologie CSC, il nous paraît important de porter à la connaissance du grand public ces enjeux. Chaque citoyen doit en effet être capable d'apprécier l'intérêt de développer en France dans un premier temps des projets démonstrateurs et dans un second temps de véritables filières industrielles CSC.

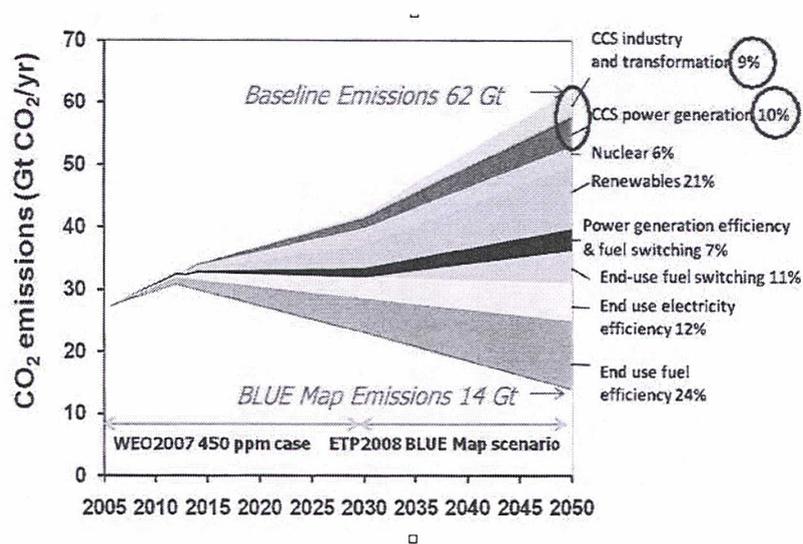
III.1 Les émissions évitables

III.1.1 Les émissions évitables au niveau mondial

La filière CSC concerne les grandes sources fixes d'émissions de CO₂ pour des raisons essentiellement économiques liées au coût des installations industrielles et des infrastructures. Le GIEC a retenu les installations industrielles émettant plus de 0,1 MtCO₂/an pour évaluer le potentiel des émissions concernées par le CSC.

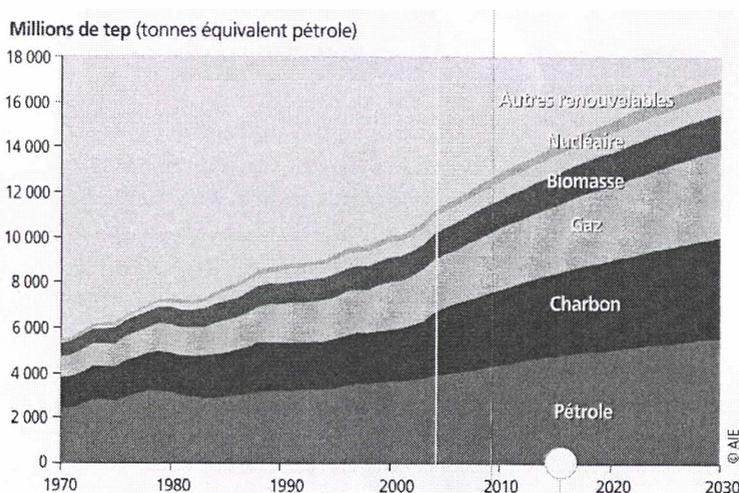
A partir de ce seuil, le GIEC, Petroleum Economist et BP ont procédé à des évaluations de ces sources fixes et des émissions associées. Il ressort que le CSC pourrait concerner environ 8 000 sources au niveau mondial représentant entre 13 et 16 GtCO₂/an. La production d'électricité représente près des deux tiers des sources fixes et entre les deux tiers et les trois quarts des émissions selon les estimations. Le reste des émissions se répartit au sein des industries lourdes tels le traitement du pétrole et du gaz, la cimenterie, le raffinage, la sidérurgie, la pétrochimie, ...

Dans le scénario BLUE Map, élaboré par l'AIE et permettant de réduire les émissions de CO₂ de 62 Gt (émissions de base sans action volontariste de limitation des émissions de CO₂) à 14 Gt à l'horizon 2050, satisfaisant ainsi l'objectif de 450 ppm de CO₂ dans l'atmosphère, la part du CSC représente près de 19% des réductions d'émissions en 2050.



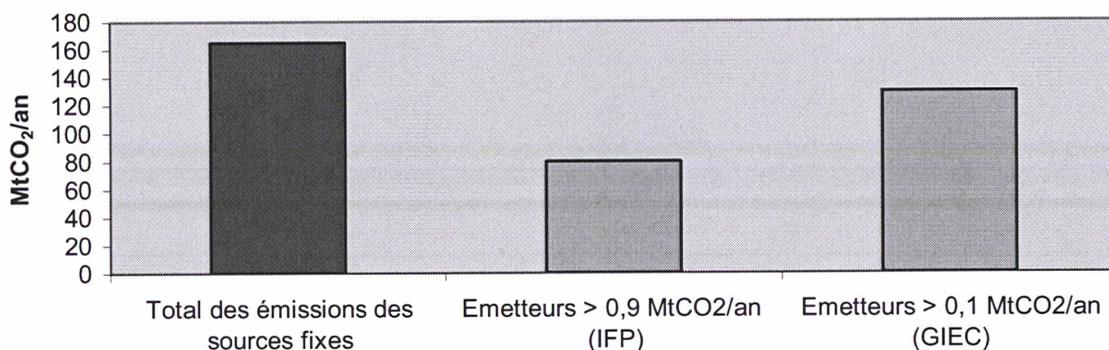
Options de réduction des émissions de CO₂, 2005-2050
 Source : [AIE, 2008]

Des réductions substantielles des émissions mondiales sont donc envisageables par cette technologie de transition CSC. D'après l'AIE, au rythme actuel, la demande globale en énergie primaire dans le monde va croître de plus de la moitié lors du prochain quart de siècle, avec un recours accru au charbon. La production du charbon est passée, au cours des trois dernières décennies, de 2 à 5 milliards de tonnes par an. Chine, Inde, Etats-Unis et l'Europe (Allemagne, Pologne, Russie) sont de gros consommateurs pour leur production d'électricité. Les réserves en charbon sont suffisantes pour au minimum un siècle et demi de consommation. Selon le scénario business as usual de l'AIE (sans changement de nos modes de vie et de développement), l'utilisation intensive de cette énergie aboutirait à une augmentation de 137 % des émissions de CO₂ d'ici 2050. Le recours au charbon n'est toutefois envisageable qu'avec des centrales à charbon « propre », c'est-à-dire des centrales équipées de la technologie CSC.



Evolution de la demande mondiale d'énergie
 Source : [BRGM, 2007]

III.1.2 Les émissions évitables en France



Les émissions potentiellement concernées par le CSC en France
Source : [IFP, 2010]

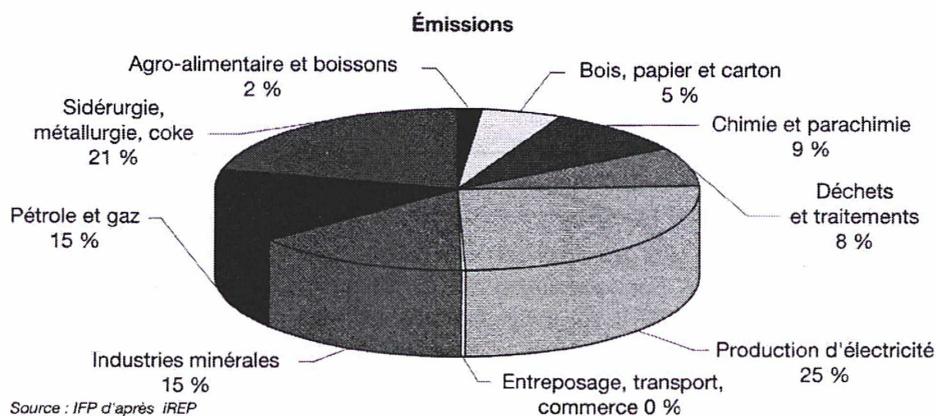
En 2005, le registre français des émissions polluantes (iREP) a répertorié 1 178 sites émetteurs de CO₂ avec obligation de déclaration de leurs émissions. Les émissions de CO₂ de ces sites ont été d'environ 165 MtCO₂ en 2005, soit 40 % des émissions totales de CO₂ (hors UTCF : 412 MtCO₂) en France.

Bien que le GIEC ait retenu un seuil bas d'émission de 0,1 MtCO₂/an par site, l'IFP considère qu'il est vraisemblable que, dans un premier temps, le CSC sera appliqué à des émetteurs de plus grande taille en raison des économies d'échelle nécessaires à la rentabilité des investissements engagés. Les seuils bas de 0,1 MtCO₂/an par site et de 0,9 MtCO₂/an par site définis respectivement par le GIEC et l'IFP permettent donc d'établir des fourchettes haute et basse du potentiel d'émissions concernées par le CSC en France. La détermination du potentiel d'émissions évitables à partir de cette fourchette basse permettra d'apprécier les enjeux du CSC en France.

III.1.2.1 Les sites émettant plus de 0,1 MtCO₂/an

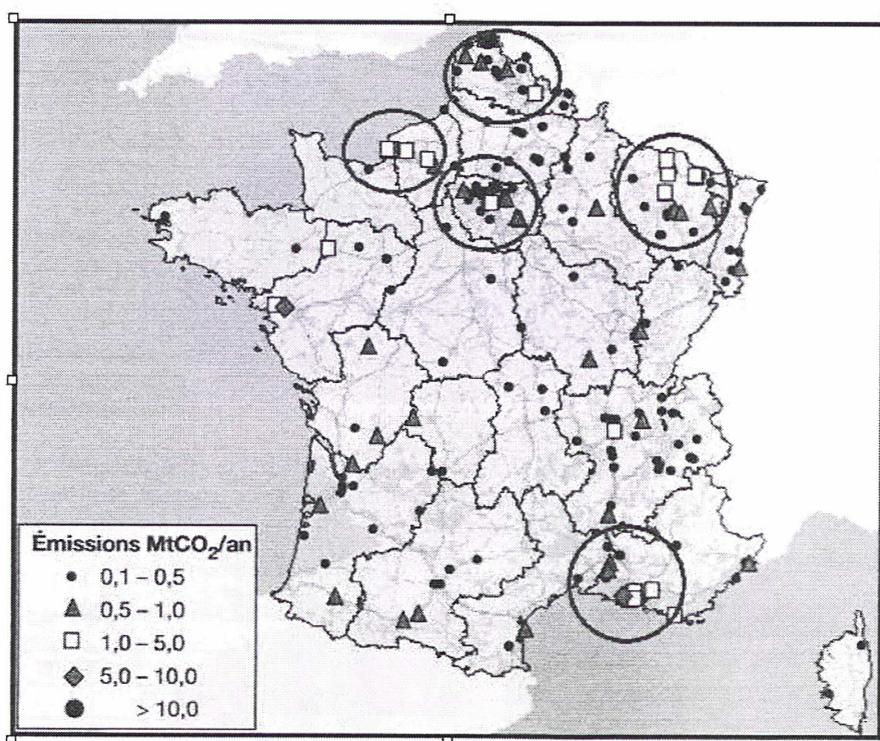
244 des 1 178 sites ont émis plus de 0,1 MtCO₂/an en 2005.

Ces 244 sites représentaient à eux seuls 80 % des 165 MtCO₂, soit environ 135 MtCO₂. Les quatre secteurs de la production d'électricité, des industries minérales, du pétrole et du gaz, et de la sidérurgie représentaient 58 % des émetteurs et 76 % des émissions.



Répartition sectorielle des émissions des sources fixes de plus de 0,1 MtCO₂/an en France en 2005
 Source : [IFP, 2010]

Ces 244 sites sont inégalement répartis sur l'ensemble du territoire. 72 % des émissions sont concentrées dans les régions PACA, Nord-Pas-de-Calais, Lorraine, Haute-Normandie et Île-de-France.

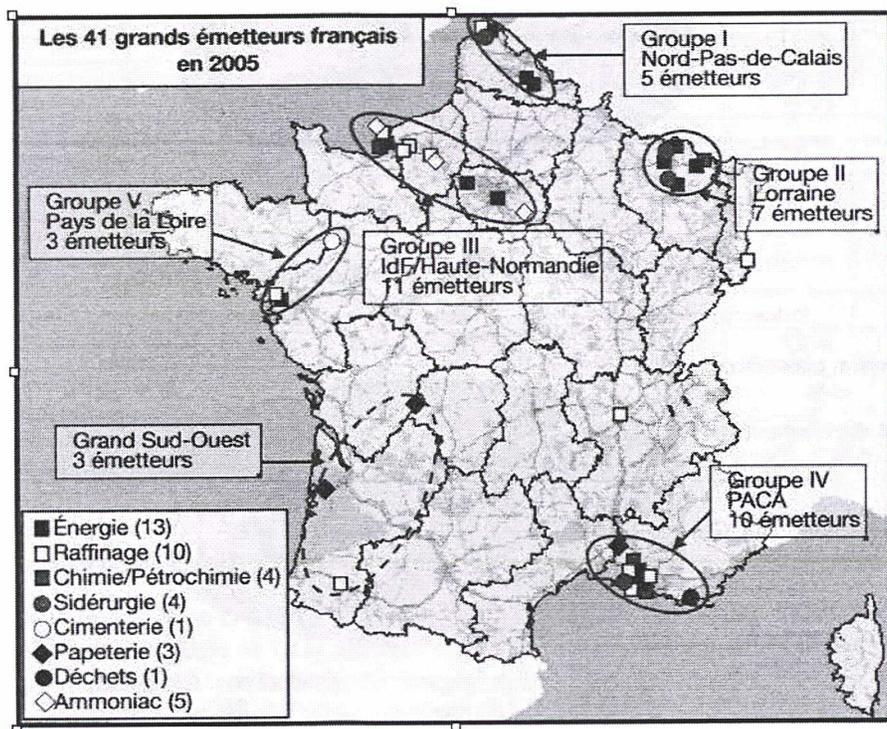


Sources fixes émettant plus de 0,1 MtCO₂ en France en 2005
 Source : [IFP, 2010]

III.1.2.2 Les sites « grands émetteurs » émettant plus de 0,9 MtCO₂/an

En France, 41 sites « grands émetteurs » sont donc concernés pour un total d'émissions d'environ 80 MtCO₂/an en 2005.

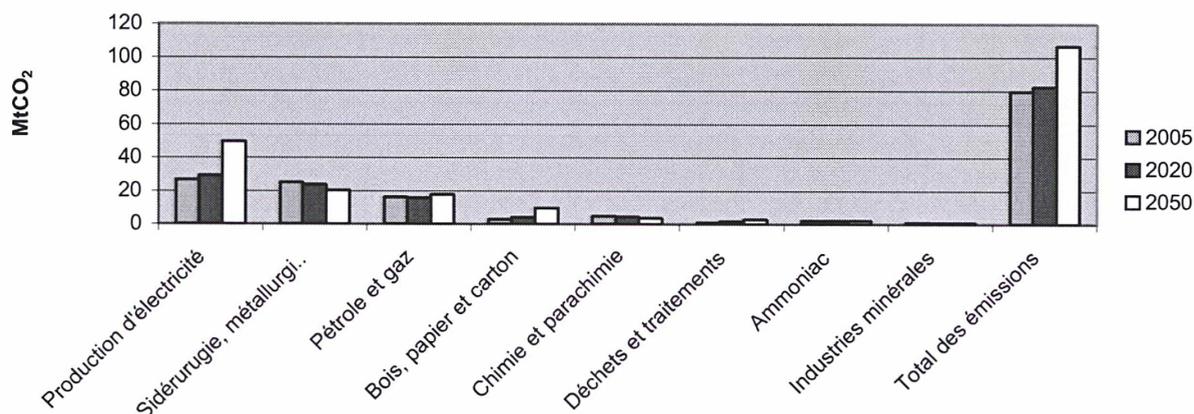
Il est également important de souligner que 86% des émissions de ces grands émetteurs proviennent de 5 régions situées d'une part dans la moitié nord de la France (Île-de-France / Haute Normandie : 21 % ; Nord-Pas-de-Calais : 20 % ; Lorraine 19 %), d'autre part dans le sud-est (PACA : 26 %).



Grands émetteurs français en 2005

Source : [IFP, 2010]

Le Centre d'Analyse Stratégique a estimé l'évolution de ces émissions entre 2005 et 2050. Il en ressort que ce potentiel d'émissions serait d'environ 107 MtCO₂/an en 2050 et que 3 secteurs d'activités représenteraient à eux seuls plus de 80 % des émissions sur cette période : production d'électricité ; sidérurgie, métallurgie, coke ; pétrole et gaz. La part de la production d'électricité augmente en raison du développement de la production thermique à flamme pour atteindre en 2050 presque 50 % du total des émissions des grands émetteurs.

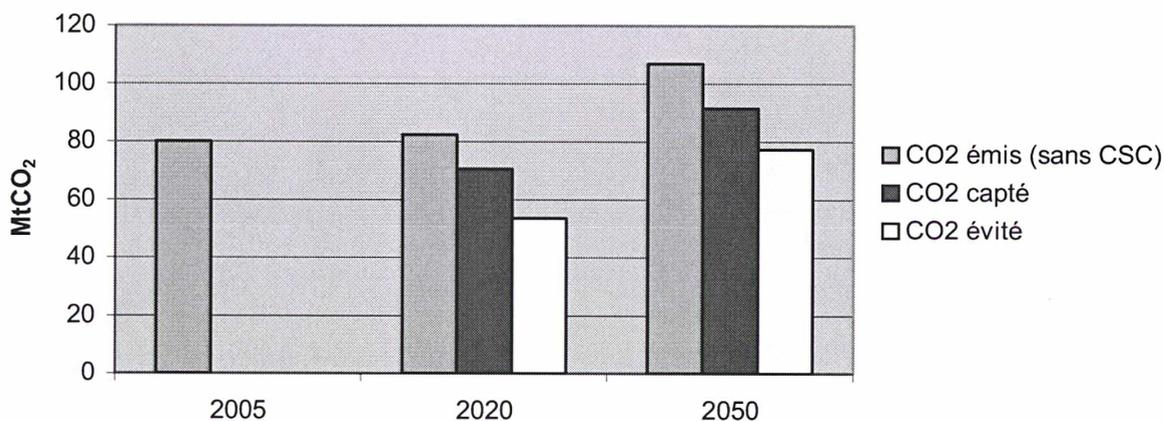


Evolution des émissions de CO₂ des grands émetteurs
Source : [IFP, 2010]

III.1.2.3 Les émissions évitables des sites « grands émetteurs »

Les émissions des sites « grands émetteurs » potentiellement concernées par le CSC ne seront pas toutes évitées grâce au CSC. En effet, le potentiel d'émissions évitées est fonction de différents paramètres :

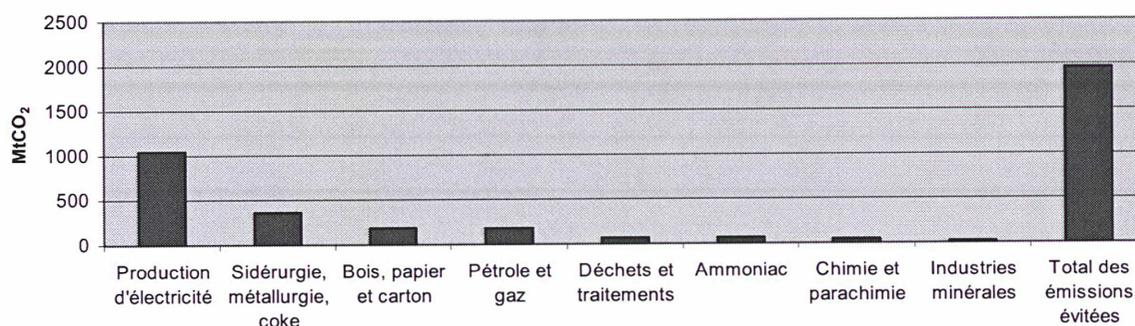
- l'augmentation des émissions de CO₂ engendrée par l'énergie additionnelle nécessaire au captage du CO₂ (20 % en moyenne à l'horizon 2020) ;
- le pourcentage des fumées traitées sur les sites variable selon le secteur industriel considéré ;
- le taux de CO₂ capté dans les fumées.



Evolution des émissions de CO₂ évitées des grands émetteurs
Source : [IFP, 2010]

Ce potentiel d'émissions évitées au niveau des « grands émetteurs » est estimé par l'IFP à :

- 65 MtCO₂/an en moyenne sur la période 2020 – 2050 (53 MtCO₂ en 2020, année prévue pour le déploiement du CSC à l'échelle industrielle ; 77 MtCO₂ en 2050), soit environ 16 % du total des émissions françaises actuelles ;
- 2 GtCO₂ sur la période 2020 – 2050 (production d'électricité : 53 % ; sidérurgie, métallurgie, coke : 19 % ; bois, papier et carton : 9 % ; pétrole et gaz : 9 %).



Répartition sectorielle du potentiel d'émissions évitées (cumul 2020-2050)
Source : [IFP, 2010]

Ce potentiel d'émissions évitées pourrait être plus important dans une seconde phase de déploiement du CSC si l'on prenait en compte l'ensemble des sites émettant plus de 0,1 MtCO₂/an. Toutefois, ce potentiel d'émissions évitées reste théorique et ne prend pas en compte les éventuelles contraintes de stockage. Ce potentiel d'émissions évitées de 2 GtCO₂ sur la période 2020-2050 nécessite en effet des capacités de stockage d'environ 2,4 GtCO₂ du fait des émissions supplémentaires dues au captage du CO₂.

III.2 Les capacités de stockage

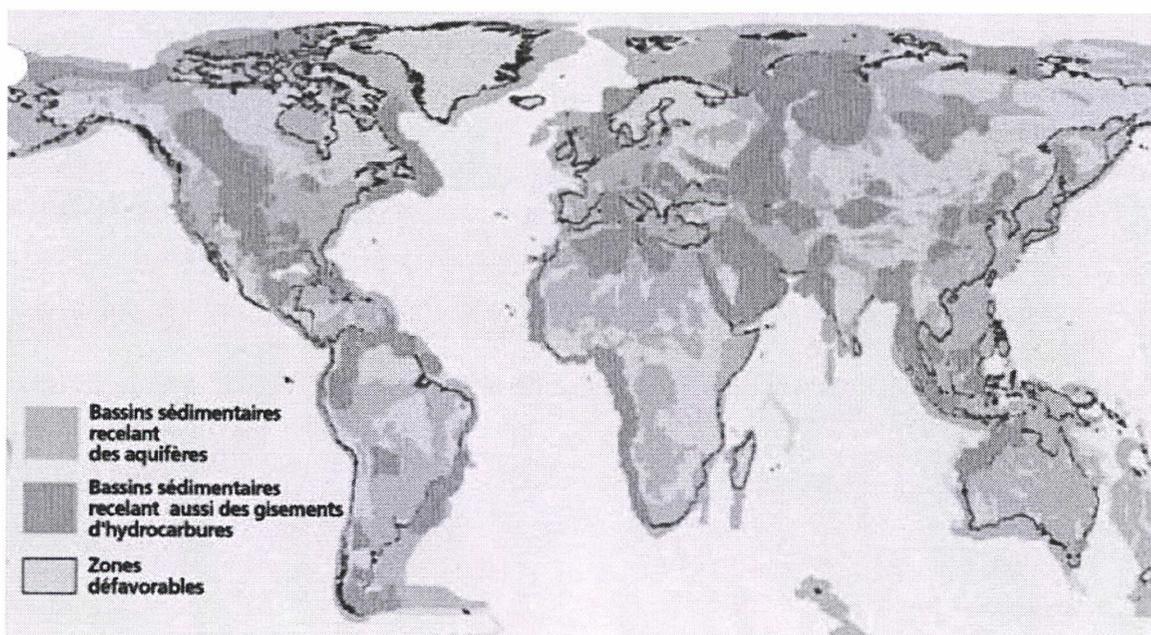
Une remarque préliminaire importante est à souligner lorsque l'on aborde le sujet des capacités de stockage de CO₂. Le réseau d'excellence européen CO₂GeoNet attire en effet l'attention des décideurs politiques, des organismes de réglementation et des exploitants sur l'aspect approximatif des estimations des capacités de stockage. Les capacités nationales publiées sont généralement basées sur le volume poreux des formations. Mais comme les pores sont déjà occupés par de l'eau, seule une petite partie d'entre elles peut être utilisée pour le stockage du CO₂, généralement entre 1 et 3 %. La détermination de capacités plus réalistes sur différents sites de stockage nécessite des investigations plus détaillées. Par ailleurs, la capacité n'est pas une simple question de physique des roches. Il faut aussi tenir compte des facteurs socio-économiques pour déterminer si un site propice au stockage sera ou non utilisé.

III.2.1 Les capacités de stockage au niveau mondial

Le stockage géologique du CO₂ est envisageable dans les bassins sédimentaires largement répartis dans le monde. Deux principaux types de stockage du CO₂ sont aujourd'hui considérés.

Le stockage dans des gisements d'hydrocarbures, réservoirs aux caractéristiques géologiques bien connues, présente toutefois des capacités mondiales limitées, estimées par l'AIE à 930 GtCO₂. De plus, ils sont souvent loin des sites d'émissions.

Le stockage dans des aquifères salins profonds présente en revanche, des capacités mondiales estimées plus importantes (jusqu'à 10 000 GtCO₂), même si ces réservoirs sont encore peu caractérisés scientifiquement. Toutefois, ces réservoirs sont bien mieux répartis sur le plan géographique, ce qui permettrait l'implantation de sites de stockage à proximité des sources d'émissions.



Carte des principaux bassins sédimentaires au niveau mondial
Source : [BRGM, 2007]

Les estimations de ces capacités de stockage, comparées aux émissions de CO₂ estimées à environ 27 GtCO₂/an toutes sources confondues, et la bonne répartition géographique de ces capacités sont des facteurs favorables au développement du CSC sur le plan mondial.

III.2.2 Les capacités de stockage au niveau européen

Une étude « EU GeoCapacity » menée au niveau européen entre 2006 et 2008 et à laquelle ont notamment participé le BRGM et l'IFP, permet d'avoir aujourd'hui une meilleure visibilité sur les capacités de stockage on-shore et off-shore dans les différents pays européens.

Les premières estimations des capacités de stockage ont été réalisées à partir des données fournies par les différents pays. Elles ont mis en évidence une capacité totale de stockage de 360 GtCO₂ répartie en 326 GtCO₂ dans les aquifères salins profonds, 32 GtCO₂ dans les gisements d'hydrocarbures déplétés et 2 GtCO₂ dans les veines de charbon inexploitées. La capacité de stockage on-shore était de 116 GtCO₂ et la capacité de stockage off-shore était de 244 GtCO₂. 82 % des capacités off-shore, soit environ 200 GtCO₂, étaient localisées en Norvège.

Par la suite, dans le cadre de cette étude, des estimations plus réalistes ont été réalisées pour chaque pays.

Country	Annual total CO ₂ emissions (Mt)	Annual CO ₂ emissions from large point sources (Mt)	CO ₂ storage capacity in deep saline aquifers (Mt)	CO ₂ storage capacity in hydrocarbon fields (Mt)	CO ₂ storage capacity in coal fields (Mt)
Slovakia	46	23	1716	-	-
Estonia	21	12	-	-	-
Latvia	4	2	404	-	-
Lithuania	18	6	30	7	-
Poland	325	188	1761	764	415
Czech Republic	128	78	766	33	54
Hungary	79	23	140	389	87
Romania	74	67	7500	1500	-
Bulgaria	52	42	2100	3	17
Albania	0	0	20	111	-
FYROM	6	4	390	-	-
Croatia	23	5	2710	189	-
Spain	423	158	14000	34	145
Italy	212	140	4669	1810	71
Slovenia	20	7	92	2	-
Bosnia-Herzegovina	-	9	197	-	-
Germany	864	465	14900	2180	-
Luxemburg	-	-	-	-	-
The Netherlands	180	92	340	1700	300
France	-	131	7922	770	-
Greece	110	69	184	70	-
United Kingdom	555	258	7100	7300	-
Denmark	52	28	2553	203	-
Norway	-	28	26031	3157	-
Belgium	-	58	199	-	-
Total	-	1893	95724	20222	1089

European summary of CO₂ emissions and storage capacity estimates
Source : [EU GeoCapacity, 2009]

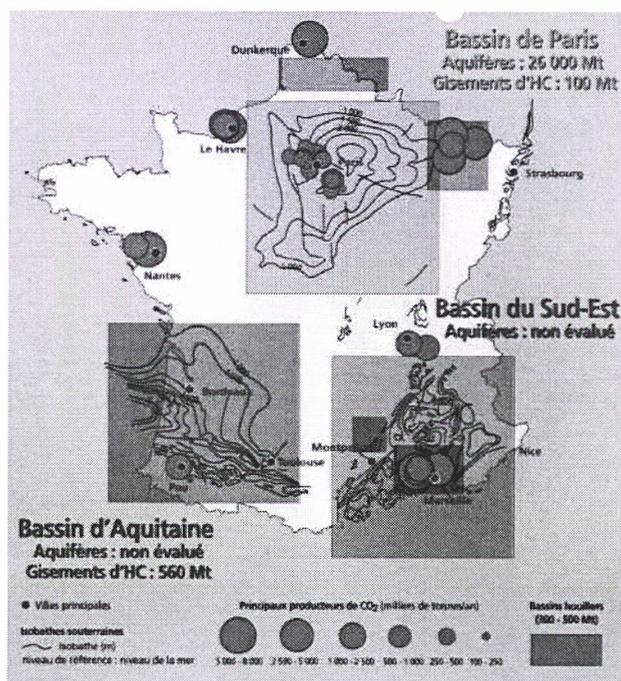
Il ressort de cette étude que les capacités totales de stockage peuvent être estimées à 96 GtCO₂ dans les aquifères salins profonds, 20 GtCO₂ dans les gisements d'hydrocarbures déplétés et 1 GtCO₂ dans les veines de charbon inexploitées. Ce total de 117 GtCO₂, dont 25 % (soit environ 29 GtCO₂) est concerné par l'off-shore en Norvège, porte donc principalement sur le stockage dans les aquifères salins profonds. Il doit être comparé au total des émissions des sites émettant plus de 0,1 MtCO₂/an (seuil bas retenu par le GIEC) des différents pays, soit environ 1,9 GtCO₂/an. Cette estimation de la capacité totale de stockage de 117 GtCO₂ représente donc environ 62 ans de stockage de ces émissions. Ceci montre une faisabilité du CSC sur le plan européen mais met en évidence également une limite dans le temps pour cette technologie de transition.

Par ailleurs, les possibilités de stockage en off-shore dont 82 % sont détenues par la Norvège, sont limitées. La capacité off-shore de la Norvège ne représente en effet qu'environ 15 ans de stockage de ces émissions des différents pays.

De ce qui précède, il ressort que le CSC est une technologie capable de se développer sur le plan européen et que chaque pays qui est en mesure de le faire, doit développer des capacités de stockage on-shore afin de ne pas se rendre dépendant des pays disposant de capacités off-shore a priori limitées.

III.2.3 Les capacités de stockage en France

En France, d'après le BRGM, le stockage dans les aquifères salins profonds présente des capacités importantes de stockage avec un potentiel estimé à 26 GtCO₂ dans le bassin de Paris et un potentiel restant à évaluer dans le bassin d'Aquitaine et le bassin du sud-est. Le potentiel de stockage dans les gisements d'hydrocarbures est estimé à moins d'1 GtCO₂.



Répartition des émetteurs de CO₂ en France et principaux bassins sédimentaires
Source : [BRGM, 2007]

Toutefois, ces estimations du BRGM ont été revues à la baisse dans le cadre de l'étude « EU GeoCapacity », notamment pour le bassin de Paris où la capacité de stockage dans les aquifères salins profonds est estimée à environ 8 GtCO₂. Ce potentiel permettrait toutefois de stocker environ un demi-siècle des sites français émettant plus de 0,1 MtCO₂/an (seuil bas retenu par le GIEC) et un siècle des sites français émettant plus de 0,9 MtCO₂/an (seuil bas retenu par l'IFP).

Le bassin de Paris, de par son emprise géographique, permettrait de stocker les émissions des sites de la moitié nord de la France. Sous réserve d'une évaluation de ses capacités de stockage, le bassin du sud-est permettrait de stocker les émissions des sites de la région sud-est (notamment PACA) et ce afin d'optimiser les distances de transport du CO₂. Le bassin d'Aquitaine présente, en revanche, moins d'intérêt pour le stockage, du fait de la plus faible présence de grands émetteurs. Il n'est cependant pas à écarter de la réflexion.

Même si le stockage off-shore en mer du Nord n'est pas une solution viable du fait de ses capacités limitées et de la nécessité d'optimiser les distances de transport (15 \$/tCO₂ pour 1000 km selon le GIEC), la présence sous la mer Méditerranée de bassins sédimentaires pourrait permettre d'envisager du stockage de CO₂ en off-shore pour les émetteurs du sud de la France.



Principaux bassins sédimentaires en Europe
Source : [BRGM, 2007]

Enfin, dans les zones frontalières et toujours pour des raisons d'optimisation des distances de transport, il n'est pas à exclure de stocker le CO₂ des sites français dans des stockages de pays limitrophes. Toutefois, comme le montre le tableau du chapitre II.2.2, ces pays limitrophes ne disposent pas de capacités potentielles surdimensionnées pour le stockage de leurs propres émissions (Espagne : 90 ans ; Italie : 47 ans ; Allemagne : 37 ans ; Belgique : 3 ans).

En conclusion, la France dispose de capacités de stockage proches des émetteurs et a priori suffisantes pour recevoir les quantités de CO₂ concernées par le CSC, même si de plus amples recherches doivent encore être menées afin de les caractériser plus précisément.

II.3 Les enjeux économiques

Les conditions techniques pour le déploiement du CSC en France, en Europe et plus généralement à l'échelle mondiale, semblent donc être réunies tant en termes d'émissions potentiellement évitables par cette technologie que de disponibilité de capacités de stockage du CO₂.

La France, avec ses acteurs industriels de premier plan, est donc doublement intéressée par cette technologie, d'une part pour l'exporter à l'étranger et se positionner en leader technologique dans ce secteur, d'autre part pour respecter sur le sol français ses objectifs de réduction des émissions de CO₂ tout en conservant ses industries.

L'obstacle majeur restant à résoudre pour que cette technologie puisse réellement se développer dans les années à venir est d'ordre économique. En effet, le coût global de la technologie CSC pour les industriels est évalué à ce jour entre 60 et 100 €/tCO₂. Pour illustrer l'impact économique d'un tel coût, il est intéressant d'examiner sur quelques exemples les augmentations sensibles du prix de vente des produits fabriqués. Par exemple, pour la sidérurgie, cela entraînerait une hausse de moitié du prix de vente actuel de la tonne d'acier. Dans le cadre d'une centrale thermique de 500 MW, cela se traduirait par une augmentation de 50 à 70 % du prix du kWh électrique.

Aujourd'hui, le stockage de CO₂ est parfois rentable grâce à l'injection de CO₂ dans des gisements d'hydrocarbures en déclin, car l'injection permet de récupérer une fraction supplémentaire d'hydrocarbures. Toutefois, ces capacités de stockage sont limitées, et le but premier n'est pas de stocker du CO₂. Il faut donc aborder la rentabilité d'installations dont l'objectif unique est de stocker du CO₂, comme c'est le cas pour les aquifères salins profonds présents en France.

Deux pistes sont à explorer pour se situer dans un environnement économique favorable au déploiement de la technologie CSC : la première est de réduire les coûts de la filière CSC, la seconde est de donner un coût suffisant au CO₂ émis.

Aujourd'hui, 70 à 85 % du coût de la filière CSC est lié à l'opération de captage du CO₂, au sein de l'installation industrielle. C'est à ce niveau que se situent les principaux obstacles industriels, en termes d'investissement pour adapter les installations, et de coûts d'exploitation liés à la quantité d'énergie supplémentaire requise (20 % en moyenne).

Ce dernier point impose un déterminant structurel capital pour l'avenir du CSC. Il signifie que le déploiement du CSC est en partie conditionné par le maintien d'un prix modéré

des énergies fossiles. Avec un renchérissement colossal des combustibles fossiles, le CSC ne serait plus compétitif par rapport aux modes de production d'énergie sans fossiles. D'un point de vue économique, le monde où peut s'installer le CSC est défini par une contrainte climatique forte et une contrainte pétrole faible, c'est-à-dire que le prix du CO₂ est élevé, relativement au prix des combustibles fossiles.

De multiples travaux de recherche et développement sont en cours sur les technologies de captage (postcombustion, précombustion, oxycombustion), afin d'en améliorer la performance et d'en réduire le coût. Si travaux de recherche et effets d'apprentissage au fil des projets permettent d'espérer une diminution progressive du coût, de nombreuses barrières restent à franchir avant de diviser par trois ou quatre les coûts, comme cela est espéré par les chercheurs. A ce sujet, le rôle de l'Etat dans la promotion de la technologie et le financement de la recherche apparaît primordial.

La mise en place d'installations pilotes et d'unités de démonstration (étape pré-industrielle) est nécessaire avant d'envisager le déploiement de la technologie CSC. Même si certains de ces projets portés par des acteurs français se déroulent dans d'autres pays, d'autres verront le jour sur le sol français. Disposer d'une vitrine technologique sur notre territoire est souhaitable pour montrer que la France se veut leader sur le sujet. L'acceptation sociale ne portera pas uniquement sur les projets industriels mais également sur ces unités de démonstration qui doivent permettre de valider techniquement et économiquement la technologie.

Le coût du CO₂ émis continuera à augmenter, si les Etats restent déterminés à lutter contre les émissions de GES à la hauteur des ambitions affichées. En Europe, nous considérons que le resserrement de la politique climatique, qui, dans le système des quotas, se matérialisera par la réduction progressive des quotas de CO₂ accordés à chaque Etat, entraînera une augmentation du cours de la tonne de CO₂, qui rendra rentable à terme la technologie CSC.

Chapitre IV

Sécurité, prévention des risques : des conditions préalables à l'acceptation sociale.

Si l'ensemble de la filière CSC, comme nombre d'activités industrielles, présente des risques pour l'environnement et pour l'homme, il est important de comprendre comment ceux-ci se répartissent entre les différentes étapes de la filière, capture, transport et stockage. Toutefois, l'objet du présent mémoire n'est pas un état de l'art exhaustif sur les risques de chaque procédé. Nous nous sommes donc attachés ici à rendre compte des risques qui feront débat au sein de la société, le jour où l'on envisagera le déploiement du CSC à l'échelle industrielle.

En ce qui concerne la partie captage, quelle que soit la technologie retenue (post-combustion, oxy-combustion...), les projets consisteront en des modifications d'installations industrielles existantes, ou feront partie d'une demande, plus globale, d'autorisation d'exploiter une installation industrielle nouvelle. Le traitement des risques liés au système de captage du CO₂ proprement dit sera ainsi comparable au traitement des risques technologiques liés à l'exploitation d'une installation industrielle classique. Leur prévention sera en particulier contrôlée dans le cadre de la réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). En ce sens, le captage de CO₂ ne nous semble pas soulever de problématique nouvelle, en matière d'acceptabilité sociale. C'est pourquoi nous avons choisi, dans cette partie, de ne pas aborder plus avant la question du captage.

De manière analogue, le transport de CO₂ est, aujourd'hui, envisagé par pipe-line et par bateau. A ce titre, les problèmes de prévention des risques soulevés sont de même nature que pour les infrastructures de transport de gaz naturel existantes. Et en outre, contrairement au gaz naturel, le CO₂ n'est pas explosif, ce qui diminue grandement les risques d'accident. Là encore, ceci explique notre choix de ne pas aborder en détail le problème du transport.

A l'inverse, le stockage souterrain du CO₂ soulève, lui, bien des incertitudes nouvelles. Fuites, remontées de CO₂, pollution des sols et des aquifères souterrains... sont autant de risques en partie nouveaux, qui seront engendrés par les futurs sites de stockage. Nous avons cherché à en savoir plus sur ces sujets, et tenté d'imaginer ce que seront les attentes de la société en termes de prévention de ces nouveaux risques. La composition et le comportement du fluide injecté dans le sous-sol sont en fait des points clefs du problème, et de nombreux efforts de recherche sont réalisés aujourd'hui, afin d'améliorer la connaissance de ces phénomènes. De notre analyse de ces questions, il est ressorti que la société portera une très grande attention aux réponses qui lui seront apportées, au moment où les premiers projets CSC d'échelle industrielle verront le jour.

Nous tentons, dans ce chapitre, de présenter les connaissances actuelles sur les risques liés au stockage de CO₂, en montrant les zones d'ombre qui subsistent. Plus particulièrement, sur les questions d'acceptabilité sociale, nous présentons dans ce chapitre certains points qui nous semblent revêtir une importance particulière, si l'on souhaite susciter la confiance de la société civile. Dans l'optique d'une démarche de concertation et de débat public, ceux-ci nous ont semblé autant de pierres d'angle d'une réflexion collective, la plus transparente et la plus bénéfique possible.

IV.1. Des risques à démystifier, mais aussi à comprendre

IV.1.1. Le CO₂ n'est pas un gaz toxique

Il faut savoir que nous respirons du CO₂ en permanence, car celui-ci est présent naturellement dans l'atmosphère, à une concentration un petit peu inférieure à 0,04 %... Très exactement 375 ppm (soit 0,0375 %) selon le GIEC, qui nous explique que le dépassement de 450 ppm impliquera un réchauffement de la température globale de la planète supérieur à deux degrés, avec une probabilité de 50 %. Mais le CO₂ peut-il aussi être toxique pour l'homme, directement ? Nous tentons de répondre à cette question, en montrant que les concentrations atmosphériques en question n'ont rien de comparable avec les seuils de toxicité connus pour le CO₂.

Fraction inspirée de CO ₂	
> 7 %	Effets secondaires peu spécifiques (*), ayant valeur d'alarme dans un contexte évocateur
> 15 %	Perte de connaissance sans prodromes
> 20 %	Clonies, apnée sans prodromes
> 30-40 %	Mortalité
Fraction inspirée de O ₂	
< 15-16 %	Céphalées, sudation, hyperventilation
< 10 %	Stupeur, amnésie, incoordination motrice
< 6-8 %	Perte de connaissance, arrêt cardio-respiratoire

(*) Abattement, faiblesse des membres, céphalées, anxiété, sensation de fatigue intense, paresthésies, vertiges, dyspnée, inattention, jambes tremblantes, troubles visuels, palpitations, impression d'être confus, bouffées de chaleur, douleur thoracique.

Symptomatologie rapportée au cours des intoxications au CO₂, en fonction de la concentration atmosphérique.

Les effets dus au CO₂ sont visibles à partir d'une concentration de 7 %, toutefois, l'intoxication au CO₂ est souvent due aussi à une absence d'oxygène dans l'air inspiré.

Source : [INRS, 1999]

De l'information sur les seuils de toxicité du CO₂ peut être trouvée par exemple auprès de l'INRS (INRS, Dossier Médico Technique 79 TC 74, Intoxication par Inhalation de Dioxyde de Carbone, 1999). On y trouve entre autres un historique d'accidentologie dû au CO₂, qui mentionne plusieurs accidents, souvent liés à des sources de fermentation en milieu confiné (transport de céréales à fond de cale de navire, production de boissons alcoolisées), ou à l'utilisation du CO₂ dans des procédés industriels. Toutefois, la symptomatologie présentée par l'INRS montre que le CO₂ n'est dangereux pour l'homme qu'à partir de concentrations supérieures à 7 %, soit à peu près 200 fois la concentration présente actuellement dans l'atmosphère (voir ci-dessus). A titre de comparaison, la toxicité du monoxyde de carbone (CO), gaz responsable de la plus grande partie des intoxications accidentelles, commence à se faire ressentir dès 100 ppm chez l'adulte, soit 0,01 %, concentration inférieure à celle du CO₂ dans l'air !

Les intoxications au CO₂ sont en fait liées à l'inhalation d'un air appauvri en oxygène, les premiers effets apparaissant lorsque la concentration en oxygène dans l'air passe en dessous de 16 %. C'est pour cette raison que l'on peut dire que le CO₂ n'est pas un gaz toxique, car les accidents rencontrés sont aussi liés à ce manque d'oxygène, causant l'asphyxie.

Cette non-toxicité devra être rappelée au public, car elle est un facteur de nature à rassurer les populations, en particulier vis à vis d'éventuelles canalisations de transport de CO₂ on-shore. Un pipe-line de transport de CO₂ est a priori moins dangereux qu'un pipe-line transportant du gaz naturel ! Si nous pensons par exemple au pilote CSC de Total sur le site

de Lacq, le CO₂ capté est ensuite réinjecté dans un ancien réservoir de gaz naturel (le réservoir de Rousse). A l'occasion de la démarche de concertation publique, Total a ainsi pu expliquer le CO₂ réinjecté est bien moins dangereux que le mélange de méthane (CH₄) et de sulfure d'hydrogène (H₂S) contenu initialement dans le réservoir, avant son exploitation.

IV.1.2 Toutefois, les risques de remontée de CO₂ existent.

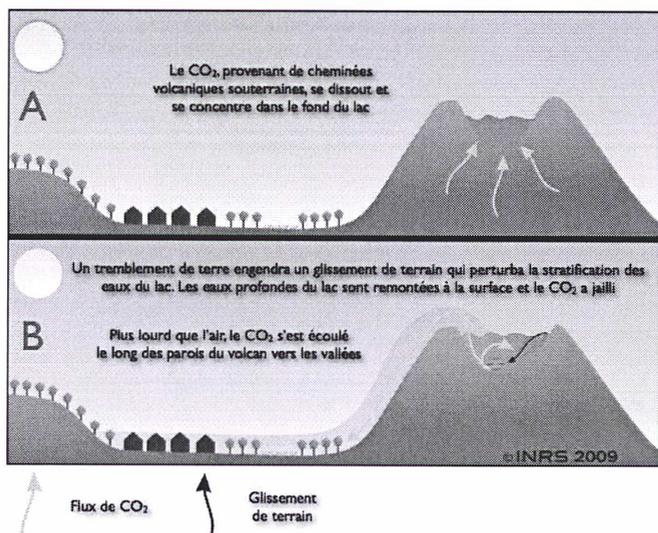
Si les seuils de toxicité du CO₂ n'ont rien à voir avec les concentrations atmosphériques, il faut cependant garder à l'esprit que le CO₂, plus dense que l'air, a tendance à s'accumuler auprès du sol, dans les dépressions de terrain et les zones confinées. C'est ceci qui a été le facteur aggravant lors de la catastrophe naturelle du lac Nyos au Cameroun, en 1986. Ce lac volcanique, aux eaux chargées en CO₂, s'était subitement mis à dégazer dans l'air de fortes quantités de CO₂. La cause initiale était un éboulement interne au fond des eaux, qui provoqua un effet de remous et de mélange des eaux, analogue à celui bien connu qui se produit lorsque l'on secoue une boisson gazeuse. Le lac libéra alors dans l'atmosphère d'importantes quantités de CO₂, en l'espace d'une seule nuit. Le CO₂, plus lourd que l'air comme indiqué plus haut, s'est alors accumulé en contrebas des pentes du volcan, asphyxiant 1800 personnes résidant dans les villages alentours.

Une explosion d'une canalisation de CO₂, ou une fuite dans un stockage de CO₂, pourraient-elles causer une catastrophe de telle ampleur ? Non, car la situation volcanique du lac Nyos n'a rien de comparable. En effet, lors de la catastrophe, l'ensemble du CO₂ fut dégazé en la durée d'une nuit ! Et si l'on considère le cas d'une fuite au sein d'un stockage géologique de CO₂, il faut avoir à l'esprit que les stockages on-shore sont envisagés à une profondeur supérieure à 800 mètres. Cette profondeur est nécessaire afin d'atteindre les conditions de température et de pression où le CO₂, à l'état supercritique, occupera un volume minimal. La roche de couverture du réservoir, imperméable, puis les 800 mètres de roche la surplombant, joueront alors un rôle de barrière rendant impossible un dégazage aussi rapide.

Il nous semble important, dans une démarche d'explication au public, d'expliquer ces éléments qui permettent de comprendre que le niveau intrinsèque de dangerosité n'a rien à voir avec le cas du Lac Nyos, et a fortiori, avec d'autres risques technologiques déjà présents sur notre territoire. En particulier, la dangerosité d'un stockage de CO₂ n'a rien de comparable à celle d'une installation nucléaire, et paraît moindre que celle de n'importe quel stockage d'hydrocarbures sous pression.

Un autre point de nature à permettre au public de se représenter le risque réel est l'existence de gisements de CO₂ à l'état natif dans les sols. Au sud de la France, il existe de nombreux aquifères contenant du CO₂, certains étant même exploités : le plus connu étant celui donnant naissance aux sources Perrier à Saint-Galmier. Cependant, il existe aussi des cas de remontée de CO₂ natif en surface. C'est le cas en Italie, à Ciampino, à côté de Rome. La fuite libre, de manière journalière, 7 tonnes de CO₂ dans l'atmosphère, sur une zone de quelques mètres carrés. Les photographies des zones concernées montrent une absence de végétation sur quelques mètres autour de la fuite, les arbres situés à une dizaine de mètres n'étant pas affectés. Cet analogue naturel semble être plus réaliste, vis-à-vis de ce que pourraient être les fuites sur les futurs stockages de CO₂. Et si les effets sont circonscrits à quelques mètres carrés de terrain, ils sont bel et bien réels ! En ce sens, ils doivent être pris en considération, car il n'est pas concevable que de tels effets se multiplient à grande échelle, sur une multiplicité de sites.

Il nous semble important que de tels exemples de fuite, plus représentatifs des risques liés au stockage de CO₂, soient présentés au public de manière transparente. Car si le risque associé aux stockages de CO₂ doit être relativisé, il ne doit pas être négligé ou sous-estimé. Ce qui implique que les futurs projets de stockage de CO₂ devront inclure une démarche de prévention des risques sérieuse et transparente.

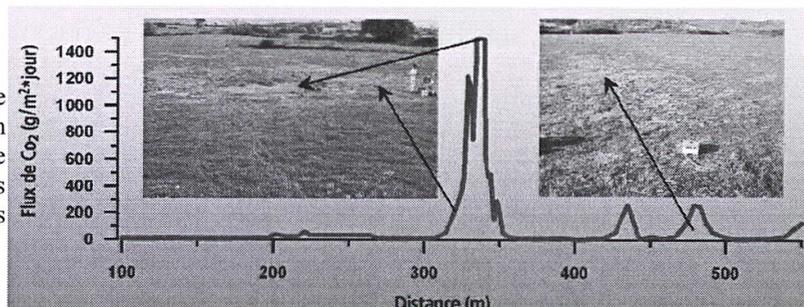


L'accident du lac Nyos (Cameroun), le 21 août 1986

Comprendre l'accident et son origine volcanique permet de différencier celui-ci des stockages de CO₂ : ceux-ci ne seront pas situés sur les pentes de volcans, émetteurs naturels de CO₂ (130 millions de tonnes par an).

Illustration : Site de l'INRS www.inrs.fr
Photo : www.volcanisme.explosif.free.fr

Site de Ciampino (Italie)
Cet exemple de remontée naturelle de CO₂ est un scénario de fuite bien plus probable pour un stockage souterrain de CO₂. Les dommages sur la végétation sont certes circonscrits, mais réels.
Source : [CO₂GEONET, 2008]



IV.2. Les risques de remontée de CO₂

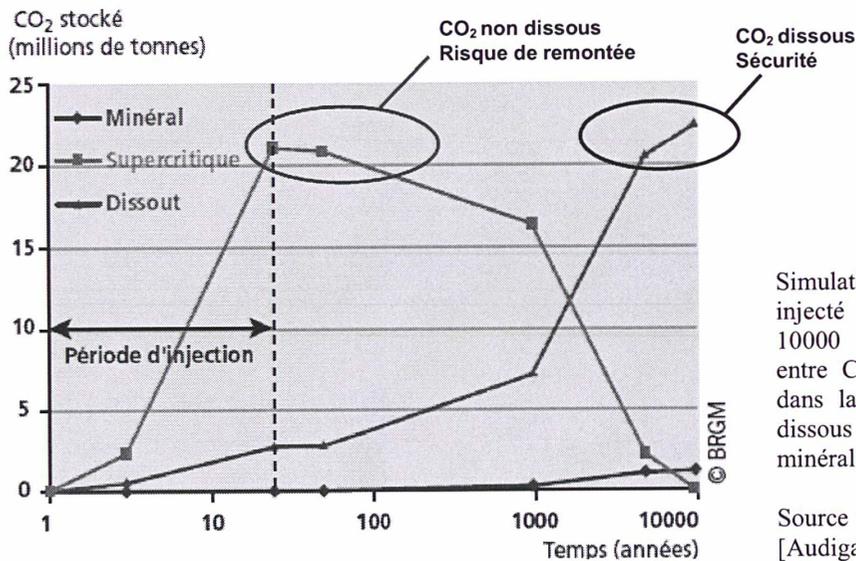
La connaissance du comportement du CO₂ au sein des aquifères après leur stockage est un axe de recherche actuel très important. Comprendre le comportement et la migration du CO₂ dans les aquifères permettra de mieux prévoir la faisabilité des stockages. Rappelons, à cette occasion, qu'un réservoir géologique est constitué par la superposition de deux couches géologiques, dans le sous-sol d'un bassin sédimentaire. La couche supérieure imperméable, généralement argileuse, est appelée *couverture*, par opposition à une couche inférieure poreuse. Cette dernière est appelée *aquifère*, car elle contient un fluide au sein des pores de la roche. Les réservoirs de combustibles fossiles sont en général situés là où des plis géologiques créent une structure en dôme, retenant le fluide contenu dans la roche poreuse. Le stockage

géologique du CO₂ en aquifère est aujourd'hui envisagés dans de telles couches géologiques, dans des structures plissées type réservoir, ou non plissées.

IV.2.1. Comprendre le fonctionnement des stockages en aquifères

Des modèles mathématiques sont en développement, afin de mieux comprendre le comportement du CO₂ au sein des couches géologiques. Ces modèles mettent en jeu des équilibres physico-chimiques complexes, entre autres : la migration du CO₂ supercritique au sein de l'aquifère, la dissolution du CO₂ dans la saumure, l'adsorption au contact de la roche poreuse, la précipitation avec les espèces minérales dissoutes... l'ensemble sous la contrainte de surpression due à l'injection.

C'est à l'aune de telles simulations qu'Audigane et al. (2007, BRGM) ont pu, à propos du pilote de Sleipner en Norvège, montrer que les migrations du CO₂ doivent être considérées sur des durées de l'ordre de 10 000 ans. L'évolution du CO₂ au sein de l'aquifère peut ainsi être décrit schématiquement en 3 étapes, illustrées sur la photo ci-dessous.



Simulation de l'évolution du CO₂ injecté dans un aquifère salin sur 10000 ans. Répartition de celui-ci entre CO₂ supercritique non dissous dans la saumure de l'aquifère, CO₂ dissout dans celle-ci, et CO₂ minéralisé.

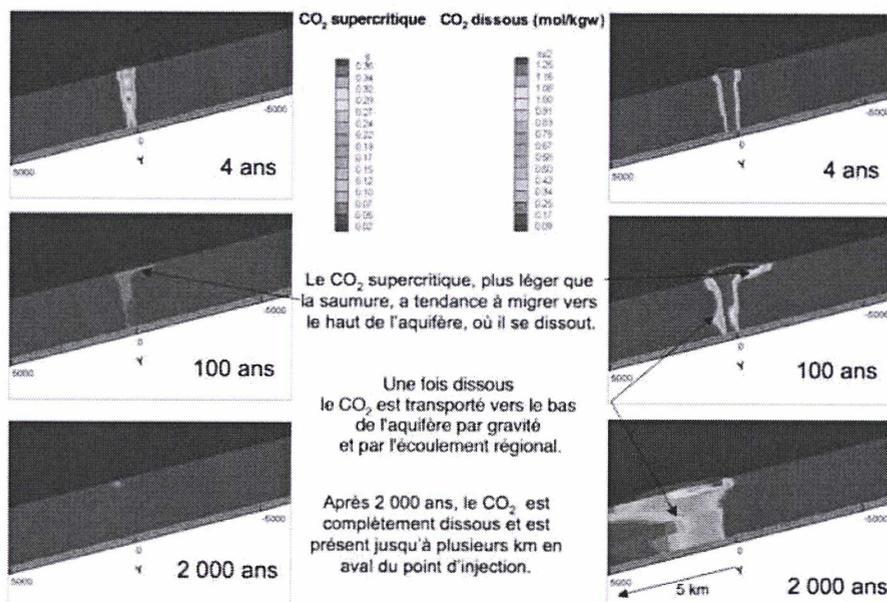
Source : [CO₂GEONET, 2008], [Audigane et al., 2007]

La première étape est celle de l'injection à proprement parler, répartie sur une durée de l'ordre de 30 ans. Au cours de cette période, le CO₂ injecté, reste encore en phase dense (c'est-à-dire qu'il n'est pas dissout dans l'aquifère). Aux profondeurs concernées, supérieures à 800 m, les conditions de température et de pression sont telles que le CO₂ est à l'état de fluide supercritique. Moins dense que l'eau, il aura alors tendance à remonter vers le haut de l'aquifère, s'accumulant au contact de la couche imperméable de couverture du réservoir. Il se formera alors une « bulle » de CO₂ supercritique, séparée de la phase aqueuse de l'aquifère.

Le CO₂ se dissoudra alors progressivement dans la saumure de l'aquifère sur une durée allant jusqu'à 10 000 ans. Audigane et al. (2007) ont alors calculé que dans le cas du pilote de Sleipner, le CO₂ stocké serait dissout à 33 % après 1 000 ans, et quasi-intégralement après 10 000 ans. Cette dissolution progressive est favorisée par la mise en place de mouvements convectifs au sein de l'aquifère. En effet la remontée du CO₂ supercritique, plus léger que l'eau, favorise le brassage du CO₂, donc les phénomènes de dissolution au contact des deux phases. Or la dissolution du CO₂ alourdit l'eau de l'aquifère, ce qui signifie que les

eaux chargées en CO₂ dissous ont, elles, tendance à descendre au fond de l'aquifère, contribuant encore à ce mouvement de brassage (voir simulations ci-dessous).

Les phénomènes de minéralisation du CO₂ ont lieu sur des échelles de temps plus longues, au-delà de 10 000 ans.



Simulation en 3D de la migration du CO₂ dans un aquifère, après injection de 150 000 tonnes en quatre ans dans l'aquifère du Dogger en France.

La concentration de CO₂ supercritique (à gauche) et de CO₂ dissous (à droite) sont représentées 4, 100 et 2 000 ans après le début de l'injection.

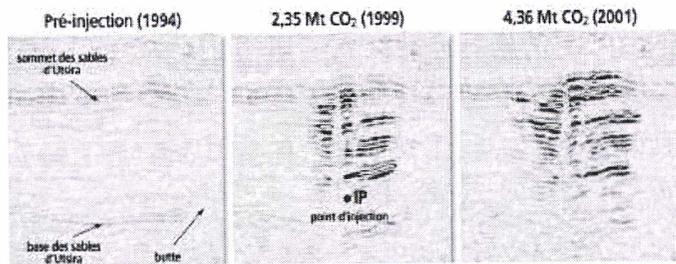
Source : [BRGM,2007], [CO₂GEONET, 2008].

La sécurité du stockage augmente ainsi au fur et à mesure de cette dissolution progressive. En effet, la dissolution fait diminuer la surpression dans le réservoir, ce qui diminue le risque de fracture de la roche de couverture. De plus, une fois dissous, le CO₂ a ainsi tendance à descendre vers le fond de l'aquifère.

La stabilité des stockages est ainsi prouvée sur le long terme, toutefois, ceci montre aussi que les risques de remontée de CO₂ sont en fait maximaux lorsque la proportion de CO₂ à l'état supercritique est maximale. C'est donc à la fin de la période d'injection que les risques sont maximaux. Les techniques de suivi du CO₂ au sein de l'aquifère, au premier rang desquelles l'imagerie sismique 4D, jouent ainsi un rôle crucial dans l'observation de la stabilité des stockages.

IV.2.2. L'expérience des pétroliers suffit-elle ?

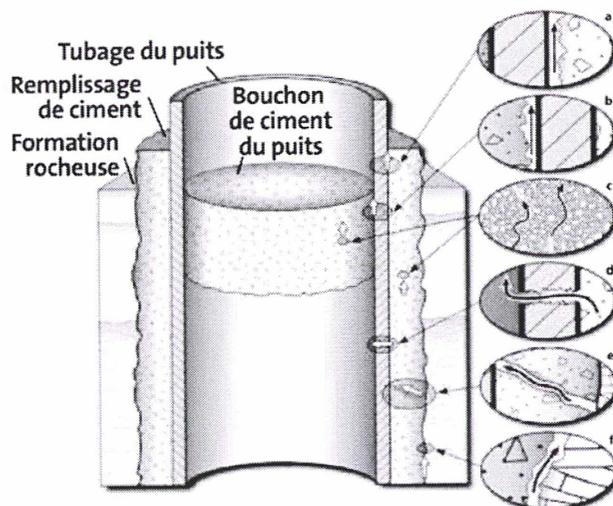
La sécurité des sites de stockages de CO₂ ne pourra être ainsi démontrée qu'en adoptant une approche de prévention des risques complète, qui associe à ces méthodes de suivi du panache de CO₂, d'autres méthodes plus classiques, déjà maîtrisées par l'industrie pétro-gazière, au premier rang desquelles la sismique 4D (cf. exemple ci-dessous). Ainsi, plusieurs puits d'observation devront être creusés, afin de mesurer la pression et les caractéristiques physico-chimiques du milieu (pH, composition chimique, teneur en CO₂...)



Mesures sismiques du panache de CO₂ dans le projet d'injection de Sleipner (Norvège). Seul un plan de surveillance continue des sites permettra de s'assurer de l'absence de fuites.

Source : Statoil, dans [CO₂GEONET, 2008]

Cependant, la prévention des risques de remontée de CO₂ doit surtout être abordée en termes de scénarios de risques, étudiés pour chaque projet de stockage. Le premier facteur de risque auquel on peut penser est par exemple la fuite au niveau du puits d'injection, ou d'un autre puits d'observation. Certains scénarios sont d'ailleurs tout à fait comparables aux scénarios de risques liés à une exploitation pétrolière ou gazière : qualité des cimentations de puits de forage, résistance à la pression et à la corrosion, remontée de CO₂ le long de l'enveloppe du puits de forage, ou même à travers le puits une fois l'injection terminée... L'illustration ci-après, tirée de Nordbotten et al., 2005, montre quelques scénarios de remontée possible liés au puits d'injection.

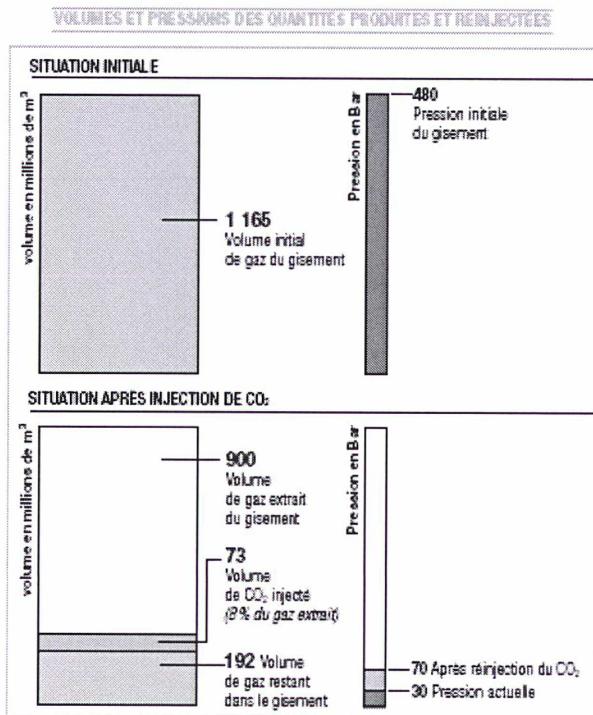


Voies potentielles de migration du CO₂ dans un puits, au travers de matériaux endommagés, ou le long d'interfaces entre matériaux.

Source : [CO₂GEONET, 2008] d'après [Nordbotten et al, 2005].

Si l'expérience des industriels pétro-gaziers dans l'exploitation de champs d'hydrocarbures ou de stockages saisonniers de gaz naturel est un socle de connaissances sur lequel s'appuyer dans la caractérisation des sites, cela ne doit pas dispenser de l'étude précise de ces scénarios et des plans de contre-mesures à mettre en œuvre. En effet, la situation d'un stockage de CO₂ est différente pour plusieurs raisons. Tout d'abord, le fluide CO₂ a des propriétés physico-chimiques qui lui sont propres, en particulier son pouvoir acidifiant lorsqu'il est dissous dans une solution aqueuse. La question de la résistance des cimentations des puits d'injection se pose ainsi à plus juste titre, car le CO₂ pourra amener le ciment à se dissoudre dans une saumure d'aquifère rendu plus acide. Ainsi, les spécifications des puits utilisés aujourd'hui dans l'industrie pétrolière et gazière devront être modifiées pour le stockage de CO₂. De plus, les plans de prévention des risques dans les stockages de CO₂ devront, à notre sens, contenir des actions de prévention et des contre-mesures spécifiques, face à des cas de corrosion d'un puits d'injection ou d'observation.

Deuxième différence notable avec les réservoirs d'hydrocarbures, la question de l'étanchéité du réservoir est une question nouvelle, qui se posera pour tout projet de stockage de CO₂ en aquifère profond. En effet, celle-ci ne se pose pas dans le cas d'un réservoir d'hydrocarbures, car la présence même de l'hydrocarbure suffit à caractériser l'étanchéité : si le réservoir n'était pas étanche, les phénomènes de formation du combustible fossile n'auraient pas eu lieu ! Le cas du pilote CSC de Total, à Lacq, est parlant à ce titre : un argument fortement avancé au cours de la procédure de concertation, était que le réservoir contenait initialement, avant son exploitation pétrolière, un mélange de méthane et de sulfure d'hydrogène à 480 bars. Le réservoir déplété était donc naturellement étanche, et l'injection de CO₂ allait y faire remonter la pression de 30 à 70 bars, ce qui ne pouvait qu'être bénéfique pour la stabilité du site. Cet argument ne saurait être utilisé dans le cas d'un stockage dans un aquifère profond, car l'étanchéité du site n'est pas réalisée a priori.



Situation du réservoir de Lacq en pression et volume avant son exploitation gazière et après injection de CO₂. La preuve de l'étanchéité du gisement est bien plus aisée dans les projets d'injection en réservoir d'hydrocarbures déplété.

Source : Dossier de concertation Total sur le projet de Lacq, page 39 [TOTAL, 2007]

Enfin, il faut bien avoir à l'esprit ce qui distingue les futurs stockages de CO₂ en aquifère profond et les sites de stockage saisonnier de gaz naturel. Même si les procédés techniques sont analogues, et que les structures géologiques sont identiques, il est une différence conceptuelle importante entre les procédés. Lorsque l'on cesse d'exploiter un stockage saisonnier de gaz naturel, le réservoir est vidé de l'ensemble de son gaz (mis à part le « coussin » non récupérable), et laissé à la nature à une pression peu différente de sa pression initiale, sans qu'il contienne de grandes quantités de gaz non dissous. C'est tout l'inverse pour un stockage de CO₂, conçu pour être laissé, après exploitation, rempli de CO₂ supercritique non encore dissous : comme expliqué plus haut, celui-ci aura en plus tendance à s'échapper, à cause d'une densité inférieure à celle de l'eau. Le réservoir de stockage de CO₂ sera laissé en surpression, et cette différence modifie toute la perception des scénarios de risques. Elle nous oblige à considérer les problèmes d'une manière différente, et plus

exigeante que par le passé, pour ce qui concernait d'autres usages du sous-sol comme l'exploration pétrolière, le stockage saisonnier de gaz, ou encore la géothermie.

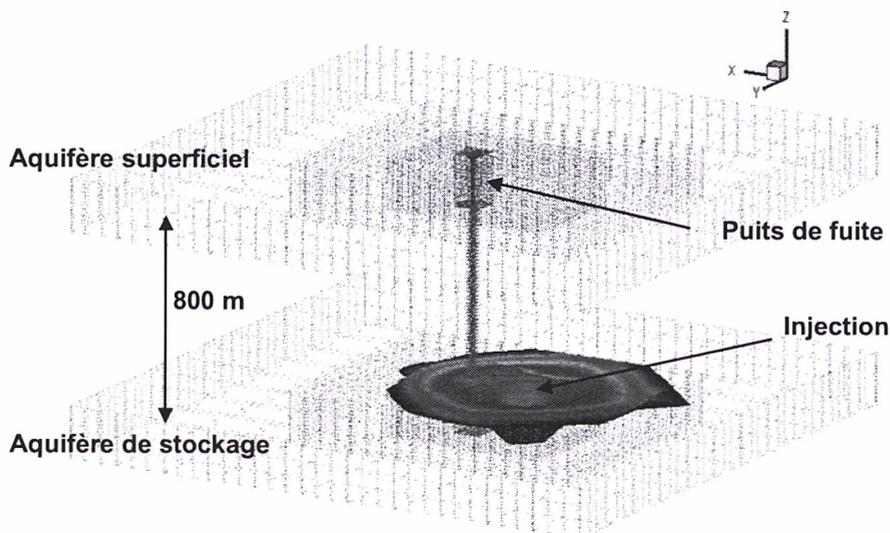
Des essais et caractérisations géologiques devront donc être effectués, pour chacun des projets de stockage de CO₂, en vue d'apporter une réponse satisfaisante au problème incontournable de l'étanchéité. Le site que l'on se propose d'exploiter pourra-t-il retenir le CO₂ sur les premiers millénaires, avec un taux de fuite suffisamment faible ? L'exploitant qui présente le dossier sera-t-il capable de surveiller son site sur la période nécessaire, y compris après arrêt des opérations d'injections ? Son plan de surveillance et de contre-mesures est-il satisfaisant ? C'est sur ces questions que nous tenterons d'apporter un éclairage, dans la partie suivante

IV.2.3. Certains points sont encore mal connus

La question de la remontée du CO₂ jusqu'à la surface est certes un scénario de risque à prendre en compte, toutefois le CO₂ injecté sera aussi un facteur de risque pour le sous-sol. En effet, sans remonter en surface, le CO₂ stocké peut aussi remonter jusque dans une couche supérieure du sous-sol, en particulier dans un aquifère d'eau potable, qui risquerait ainsi d'être pollué. Cette question est particulièrement sensible dans le cadre de projets on-shore, car les aquifères susceptibles d'abriter des sites de stockage sont placés au sein des grands bassins sédimentaires, qui sont souvent des zones densément peuplées !

Ce problème se pose en particulier dans le cas des projets de stockage de CO₂ dans les aquifères du bassin parisien. En effet, les aquifères profonds pressentis pour recevoir des sites de stockages sont le Dogger (1 800 m de profondeur au centre du bassin) et le Trias (2 500 m au centre du bassin). Ceux-ci sont en effet bien connus, et constitués de saumures impropres à la consommation, donc tout à fait envisageables au titre du stockage de CO₂. Cependant, le bassin parisien dispose d'une couche potable supérieure connue sous le nom d'Albien - Néocomien (jusqu'à 1 000 m de profondeur au centre du bassin). Ces réserves d'eau potable, aujourd'hui en exploitation contrôlée, sont considérées comme réserves d'eau stratégiques pour la région parisienne.

On comprend donc l'importance attachée à une compréhension, très fine, du comportement du CO₂ et des scénarios de fuite au sein de l'aquifère potable. Des modélisations ont été ainsi réalisées par le BRGM (Jacquemet et al., 2009), dans le cas d'un scénario de fuite simplifié entre le Dogger et l'Albien. Toutefois, ces points ne sont pas encore bien connus, et l'étude de tels risques devra être documentée pour chaque site de stockage, en considérant la structure réelle des couches (inclinaison, plis, failles...).



Modélisation simplifiée d'un scénario de remontée de CO₂ dans le bassin parisien, de l'aquifère du Dogger vers l'aquifère potable de l'Albien.
 Source : [Jacquemet, 2009], BRGM

Un autre point, aujourd'hui non tranché, est celui de la pureté du CO₂, ou pour être plus précis du mélange de gaz, qui sera injecté dans l'aquifère. En effet, les fumées industrielles contiennent bien d'autres composés que le CO₂, en particulier des oxydes de soufre, d'azote, du monoxyde de carbone... dont on devra déterminer le devenir quant à l'injection dans les aquifères. La connaissance du comportement de ces composés au sein des aquifères est essentiel, car ces composés vont aussi interagir avec le milieu de l'aquifère, influant ainsi sur les équilibres physico-chimiques du réservoir (porosité, solubilité du CO₂, pH...), et donc sur le comportement de celui-ci à long terme. La question des impuretés se pose aussi dans le cadre d'un scénario de fuite ! Dans le cas d'une remontée vers un aquifère d'eau potable, la remontée de SO_x et NO_x peut faire augmenter la concentration en composés soufrés et azotés, ce qui peut aussi compromettre la potabilité de la nappe.

La question de ces impuretés fait ainsi l'objet de recherches actuelles, qui devront permettre de connaître plus précisément leur impact sur le milieu, et les seuils de concentration à ne pas dépasser pour chaque espèce gazeuse. Cette question est d'une importance cruciale pour le développement de la filière CSC, car des exigences de pureté du CO₂ dépendra la complexité des installations de captage et de transport, et donc le coût total de l'investissement. Plus le degré de pureté du CO₂ sera élevé, plus l'installation de captage et de transport sera coûteuse, et donc moins la technologie se répandra, à niveau de prix du crédit carbone constant.

Il y a donc un réel enjeu réglementaire dans la définition des exigences de pureté : une définition légale des critères applicables permettra aux industriels d'effectuer leurs choix d'investissements dans un contexte moins risqué. Nous tenons de plus, à formuler ici quelques recommandations qui nous semblent importantes, vis-à-vis de ces critères. Premièrement, ceux-ci doivent être stratégiquement ajustés, afin de pouvoir assurer une prévention des risques correcte, tout en restant dans des montants d'investissement que les industriels et la puissance publique pourront supporter. On pourrait imaginer des critères de pureté qui évolueraient dans le temps, à l'instar des normes européennes d'émission pour l'industrie automobile, ce qui permettrait de sécuriser l'investissement dans un cadre réglementaire approprié, laissant aux acteurs le temps de faire progresser leur technologie.

Enfin, il nous a paru important que ces critères soient identiques au niveau européen, car c'est à l'échelle européenne que se développeront les réseaux de transport. Il est ainsi important que des critères de pureté dans les stockages et dans les pipelines différents entre pays ne constituent pas des barrières réglementaires.

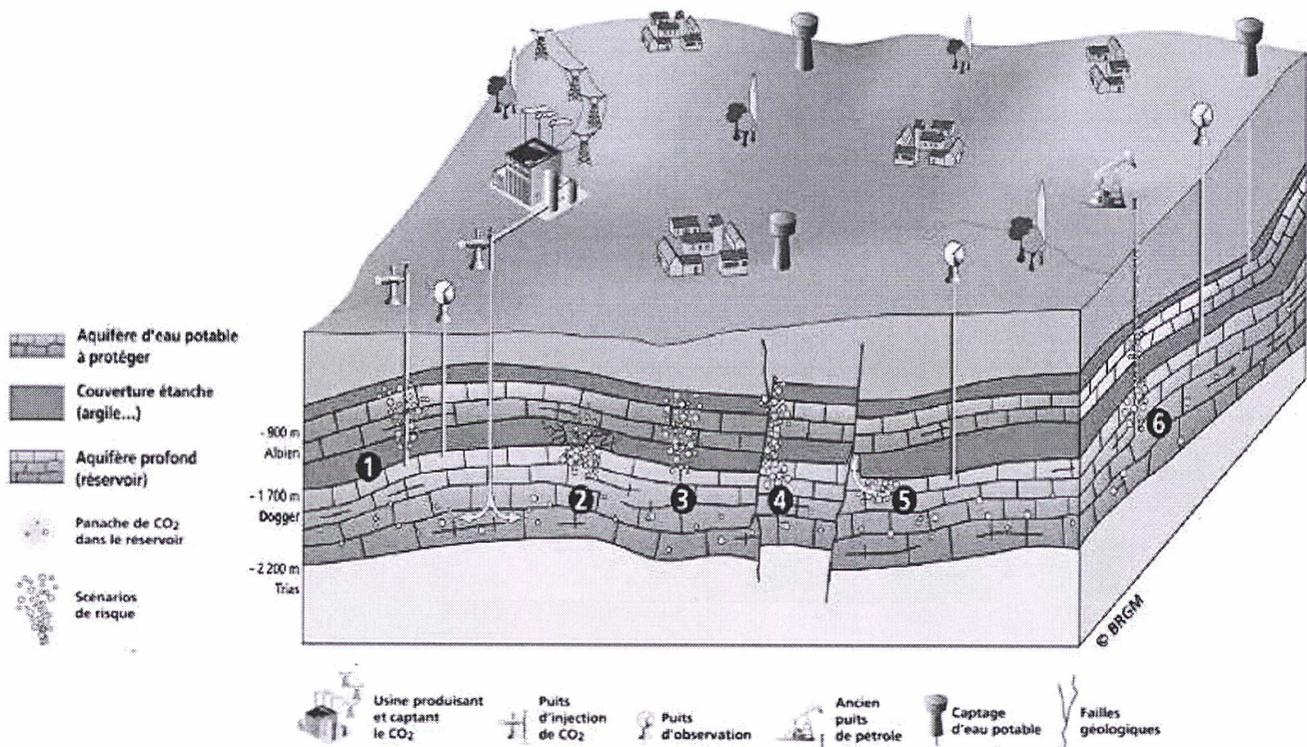
IV.3. Quelques pistes pour une prévention des risques structurée

IV.3.1. Une démarche de prévention à préciser

On l'a vu dans la partie précédente, les points d'incertitudes qui subsistent, quant au comportement du CO₂ et aux risques, sont encore nombreux. De plus, ils mettent toujours en jeu des équilibres entre normes de respect de l'environnement, et faisabilité économique. C'est pour cela que la puissance publique (en particulier à travers les organes qui effectueront le contrôle de ces installations), devra faire l'effort d'expliquer ou de préciser les exigences qui seront les siennes, lorsqu'elle délivrera des permis d'exploration ou d'exploitation pour des stockages de CO₂.

La directive européenne 2009/31/EC sur le CSC d'avril 2009 mentionne, dans ses annexes, les critères de caractérisation des sites de stockages, ainsi que les éléments à contrôler dans les plans de surveillance, sans toutefois introduire d'éléments quantitatifs sur ces aspects. Le travail mené en collaboration entre autorités de contrôle et exploitants dans chaque Etat européen, à l'occasion des projets démonstrateurs, sera ainsi très utile en termes de retour d'expérience. Cependant, il nous semble important qu'un travail de synthèse s'effectue au niveau européen, entre les acteurs des différents pays, afin que les retours d'expérience profitent à tous. La fin de la phase de démonstration des pilotes CSC pourrait ainsi faire l'objet de recommandations, quant à certains points des plans de surveillance, ou quant à l'utilisation d'outils qui auront été développés sur certains projets.

Le rôle des organismes de recherche publics ou universitaires est à ce titre très important, car ceux-ci permettront de constituer le socle de connaissance nécessaire à l'évaluation des plans de surveillance proposés par les futurs exploitants. Par exemple, le BRGM [Fabriol et Bouc, 2009] a ainsi défini onze types généraux de scénarios de fuite sur les stockages de CO₂ (voir encadré). De telles initiatives permettront de développer la précision des plans de surveillance, en créant de nouveaux outils. Ensuite, les caractérisations de sites et les plans de surveillance devront être confrontés, ce qui peut être fait en ayant recours à des tierces-expertises. Celles-ci pourront être faites par de tels organismes de recherche, sans que ceux-ci soient nécessairement du même pays que celui où le projet est réalisé ! Les réseaux internationaux de partage des connaissances jouent à ce titre un rôle très bénéfique : citons en particulier le réseau CO₂GeoNet, regroupant de nombreux acteurs européens de la recherche sur le CSC.



Les 11 scénarios de fuite du BRGM

Le BRGM a défini en 2009 onze types généraux de scénarios de fuite pour les stockages de CO₂ en aquifère, dont certains sont représentés dans l'illustration ci-dessus :

Fuite par un puits en exploitation (1), Sur-pressurisation locale (2), Sur-pressurisation régionale du réservoir, Dépassement de l'extension latérale prévue du panache de CO₂, Modification du champ de pression et des écoulements verticaux (drainance) (3), Défaut d'étanchéité de la couverture (5), Fuite par des failles existantes (4), Fuite par un puits abandonné (6), Formation d'un stockage secondaire suite à une migration verticale non attendue, Forage ultérieur, Séisme naturel.

Ces grands types de scénarios pourraient par exemple définir la structure des plans de surveillance, l'éventualité de chaque scénario étant étudiée au vu de la géologie et de modélisation dynamique 3D des réservoirs considérés. Pour chaque scénario, une évaluation du risque serait faite, et accompagnée d'un plan de surveillance et de réaction.

Source : [Fabriol et Bouc, 2009]

IV.3.2. La question de la responsabilité après arrêt des injections

Un point particulier des stockages de CO₂ en aquifère, qui a déjà été exposé dans les paragraphes précédents, est que le risque de remontée est le plus important à l'arrêt de l'injection, lorsque le réservoir contient la plus grosse quantité de CO₂ supercritique non dissous. La surveillance du site ne doit donc pas s'arrêter avec l'injection, mais continuer après celle-ci pendant une certaine durée. Seule une surveillance active, après arrêt de l'exploitation proprement dite, permettra de s'assurer de la mise en sécurité des sites. Et ce, quitte à appliquer des contre-mesures de type redirection du panache de CO₂, ou extraction locale d'une partie du CO₂ injecté.

A cet effet, la commission européenne a veillé, dans sa directive d'avril 2009 sur le CSC, à ce que la responsabilité des sites de stockage reste aux industriels qui les ont exploités, même après l'arrêt des opérations d'injection. Cette responsabilité a trait à la surveillance, à la

communication d'informations, à la mise en place d'actions de prévention et de réparation, mais aussi à la restitution des quotas en cas de fuite de CO₂.

La directive de 2009 sur le CSC prévoit en effet que la responsabilité des sites ne soit transférée à la puissance publique qu'à la condition que les éléments disponibles tendent à prouver que le CO₂ stocké restera confiné en permanence, et de toute façon après l'écoulement d'une période minimale (article 18). Si la directive fixe la durée de cette période minimale à 20 ans, elle laisse à l'autorité de contrôle nationale ou locale la liberté de fixer celle-ci. Elle donne aussi le droit à l'autorité locale d'y déroger, si celle-ci juge que l'ensemble des conditions de sûreté du site sont réunies.

Cette question de la durée minimale de surveillance après arrêt de l'injection se posera à nouveau, lors de la transcription de la directive en droit national. Il nous a semblé important qu'à l'occasion de cette transcription, le point de la durée y soit détaillé, jusque dans ses modalités de dérogations.

En effet, il est clair que la surveillance après arrêt de l'injection sera pour les industriels exploitants un coût financier à assumer, sans perspectives de gains en retour. Et en regard des milliers d'années sur lesquels a lieu la dissolution du CO₂, le choix d'une surveillance obligatoire pendant vingt, trente ou cinquante ans n'est pas lié à un critère scientifiquement pertinent. La durée au bout de laquelle on sera certain de la stabilité des sites n'est pas définissable a priori. Ainsi, la durée de vingt ans mentionnée dans la directive est plus liée aux cycles d'activité humains, et à la durée qu'il est possible d'imposer à une entreprise privée.

Si vingt ans peuvent paraître un bon compromis, ils doivent aussi être mis en regard des trente ans de surveillance actuellement imposés en France pour l'exploitation de stockages souterrains de déchets conventionnels. Dans une optique d'acceptabilité des sites de stockages par la société civile, il nous semble important que ce point soit éclairci et réaffirmé, ainsi que les modalités de dérogation. Il en va de la crédibilité des plans de contrôle et de surveillance, ainsi que de la crédibilité de l'Etat, en tant qu'autorité de contrôle.

IV.4. Réversibilité et mémoire des sites : des spécificités à prendre en compte

IV.4.1. La question de la réversibilité

Comme il a été exposé précédemment, un élément majeur de l'acceptabilité sociale des sites de stockages sera la prise en compte des risques au sein d'un plan de surveillance et de contre-mesures, adapté à la géologie et à la situation particulière de chaque site. Chaque événement possible sera détaillé, considéré au sein d'une matrice danger-exposition, et assorti de plans de prévention et de contre-mesures.

Toutefois, une autre question, peut être moins scientifiquement rationnelle, se posera à l'esprit des populations lors de l'ouverture des sites. C'est celle du risque maximal, et de sa prise en compte effective. Que peut-il arriver au pire ? Cet événement a-t-il été pris en compte, et sait-on ce que l'on fera dans ce cas là pour y remédier ? On pourrait par exemple penser à un séisme souterrain, qui aurait lieu dans 500 ans, alors que la majeure partie du CO₂ ne s'est pas encore dissoute. Ce séisme créerait une faille majeure dans le sous-sol, au sein d'un aquifère de stockage. Que pourra-t-on faire ? Pourra-t-on retirer tout le CO₂ injecté, afin de prévenir tout risque de remontée massive ? Peut-on extraire le CO₂ sans risques ? Et pour en faire quoi : le rejeter à l'atmosphère, l'amener dans un autre site de stockage ?

Ces préoccupations sont liées à une question, souvent résumée par le terme de « réversibilité ». Au niveau des acteurs français, c'est souvent un tabou, par suite de l'expérience des déchets radioactifs, où cette question a été centrale. Car il est vrai que l'on ne pourra jamais retirer l'ensemble du CO₂ qui a été injecté. Premièrement, au moment de l'injection, une partie du CO₂ est directement adsorbée par les pores de la roche réservoir. Ce phénomène est bien connu des stockeurs saisonniers de gaz naturel : c'est le « gaz coussin », expression utilisée pour désigner la partie du gaz naturel non récupérable. Enfin, si l'on pense à la dissolution progressive du CO₂ sur le long terme, il est clair que le CO₂ dissous n'est pas plus récupérable, sauf à pomper l'ensemble de la saumure de l'aquifère.

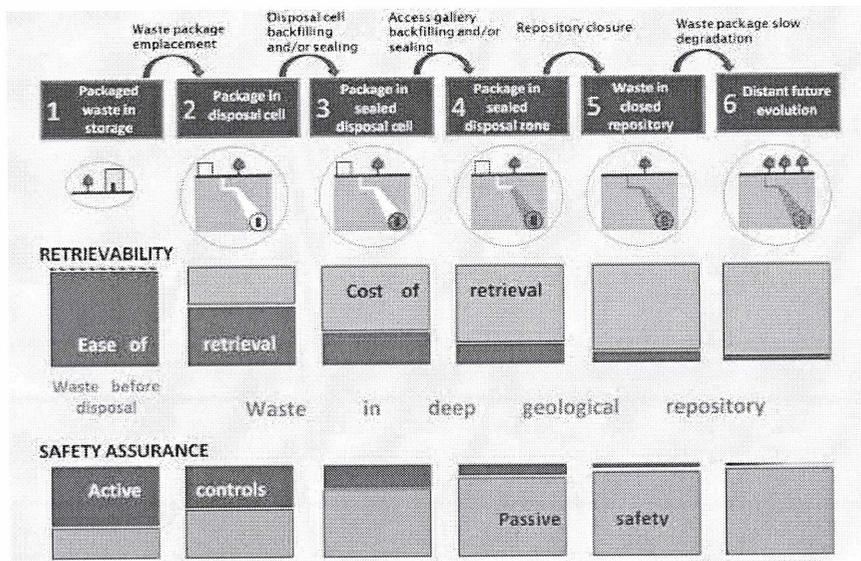
Mais pour autant, le CO₂ piégé définitivement au sein de la roche pose-t-il problème ? Non, au sens où justement, il ne représente pas de risque de remontée. En revanche, le CO₂ supercritique non dissous, celui qui génère le risque de remontée, est plus facile à extraire de la couche d'injection, à condition que l'on ait défini ce que l'on en fera une fois récupéré. Obligation de le réinjecter dans un autre site de stockage, émission progressive dans l'atmosphère selon des critères de sécurité préétablis... Plusieurs options sont possibles, pour peu qu'elles satisfassent des conditions de sécurité acceptables.

En ce qui concerne la réémission du CO₂ dans l'atmosphère, le GIEC, dans son rapport spécial de 2005 sur le CSC, a estimé que les conséquences des réémissions suites à des fuites des stockages de CO₂ seraient tolérables, *en ce qui concerne la seule question du réchauffement climatique*, « si la proportion de CO₂ retenue était de 90% à 99% sur 100 ans ou de 60% à 95% sur 500 ans » [GIEC, CSC, 2005]. La réémission est donc envisageable, si tant est qu'elle soit correctement encadrée et contrôlée, ce que le GIEC appelle de ses vœux dans son rapport.

Quant à la question de la réversibilité, notre perception est la suivante : ce point sera abordé par la société civile, qui exigera une réponse à l'une de ses préoccupations majeures. La question ne pourra pas être contournée, et bien au contraire, il faut s'y préparer, en s'efforçant de donner aux attentes de la société civile une réponse solide.

Si l'on cherche à s'inspirer de ce qui a pu être fait dans d'autres secteurs, on peut se pencher sur le cas des déchets radioactifs, qui continue à susciter des oppositions fortes depuis des dizaines d'années. Au sens de la réversibilité, le projet de stockage souterrain sur le site du laboratoire de Bure doit être étudié, car c'est l'exemple de l'incorporation du concept de réversibilité au sein d'un projet de stockage, à la suite d'une démarche de concertation avec la société civile.

L'Andra (Agence nationale des déchets radioactifs) a ainsi développé une échelle de réversibilité pour les stockages souterrains de déchets nucléaires. Celle-ci distingue plusieurs niveaux de scellement des sites, qui sont présentés comme des étapes successives, chacune représentant un équilibre entre coût de récupération des colis, et mise en sécurité passive du site.



Projet d'échelle de réversibilité pour les stockages de déchets radioactifs. illustration des niveaux de récupérabilité, en termes de position et d'état des colis de déchets, de facilité, de coût de retrait, et de mise en place des composants de sûreté passive.

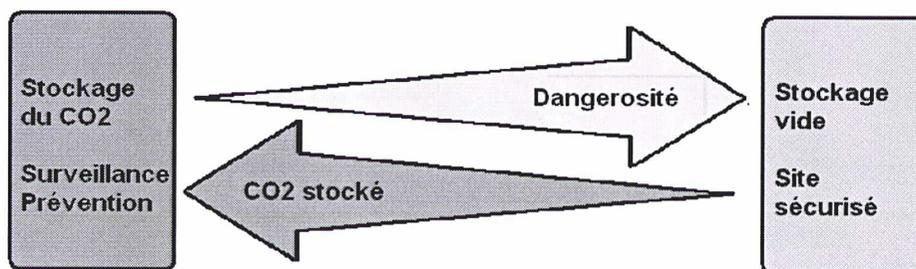
Source : ANDRA

Une telle démarche d'explication rationnelle et de mise en œuvre de la réversibilité nous semble extrêmement positive en termes d'acceptabilité sociale, car elle représente un effort des acteurs industriels et étatiques à se projeter dans des problématiques de très long terme : plusieurs milliers d'années, pour ce qui concernera les stockages de CO₂.

Nous avons cherché à nous demander si une telle présentation rationnelle de la réversibilité pouvait s'appliquer aux stockages de CO₂, et il nous est apparu que celle-ci était non seulement possible, mais aussi souhaitable. En effet, la réversibilité pour les stockages de CO₂ est surtout vue en termes de réponse à un possible évènement de risque. Elle doit donc être vue comme une réponse proportionnée et graduelle à l'avènement d'un danger. Par exemple, le pompage local de CO₂ à un endroit de la nappe pourrait être une réponse à la détection d'une surpression locale. Il s'agirait là d'une mise en pratique ponctuelle de la réversibilité. Une mise en œuvre de plus grande échelle serait par exemple la mise en place d'un pompage permanent dans un point de fuite détecté, dans le cas où des contre-mesures de colmatage ou de détournement du panache de CO₂ seraient impossibles. Enfin, un cas de réversibilité totale serait la découverte d'une fuite majeure ou la survenance d'un évènement qui compromettrait la sécurité d'un site dans son ensemble, comme le cas du séisme évoqué plus tôt, par exemple. Un tel évènement nécessiterait le retrait de l'ensemble du CO₂ non encore dissous. L'exploitation du site serait alors complètement arrêtée, et celui-ci serait mis en sécurité par le retrait de l'ensemble du CO₂ susceptible de remonter.

Nous avons tenté de résumer notre vision de la réversibilité appliquée aux stockages de CO₂ dans le schéma ci-après. La double flèche a pour but de représenter cette vision d'une réversibilité partie intégrante du plan de prévention des risques, en tant que contre-mesure graduée à un évènement de risque. La réversibilité s'échelonne ainsi entre les mesures de retrait ponctuelles liées à la prévention des risques dans un site en opération, au retrait total du CO₂ non dissous avec arrêt de l'exploitation, laissant le site géologique sécurisé face à tout risque de remontée.

Bien sur, le schéma présenté est naïf, et sa mise en forme n'a rien de professionnelle... il doit être pris comme une simple ébauche, censée représenter l'idée qui nous a semblé importante. Car dans la mesure où l'on envisage la réversibilité comme faisant partie d'un plan de prévention, les stockages de CO₂ en aquifère salins sont réversibles !



Proposition d'échelle de réversibilité pour les stockages de CO₂.

La réversibilité est envisagée comme une contre-mesure proportionnée à la dangerosité d'un évènement au sein d'un stockage. La situation de gauche est celle d'un stockage en exploitation, contenant du CO₂, celle de droite, correspond à un stockage vidé du CO₂ non dissous, laissé dans des conditions de sécurité satisfaisantes après un évènement majeur.

IV.4.2. Echelles de temps, mémoires des sites : un sujet radioactif ?

Si les techniques utilisées dans le stockage de CO₂ en aquifère sont pour la plupart connues, et partiellement utilisées par l'industrie pétro-gazière, nous avons tenté de mettre en lumière, dans cette partie, certains aspects du problème qui modifient les exigences en termes de prévention des risques.

Le premier point est l'échelle de temps du système considéré. Celle-ci est de quelques milliers à quelques dizaines de milliers d'années, du fait des problématiques liées aux risques de remontée et du temps de dissolution du CO₂ dans la saumure de l'aquifère de stockage. Cette durée est bien au-delà de la durée d'activité d'une entreprise privée humaine, c'est pourquoi l'Etat jouera un rôle important dans la prévention des risques, sa gestion et son contrôle. Mais aussi, ceci soulève le problème de la mémoire des sites de stockage. Car l'un des risques principaux, d'ici quelques centaines d'années, est celui d'un forage ultérieur, qui endommagerait la couche de couverture d'un stockage oublié, déclenchant une remontée substantielle de CO₂. Comment maintenir la connaissance de la localisation des anciens puits d'injection et de l'extension des aquifères dans lesquels du CO₂ a été stocké ?

Un deuxième point déjà évoqué est celui du devenir des impuretés au sein du flux de CO₂ capté. En effet, les mélanges de gaz aujourd'hui injectés sont riches en CO₂, pour environ 85 %. Si l'on imagine que les injections futures seront d'une teneur en CO₂ équivalente, il faut aussi savoir que la composition exacte du mélange, donc des impuretés, dépendra du type d'émission industrielle. Les fumées émises par une centrale de production d'électricité à charbon sont différentes de celles émises par une raffinerie, ou par une cimenterie ! En plus du CO₂, chacune de ces espèces aura une action physico-chimique différente sur le milieu de l'aquifère, ce qui pourra avoir des conséquences à court comme à long terme sur la sécurité des sites concernés.

Le troisième aspect important du problème est une conséquence des incertitudes liées aux deux points précédents. C'est la question de la réversibilité, qui a été détaillée dans les paragraphes précédents.

Ces trois dimensions modifient, dans son essence, la perception et les exigences que devront avoir la société civile et l'Etat, face aux plans de prévention et de surveillance, qui seront présentés par les industriels prétendant à l'exploitation de stockages de CO₂. Or, ces questions sont très analogues à celles que la société s'est posées vis-à-vis de la filière nucléaire, et du devenir des déchets radioactifs, tout au long des vingt dernières années.

L'Andra a en ce sens accumulé beaucoup d'expertise et de savoir-faire sur des sujets connexes, depuis la « loi Bataille » du 30 décembre 1991 sur les déchets radioactifs, et au fur et à mesure de la concertation qui mena à la création du laboratoire de Bure en 2000.

La première expertise est celle liée à la caractérisation du sous-sol qui a dû être effectuée dans le cadre de la création du laboratoire souterrain. De manière analogue, l'Andra a dû apporter à la société la preuve de l'étanchéité de la couche d'argile du Callovo-Oxfordien, dans laquelle elle prétend stocker des déchets haute activité et à vie longue. Bien sûr, le projet est techniquement différent d'un stockage de CO₂, ne serait-ce parce que les déchets radioactifs, solides vitrifiés et compactés dans des colis en béton, seront stockés dans des cavités creusées dans une couche imperméable, et non dans un aquifère comme dans le cas des stockages de CO₂. Il n'en reste pas moins que le problème de la démonstration de l'étanchéité d'une couche argileuse de couverture est analogue ! Non seulement par les outils d'analyse (modélisation géophysique et mesures sismiques 3D), mais aussi par les attentes de la société. En effet, les temps d'évolution des stockages de déchets radioactifs sont encore plus longs, ils peuvent atteindre le million d'années. Se posent donc aussi des questions de plan de surveillance et de contre-mesures, ainsi que de réversibilité... d'autant plus qu'il s'agit là de substances bien plus dangereuses et toxiques ! Il pourrait ainsi être intéressant de profiter des installations du laboratoire de Bure pour effectuer des études de diffusion de CO₂ au sein de couches argileuses. Certains points de prévention des risques pourraient aussi inspirer la réglementation sur le CSC, par exemple quant au relevé de l'état initial de l'environnement avant le projet, ou à la quantification des remontées au sein du sous-sol.

Deuxième point, l'Andra, mais aussi l'état, ont au cours des vingt dernières années, accumulé beaucoup d'expérience quant aux démarches de concertation et de débat public qui ont pu mener aux choix de sites. Ce point sera développé plus amplement dans les parties suivantes, mais dans une optique d'acceptabilité sociale, la crédibilité et la confiance que la société civile accordera à un plan de prévention des risques ne dépendent pas que de l'objectivité scientifique du dossier présenté. En effet, une grande attention devra être portée aux intérêts des acteurs en présence. Il est d'ailleurs intéressant de remarquer que les aspects collégiaux, de revue par les pairs, sont souvent source de confiance sur ces sujets. La pratique de la tierce-expertise est à ce titre très intéressante, et on pourrait très bien imaginer que l'Andra, seule ou en appui d'autres établissements publics tels le BRGM ou l'IFP, réalise une tierce-expertise d'une demande de permis de stockage de CO₂ dans un aquifère. Une telle initiative bénéficierait à chacun d'acteurs, favorisant le partage d'expérience, d'outils et de méthodes développées face à des problèmes connexes. Dans une optique de développement d'une filière française du CSC, l'expérience française de la gestion des déchets radioactifs pourrait ainsi être un atout de taille, si l'on considère que certains projets CSC européens ont déjà été arrêtés, pour des questions d'acceptabilité sociale.

Alors, faut-il rapprocher les acteurs du CSC avec ceux de la filière des déchets radioactifs ? Il faut tout d'abord garder à l'esprit qu'il s'agit de substances différentes, et que la dangerosité des déchets radioactifs est bien plus importante que celle du CO₂. Ceci amène

de nombreux acteurs de la filière CSC à estimer dangereux pour la filière CSC, d'associer dans celle-ci des acteurs du nucléaire. On peut se demander pour quelles raisons.

Une première réponse serait que le CSC est une technologie énergétique, au sens où elle vise la production d'électricité dans des centrales thermiques à charbon. Si un acteur de la filière nucléaire était associé au CSC, certains pensent que les contestataires du nucléaire s'empareraient du sujet, le diabolisant auprès de l'opinion publique.

Une deuxième piste qui expliquerait cette aversion est que, dans « déchet nucléaire », il y a... déchet ! Et cette appellation « déchet » est lourde de conséquences, puisqu'elle implique un passage de la substance concernée sous les fourches caudines de la réglementation nationale et européenne sur les déchets. Ceci implique une fiscalité spéciale, qui effraie l'ensemble des acteurs industriels de la filière CSC, dont la pérennité économique n'est pas encore claire. C'est pourquoi ceux-ci veillent fortement à ce que le CO₂, gaz communément présent dans l'atmosphère, ne soit pas considéré demain, dans l'imaginaire collectif, à un déchet dû à l'activité humaine.

Face à ces contradictions, nous souhaitons insister ici sur l'importance de valoriser tous les savoir-faire disponibles sur notre territoire, dans le but de voir une filière française se développer sur le CSC. Les aspects particuliers à la filière CSC évoqués plus haut – échelles de temps, risques, surveillance, responsabilité – sont tels qu'il est impossible que de telles questions ne soient pas émises au sein de la société civile, lorsque les premiers projets CSC industriels seront implantés. Il ne sert donc à rien d'éviter les sujets qui fâchent, et c'est en particulier ce que les acteurs de la filière des déchets nucléaires ont appris au cours des vingt dernières années.

Il nous semble qu'une meilleure coordination entre les établissements publics de recherche présents aujourd'hui sur le CSC (BRGM, INERIS, IFP entre autres) et ceux du nucléaire (on peut penser à l'Andra et au CEA), ne serait pas forcément mal perçue par l'opinion publique, car de telles actions de recherche ont lieu bien en amont des projets industriels. Enfin, elle permettrait sûrement d'aider à des démarches de concertations plus valorisantes pour chacune des parties prenantes aux projets de stockages de CO₂, en évitant de réapprendre à partir de rien ce que les acteurs du nucléaire ont mis vingt ans à apprendre.

Chapitre V

Stratégies d'acteurs : une influence sur l'acceptabilité sociale

Dans cette partie, nous nous intéressons aux divers intérêts portés par les acteurs impliqués dans le développement du CSC. A vrai dire, nous nous focalisons surtout sur la technique du stockage géologique du CO₂. En effet, la partie du captage relève d'une problématique essentiellement industrielle. Le processus se déroule à l'abri des murs de l'usine ; la société n'est pas directement concernée. La dynamique des acteurs dans le captage et les enjeux de leurs interactions sont relativement balisés par des thématiques standards, comme l'externalisation, l'acquisition des compétences, l'asymétrie d'information. Au contraire, les jeux d'acteurs autour du stockage géologique du CO₂ sont beaucoup plus compliqués, car la plupart des acteurs sociaux y sont impliqués à des degrés divers : industriels, émanations de la puissance publique, représentants de la société civile. Les caractéristiques de la technique – en particulier le réseau de transport qui nous projette hors de l'usine et l'utilisation du sous-sol, un bien collectif – forcent un grand nombre d'acteurs sociaux à se positionner par rapport à elle. La dynamique du sujet est beaucoup plus riche de controverses sociotechniques que dans la seule partie du captage. Une fois de plus, notre thème apparaît comme un modèle réduit des enjeux soulevés par la politique climatique, et plus généralement de toute politique socio-industrielle. Nous sommes au point de rencontre de la société, de l'économie et de l'Etat.

Nous essayons ici de présenter les acteurs avec leurs stratégies, en montrant les tensions et les rapprochements entre les positions ; nous présentons aussi des acteurs qui sont aujourd'hui un peu en retrait, mais qui pourraient jouer un plus grand rôle à l'avenir, comme les collectivités publiques. S'il est impossible de prévoir quelle configuration surgira du champ social à mesure de la multiplication des démonstrateurs et des sites de stockage, notre étude permet malgré tout de cerner quelques grandes lignes potentielles de fracture tout comme des convergences latentes. Cette cartographie des positions en présence, établie suite aux nombreux entretiens que nous avons effectués, nous servira pour élaborer des scénarios de développement et adapter le cadre institutionnel à ces scénarios. Nous analyserons trois catégories d'acteurs issus de l'activité économique, de la puissance publique et de la société civile.

V.1 Des acteurs du monde économique intéressés

Nous séparons les industriels en deux grands ensembles : les développeurs (V.1.1, V.1.2 et V.1.3), intéressés par la technique pour la vendre à d'autres et les émetteurs (V.1.3 et V.1.4), intéressés pour l'appliquer dans leurs propres installations industriels. A l'intersection des deux ensembles se trouve l'acteur-clef, par lequel nous commencerons : le groupe des pétroliers-gaziers.

V.1.1 Les pétroliers-gaziers

Les pétroliers-gaziers (Total, GDF Suez) possèdent des compétences géologiques en termes de connaissance et de pratique. Ces compétences sont aujourd'hui utilisées pour l'exploration, la prospection et l'extraction des combustibles fossiles. Comme le stockage géologique du CO₂ demande des compétences similaires, les pétroliers-gaziers sont l'opérateur naturel des sites de stockage. Le stockage du CO₂ est un moyen pour les pétroliers d'étendre le champ d'application de leur savoir-faire géologique. Il représente un relais de croissance potentiel pour un secteur très concurrentiel, dans lequel les compagnies nationales se renforcent et évincent les compagnies internationales. Conçu aujourd'hui comme une future activité secondaire, le stockage du CO₂ joue aussi comme une assurance contre la sortie du monde du pétrole (programmée pour des raisons de lutte contre les émissions de GES ou subie pour des raisons d'épuisement des ressources) ; pour les pétroliers qui maîtriseront le stockage du CO₂, il sera possible de se recentrer si besoin sur cette activité secondaire. Mais il y a un deuxième effet : la maîtrise puis l'adoption du CSC pérennise aussi l'activité principale des pétroliers, en réduisant l'aléa d'un abandon volontaire du pétrole pour cause de lutte contre le changement climatique, puisque le CSC casse le lien entre combustion de ressources fossiles et émission de gaz à effet de serre. On retrouve ici l'idée que le CSC appartient à un monde où l'énergie fossile reste bon marché et disponible (cf. III.3). Energies fossiles et stockage de CO₂, aux deux bouts de la chaîne, sont solidaires.

Dans les pays à forte conscience environnementale, le CSC pourrait s'intégrer dans le renforcement des réglementations sur la sécurité et l'environnement. Par exemple, pour l'exploitation des schistes bitumeux, pétrole non conventionnel qui demande beaucoup d'énergie pour l'extraction et le traitement, des pays comme le Canada pourraient exiger des compagnies qu'elles installent le CSC sur leurs sites d'exploitation avant de leur délivrer les concessions. Montrer la maîtrise de la technique est donc un signal envoyé sur la capacité à satisfaire à des réglementations environnementales exigeantes. Pour Total, le site pilote de Lacq constitue ainsi autant une carte de visite environnementale qu'une vitrine du savoir-faire technologique de la compagnie.

Le CSC est donc pour les pétroliers-gaziers une carte maîtresse à jouer dans la lutte contre les GES ; il empêche l'obsolescence des compétences géologiques en leur donnant de nouveaux débouchés et il pérennise l'activité principale d'extraction des combustibles fossiles. Enfin, pour ces industriels mal aimés du grand public à cause des nombreuses catastrophes dont ils sont à l'origine, le CSC serait une occasion de se donner une image « verte » en mettant en avant leur contribution à la lutte contre les GES. Pour ces trois raisons, les pétroliers jouent un rôle moteur dans le développement du CSC.

Le rôle de développeur est renforcé par les incitations qu'ont les pétroliers, en tant qu'émetteurs de GES. Nous avons vu en III.1.2 que, parmi les grands émetteurs du territoire français, les raffineries pourraient avec raison être équipées d'un système de CSC. Les pétroliers peuvent donc sur leurs propres sites mettre en place un système de captage et de stockage. Il n'y a pas de problème de partage de compétences, d'externalités ou d'asymétrie, puisque les pétroliers maîtrisent l'ensemble de la chaîne et qu'ils appliquent le processus à leurs propres usines. Equiper les raffineries du CSC est un moyen de réduire leurs émissions de CO₂ et d'anticiper les restrictions réglementaires. Une fois de plus, les pétroliers pourraient être tentés de s'en servir pour promouvoir leur communication environnementale, par exemple sous la forme de la vente d'un pétrole « zéro carbone », issu des raffineries munies du CSC.

V.1.2 Les organismes de recherche

Les intérêts des organismes de recherche comme l'IFP et le BRGM, qui sont très impliqués dans les techniques pétrolières et, en ce qui concerne le BRGM, dans la connaissance du sous-sol, sont les mêmes que ceux des pétroliers en termes de maintien des savoirs. Ces organismes expriment aussi l'orientation donnée par l'Etat (voir V.2.1) sur le sujet. Les forces des deux groupes se conjuguent pour développer le CSC. Il en résulte une communication parfois floue et un jeu de poker menteur, notamment sur les capacités de stockage, (cf. III.2). Les deux groupes ont un large intérêt à annoncer des capacités de stockage suffisantes au niveau mondial, pour que la technique soit crédible. Toutefois, quand on passe à des estimations localisées, les intérêts divergent. Le BRGM est ainsi très confiant sur les capacités de stockage sur le territoire métropolitain, tandis que Storengy, filiale de stockage de gaz de GDF Suez, est beaucoup plus circonspecte. A l'évidence, Storengy pousse plus à l'utilisation des gisements déplétés de la mer du Nord, où il possède déjà des concessions, qui pourraient ainsi lui procurer des revenus complémentaires en louant les capacités de stockage de CO₂.

V.1.3 Les grands émetteurs

Le deuxième grand ensemble est celui des émetteurs. L'enjeu pour tous est de réduire à moindre coût les émissions de CO₂, suivant la pression réglementaire (normes) ou économique (mécanisme des quotas de CO₂) imposée par les politiques publiques ; l'intérêt du CSC est de pouvoir continuer leur activité sous un régime de quotas d'émissions alloués en petite quantité. Au niveau du processus industriel, le captage concerne le plus directement les industriels émetteurs de CO₂. Notons cependant que le CSC n'est qu'une des techniques permettant de répondre à ces obligations, et les positions de tous les émetteurs ne sont pas identiques au regard de cette technique. Nous avons déjà parlé des pétroliers avec les raffineries, nous parlerons dans la suite des autres émetteurs en distinguant les électriciens.

Pour les industries dont les activités ne sont pas délocalisables, les incitations à maîtriser cette technique sont fortes, à concurrence des autres solutions qui peuvent exister. Pour les industriels qui seraient tentés de délocaliser leurs activités à cause de la pression des réglementations environnementales, le CSC pourrait présenter quand même un enjeu, car deux raisons tempèrent l'intérêt de la délocalisation. En effet, il n'est pas exclu que l'ensemble des pays du monde adopte progressivement des contraintes de plus en plus fortes sur les émissions de CO₂ au fur et à mesure de la mise en place du cadre international de la politique climatique. Si cela n'était pas le cas, les pays engagés dans la lutte contre l'effet de serre pourraient mettre en place des mécanismes d'ajustement aux frontières pour égaliser les conditions de concurrence au regard des politiques climatiques, tels que la taxe carbone aux frontières défendue par les autorités françaises et de nombreux économistes⁹. Ces mesures sont d'ailleurs acceptées, moyennant certaines conditions, par l'Organisation mondiale du commerce¹⁰.

Dans cette perspective, la maîtrise des émissions de CO₂ grâce à une technique de captage intégrée au processus industriel pourrait se révéler déterminante dans la compétition

⁹ Olivier Godard, « Politique climatique européenne et ajustement aux frontières » *Responsabilité et Environnement- une série des Annales des Mines*, N° 50, avril 2008, pp. 47-52 ; Paul Krugman, *Building a green economy*, The New York Times, 5 avril 2010 ; Joseph Stiglitz, *Un autre monde. Contre le fanatisme du marché*, Fayard, 2006, p.246-248.

¹⁰ *Commerce et changement climatique*, rapport OMC et PNUE, 2009.

mondiale ou dans l'accès au marché intérieur européen. Les industriels ont ainsi intérêt à conserver des usines en Europe, qui fournissent la demande intérieure mais qui seraient aussi le laboratoire de nouvelles techniques de pointe. La course à l'innovation qui caractérise l'industrie moderne et le souci de rester à la frontière technologique justifient ainsi la poursuite d'activités qui pourraient être réalisées de manière plus compétitive ailleurs. A court terme, il y a une pression à la délocalisation, mais elle est contrebalancée à long terme par l'incertitude de l'engagement des politiques climatiques. Il nous semble donc que ces industriels adopteraient un comportement suiveur mais attentif au développement du CSC. Les industriels les plus solides, qui auront les moyens d'investir de forts montants, seront intéressés par la possession d'une technique de pointe : on s'attend à la réalisation d'un certain nombre de pilotes (avant tout de captage), portés par les leaders des secteurs concernés.

C'est par exemple le cas d'ArcelorMittal qui se lance avec le projet Ulcos dans la mise au point d'un pilote de CSC sur le site de Florange. ArcelorMittal est intéressé par la technique de pointe que représente le CSC. Cette technique apparaît de toute façon incontournable pour réduire les émissions du secteur de l'acier, très fortement émetteur en raison de l'énergie demandée et du processus de production¹¹. ArcelorMittal est prêt à investir pour acquérir la maîtrise des techniques de captage, qui touchent de près à son processus industriel, mais aussi de stockage, plus éloigné de son champ de compétences. En effet, un problème crucial, que l'on retrouvera avec les électriciens, est la peur d'être dépendant des pétroliers. ArcelorMittal cherche donc d'autres partenaires industriels intéressés par le stockage du CO₂ pour monter son propre site de stockage ; il veut éviter d'acheter aux pétroliers une solution clef en main, dont il ne maîtriserait ni le devenir, ni les coûts. Les risques sont importants de voir différents projets échouer à cause de cette tension.

Cette différence de point de vue transparait aussi dans l'attitude face à la réglementation européenne. Alors que les exploitants de réseaux gaziers trouvent les contraintes de libre accessibilité à un réseau de transport de CO₂ dignes d'une mission de service public dont ils ne voient pas la pertinence, les industriels émetteurs estiment cette clause indispensable pour le déploiement du CSC, car elle leur offre un contrepoids juridique dans une relation asymétrique en faveur des exploitants des sites de stockage. La grande crainte de chacun est d'être captif, sans moyen de défense. Nous voyons que les intérêts, s'ils ne sont pas divergents, sont malgré tout à front renversé ; il y a ici un tiraillement qui pourrait fragiliser le développement de la filière s'il venait à s'exacerber.

V.1.4 Les électriciens

Le CSC représente une des techniques majeures dans la lutte contre le changement climatique en raison de la production électrique, qui est majoritairement d'origine thermique et qui le sera toujours pour une bonne part à l'avenir en raison de l'utilisation du charbon (cf. III.1.1). Les électriciens sont donc particulièrement intéressés par le CSC, en particulier en Allemagne ou en Pologne où les centrales à charbon sont nombreuses. En France, l'électricité est produite en base, de manière prépondérante, par les centrales nucléaires. En semi-base ou en pointe, des centrales à charbon ou des turbines à gaz sont utilisées.

Pour EDF, il est crucial de garder les compétences à la fois dans le gaz et dans le charbon, pour ne pas dépendre d'une seule filière d'approvisionnement énergétique et pour

¹¹ Le CO₂ rejeté par le processus de production serait nul si l'acier venait entièrement d'acier recyclé. Aujourd'hui, nous sommes encore dans une phase d'augmentation de la quantité d'acier utilisée au niveau mondial. Le moment où les quantités recyclées rejoindront la demande est prévu vers 2050.

pouvoir arbitrer entre les différents moyens de production en fonction de leur rentabilité économique. De plus, les moyens thermiques à flamme seront toujours nécessaires, en particulier pour les appels de pointe, mais aussi pour l'équilibrage du réseau qui sera rendu plus difficile par les énergies renouvelables intermittentes. Il n'est donc pas question pour EDF d'abandonner le charbon, au contraire, le maintien des compétences « charbon » est une question cruciale pour l'électricien. Etant donné le contexte des politiques environnementales, EDF estime judicieux de se doter de centrales à charbon équipées de CSC, car le CSC pourrait devenir à terme le complément obligatoire des centrales.

Le principal problème des électriciens est de ne pas tomber dans les mains des stockeurs, en particulier des pétroliers-gaziers. Il est pour eux crucial de ne pas se trouver pieds et poings liés en dépendant des pétroliers en aval de leur production, avec la gestion du CO₂ issu du processus de combustion. C'est pourquoi EDF souhaite investir autant que Total dans le CSC, et à défaut de maîtriser complètement la technique, d'en garder au moins la maîtrise d'œuvre, y compris sur le stockage. Dans le projet France Nord, EDF veille à mettre le même montant que Total pour dialoguer sur un pied d'égalité.

V.1.5 Les équipementiers

Le groupe des équipementiers (comme Alstom), ainsi que les prestataires de services parapétroliers (comme Schlumberger) ont des intérêts directs à voir aboutir le CSC, qui représente un fort marché potentiel. Leur but est de pouvoir trouver des débouchés pour des produits technologiques, à haute valeur ajoutée. Le CSC demande des matériaux spéciaux, capables de résister à des fortes pressions et à de fortes acidités, de l'ingénierie spécialisée que ces compagnies sont à même de fournir. Pour Alstom, la capture du CO₂ est un élément crucial des futures centrales à charbon : la compagnie développe ce processus et l'intègre à la conception des centrales. Le CSC est pour eux une opportunité de développement.

Prestataires de services ou fournisseurs d'équipements, ce secteur industriel n'est pas en première ligne des conflits d'intérêts liés au CSC, car aucune entreprise n'a a priori vocation à exploiter des installations de CSC. Leur rôle est donc au premier abord un rôle d'appui et de suiveurs, poussant au développement de la technique, mais en retrait en ce qui concerne les questions d'acceptabilité sociale. Cependant, leur rôle pourrait se renforcer en raison des tensions relevées, entre industriels et pétro-gaziers. Des compagnies de services parapétroliers pourraient être incitées à devenir elles-mêmes opératrices des sites de stockage par des acteurs réticents à laisser ce rôle aux pétroliers : elles pourraient donc essayer de jouer leur propre carte et devenir exploitant ou sous-traitant de sites de stockage. Des compagnies d'autres secteurs, comme celui du traitement des déchets ou de la gestion de l'eau, pourraient également être intéressées et troubler le pas de deux entre industriels et pétroliers.

Les acteurs du monde économique sont ainsi majoritairement intéressés par le développement du CSC. Ils se sont regroupés au sein de groupes de réflexion comme le club CO₂. Au niveau du stockage, le groupe moteur est celui des pétroliers-gaziers qui maîtrisent la technique et peuvent l'appliquer dans leurs propres installations. On retiendra surtout l'antagonisme latent entre les pétroliers, destinés à être les exploitants des sites de stockage et les autres industriels émetteurs, ainsi que le jeu trouble autour des capacités de stockage, pour amener les investissements sur le terrain que l'acteur contrôle.



Les acteurs regroupés au sein du club CO₂

V.2 Une position ambivalente de la puissance publique

La deuxième catégorie d'acteurs regroupe ceux de la puissance publique. Le CSC joue à plusieurs niveaux d'organisation, dans les relations de l'Etat avec les industriels développeurs et émetteurs, et avec les populations.

Au niveau européen, la directive de référence sur le CSC a été votée dans le cadre du paquet énergie-climat¹². Cette directive donne un cadre réglementaire qui était demandé par tous les acteurs pour la poursuite sans insécurité juridique du développement de la filière. L'Union européenne envisage aussi de subventionner des démonstrateurs de CSC à l'échelle pré-industrielle ; un appel d'offres européen devrait avoir lieu en 2012, pour une enveloppe globale de plus d'un milliard d'euros.

Pour les acteurs nationaux, nous distinguerons l'Etat et les collectivités locales.

V.2.1. L'Etat

Au niveau international, l'Etat français est intéressé par cette technique à un double titre, économique et diplomatique.

Sur le plan économique, le CSC est un moyen de capitaliser sur le savoir-faire présent en France, parmi les ingénieurs du secteur pétrolier et les chercheurs d'instituts de recherche, tels l'IFP et le BRGM. L'Etat souhaiterait profiter du vivier de compétences des entreprises pour que la France soit parmi les premiers pays à développer cette technique ; idéalement, les

¹² Approuvé par les chefs d'Etats le 12 décembre 2008, il a été officiellement adopté le 23 avril 2009. Il comporte la directive 2009/29/EC révisant le système d'échange de quotas, la décision 406/2009/EC qui répartit l'effort de réduction, la directive 2009/28/EC fixant des objectifs d'énergies renouvelables, la directive 2009/31/EC sur le captage et stockage géologique du carbone, le règlement 443/2009 sur les émissions de CO₂ des voitures, la révision 2009/30/EC de la directive sur la qualité des carburants.

entreprises françaises deviendraient les leaders mondiaux du secteur. Une réussite de la technologie française sur le CSC apporterait des revenus d'exportation et des emplois, redonnerait du lustre à un tissu industriel en décrépitude. Outre que cette vision relève peut-être d'un patriotisme économique un peu naïf à l'heure de l'économie mondiale, certains de nos interlocuteurs estiment que la France ne se donne absolument pas les moyens de son ambition dans ce domaine et qu'en conséquence les entreprises françaises sont déjà distancées.

Sur le plan diplomatique, cette technique pourrait jouer un rôle d'ouverture dans les négociations internationales sur la lutte contre les émissions de GES. Elle permettrait peut-être de débloquer un certain nombre de verrous, car la disponibilité technique du CSC rendrait un accord ambitieux sur la lutte contre le réchauffement climatique beaucoup plus acceptable pour certains pays réticents. Pour les pays producteurs de pétrole et de charbon (pays du Golfe, Australie, Chine), l'existence de cette technique serait le gage que la lutte contre l'effet de serre ne se fera pas au dépend de leurs exportations de ressources fossiles. Pour les pays avec des champs pétrolifères déplétés, on peut y envisager un stockage du CO₂, qui leur procurerait une rente alternative à la rente pétrolière. Pour les pays émergents (Inde ou Chine) ou dépendants beaucoup des énergies fossiles, le CSC leur garantirait la poursuite de leur développement sur les bases actuelles.

Comme la Chine accuse déjà l'Europe de pousser les négociations climatiques dans le but d'obliger les pays émergents à se fournir en services « écologiques » auprès de l'industrie européenne, cette utilisation diplomatique du CSC ne manquerait pas d'entrer en conflit avec les ambitions économiques car elle s'accompagnerait vraisemblablement de transfert de technologie.

Au niveau national, l'intérêt de l'Etat en tant que promoteur de la technologie et du savoir-faire français converge avec celui des développeurs ; il converge aussi avec celui des émetteurs car l'Etat veut préserver une base industrielle à l'économie française et garantir l'existence d'emplois dans des régions déjà fragiles. Le CSC permet de retenir sur le territoire national des industries émettrices qui sinon auraient été délocalisées. Enfin, cette technique est une des conditions du respect par la France de ses obligations européennes (paquet énergie-climat qui traduit dans le droit européen la stratégie des 20-20-20), ainsi que de l'objectif « facteur 4 » inscrit dans la loi¹³ ; elle donne de la souplesse aux politiques climatiques en facilitant l'atteinte des objectifs de réduction¹⁴.

C'est pourquoi l'Etat soutient le développement du CSC par le biais des organismes de recherche comme l'IFP ou le BRGM, mais aussi avec le fonds démonstrateur de l'ADEME. Le fonds, doté de 400 millions d'euros sur quatre ans, assure le relais entre la phase de recherche et la phase d'industrialisation. Les domaines concernés sont le transport (véhicule électrique, véhicule hybride), l'énergie (biocarburant, renouvelables) et l'habitat (isolation). Les projets-pilotes concernant le CSC ont été évoqués en II.2.3.

Toutefois, dans le champ du CSC, l'Etat n'a pas qu'un rôle de promoteur. En tant que garant de la protection de l'environnement et des populations, l'Etat doit assurer, par le biais de l'Administration, une bonne surveillance des sites. Au niveau local, ces missions appartiennent à la DREAL qui doit instruire le projet d'installation de site de stockage et vérifier que les mesures de sécurité sont bien définies, adaptées aux risques et appliquées. Les services de la DREAL profiteront sans doute des expériences sur la maîtrise des risques conduites par le BRGM ou l'INERIS (cf. IV.2).

¹³ Loi de Programme fixant les orientations de la politique énergétique du 13 juillet 2005, notamment l'article 2.

¹⁴ *La division par 4 des émissions de dioxyde de carbone en France d'ici 2050*, Pierre Radanne, rapport Mies 2004

En raison de ses multiples missions, l'Etat peut paraître sacrifier ses obligations morales de protection de l'environnement et des populations en faveur du développement de la filière ; l'accusation est récurrente chez les associations écologistes, pour lesquelles l'Etat n'est pas neutre dans le traitement des projets. Cette contradiction n'est pas ressentie par les agents de l'Administration. L'Etat, organisme protéiforme, est de toute façon habitué à mener de front plusieurs missions, sans que le potentiel conflit d'intérêts se traduise par l'arbitrage de l'une au profit de l'autre. Malgré tout, la population est souvent méfiante à l'égard d'un Etat qui paraît aux mains des industriels. Il faut donc veiller à ce que les instances de contrôle et de surveillance soient crédibles et légitimes. La sécurité doit être une condition préalable à l'installation.

V.2.2 Les collectivités locales

Le deuxième ensemble relevant de la puissance publique est constitué des collectivités locales (conseil régional, conseil général, ou commune).

Pour les collectivités locales, l'intérêt d'un site de stockage de CO₂ est avant tout financier si une redevance est reversée du fait de l'installation. Cette redevance paraît la contrepartie normale de l'utilisation du sous-sol, comparable aux redevances versées par les installations nucléaires de base. Si la collectivité ne reçoit aucune contrepartie, on voit mal quel intérêt elle aurait à soutenir un tel projet, qui ne lui apporterait que des désagréments. L' élu local reste soumis à la pression électorale de sa population, et celle-ci a de grandes chances d'être totalement opposée au projet si elle n'en retire aucun avantage. L' élu n'aura un rôle actif que si le projet reçoit un minimum d'acquiescement de la part de la population et ne compromet pas sa réélection. Cela suppose un partage des gains liés au stockage de CO₂ dans le sous-sol de la collectivité, que cela soit au moyen d'une redevance ou d'une politique d'aménagement du territoire.

Nous pouvons prendre pour exemple l'installation de Lacq. La commune de Jurançon, sur le territoire de laquelle est installé le site de stockage du pilote de Lacq, bénéficie ainsi d'une convention de mécénat signée avec Total, dotée d'une enveloppe globale de 1,5 M€. Cette somme sera affectée sur plusieurs années à des opérations de développement durable, de protection de l'environnement et de maîtrise énergétique (renouvellement des installations de chauffage des locaux communaux, isolation thermique...). A cette convention de mécénat au niveau communal s'ajoute une convention de revitalisation du bassin de Lacq pour aider à la création d'entreprises locales, avec un fonds de 5 M€. La convention assurera des prêts aux entreprises ainsi que des actions pour favoriser la promotion du site et l'installation d'entreprises nouvelles intéressées par le tissu économique présent à Lacq.

L'intérêt peut être aussi économique si le stockage permet de créer des emplois directement par la construction de l'installation et indirectement par le maintien des industries composant le tissu industriel régional. Comme la construction d'un site de stockage est assez brève et l'enfouissement comme la surveillance demande peu de personnel, la deuxième option est la plus réaliste. Par exemple la communauté de communes du Havre cherche à monter un projet de captage dans un premier temps, dans l'appel d'offre du fonds démonstrateur d'ADEME, puis un projet complet de CSC dans le cadre de l'appel d'offres européen de la plateforme ZEP à venir fin 2012. Ses motivations visent explicitement au maintien de l'activité industrielle dans la zone portuaire du Havre. Elle souhaite favoriser l'échange d'informations et la coordination entre les industriels pour qu'ils anticipent les évolutions réglementaires à venir. La communauté du Havre aimerait voir se développer un système mutualisé de traitement du CO₂ (éventuellement captage et stockage) pour les 11

sites soumis à quotas ; ce système commun serait probablement moins coûteux qu'une série de petites installations. La mise en place de ce type d'infrastructures ne peut guère être poussée que par les collectivités locales, elle oblige à une réflexion à long terme sur la structure du territoire. Pour être réussie, elle doit être accompagnée d'institutions académiques, chargées de développer les savoir-faire et d'assurer la formation des compétences. Pour la communauté de communes, l'avantage retiré est une attractivité accrue du territoire, qui offrirait des facilités de traitement du CO₂ ; cet élément de compétitivité pour les industries émettrices de GES pourrait éviter la délocalisation d'une partie du processus industriel, comme la production de clinker pour les cimenteries. Elle espère donc sécuriser les industries existantes de la zone portuaire, et en particulier les raffineries et les centrales thermiques, voire en attirer de nouvelles avec ces conditions avantageuses. Cela viabilise à long terme une partie des emplois de la région.

Un problème latent est la non-coïncidence entre les zones de captage, déterminées par le tissu industriel actuel, et les zones de stockage, déterminées par des conditions géologiques. En conséquence, les collectivités qui bénéficient du maintien de l'activité industrielle ne sont pas forcément les mêmes que celles qui supportent le site de stockage. La mise en relation de deux territoires, celui du captage et celui du stockage, par le biais du système de transport de CO₂, crée des tensions qui peuvent dégénérer en antagonismes si les deux territoires ne se sentent pas solidaires *ab initio*. Il faut bien faire comprendre les dépendances réciproques à l'œuvre entre les collectivités sous peine de l'échec du projet. Cela peut être particulièrement difficile, si les bénéficiaires sont trop localisés sur la zone de captage, et si la zone de stockage ne perçoit pas que son destin est lié à celui de la zone de captage, indépendamment des relations générées par le CSC.

A notre avis, le problème soulevé ici constitue la faiblesse du projet du Havre. Les possibilités de stockage sont encore floues : le projet considère soit un stockage à terre, dans le bassin parisien, soit en mer du Nord. La communauté de communes du Havre ne semble pas trop concernée par l'accompagnement du projet de stockage, mais donne l'impression de se réserver le choix entre ces deux solutions, en fonction des circonstances, des coûts... Le site d'accueil apparaît ainsi comme une variable d'ajustement d'un projet d'investissement industriel, cela est très dommageable pour la construction nécessairement commune entre zone de captage et site de stockage d'un projet de CSC. Le risque est grand de voir le projet rejeté au niveau de la zone de stockage, car il apparaîtra comme tombé du ciel, sans lien avec la dynamique du territoire. Peut-être est-ce au fond le but inconscient de la communauté de communes du Havre. Celle-ci serait sans doute satisfaite de voir le CO₂ partir en bateau de son port vers les plateformes de la mer du Nord et d'éviter une procédure longue et incertaine pour la création d'un centre de stockage à terre. Elle pourrait même avoir l'ambition d'être un grand centre d'acheminement du CO₂ en recueillant les émissions du bassin parisien. Cette solution pourrait être soutenue par les pétroliers présents en mer du Nord et par les Norvégiens qui veulent se positionner comme stockeur du CO₂ européen. Elle aurait l'avantage pour les industriels de ne pas se confronter directement à l'acceptation des populations ; elle aurait l'inconvénient de retirer de l'espace public cette technique nouvelle et donc d'escamoter un débat sur son bien-fondé et son devenir social. Que cette solution soit parfois privilégiée exprime la réticence des scientifiques et des ingénieurs à transformer leurs dispositifs techniques en objets sociotechniques.

V.3 La société civile face à ses interrogations

Il est toujours difficile d'anticiper ce que sera l'opinion dominante dans l'espace public face à l'arrivée d'une nouvelle technologie. Les signaux l'exprimant sont actuellement très faibles car le CSC est une technique en cours de développement qui n'est pas encore complètement sur la place publique. Il est toutefois possible de mettre au jour un certain nombre de passages obligés de la réflexion publique sur le CSC. Ce paragraphe a pour but de préciser les nœuds du discours social sur le CSC, les points à partir desquels se cristallisera, selon nous, l'opinion publique. Nous avons inclus des considérations sur les associations de défense de l'environnement et sur la façon dont celles-ci peuvent relayer ou construire les perceptions de la population. Dans le cas des associations locales, elles sont souvent l'expression de groupes sociaux qui se constituent au cours du déroulement du projet ; elles sont la traduction des changements induits par l'arrivée du projet dans le champ social¹⁵. Les associations de défense de l'environnement au niveau national sont plus structurées, plus permanentes et ont déjà exprimé une position sur le sujet que nous présentons.

V.3.1 La population

Nous présentons les rares faits concrets disponibles avant d'envisager les points qui pourraient bloquer la technologie et sur lesquels il faudra donc être vigilant. Un projet de recherche entier a été consacré à ce thème avec pour résultat une publication.

Le public manque d'informations pour apprécier les avantages et les risques de cette technique. Une enquête d'opinion¹⁶ sur le CSC montre que 30 % des sondés disent avoir entendu parler du CSC, mais seulement 6 % savent expliquer précisément de quoi il s'agit. Après une présentation de la technique, 60 % se disent favorables. Avec présentation des risques, 10 % se disent que les risques peuvent être maîtrisés, 60 % que les risques sont inquiétants et nécessitent des recherches approfondies, 20 % qu'il faut abandonner la technique. Sur l'intérêt de cette technique, pour 20 % des interrogés, elle permettra de continuer à utiliser le pétrole avant la découverte d'une énergie propre, pour 60 % il s'agit d'une excuse pour ne pas modifier les modes de production de l'énergie. A l'issue du questionnaire, 40 % se disent favorables, 40 % défavorables. Seuls 5 % des français pensent que le CSC est une des trois techniques prioritaires pour lutter contre l'effet de serre, ce qui la place en huitième position, derrière les énergies renouvelables, l'efficacité énergétique et l'énergie nucléaire.

Les résultats de ce sondage sont pour le moins mitigés. Pour l'instant, l'opinion montre une circonspection et une prudence exemplaire. Pas de rejet massif ni d'enthousiasme débordant. Une étude¹⁷ de la littérature existante sur la perception du CSC met en relief quelques points permettant d'affiner notre compréhension. L'intérêt du CSC n'est compris que si celui-ci est replacé dans le contexte général de la lutte contre les GES, comme nous l'avons fait nous-mêmes dans ce mémoire. L'utilisation du CSC pour la récupération assistée de pétrole provoque des inquiétudes et entraîne de la confusion sur le rôle de cette technologie. Les études ne permettent pas de conclure si l'apport d'informations accroît ou diminue l'acceptation de la technique. De manière générale, les risques ne sont pas perçus comme inacceptables, mais peu sont prêts à les accepter près de chez soi. Un point, important

¹⁵ Sur ce thème, lire *Agir dans un monde incertain. Essai sur la démocratie technique*, M. Callon, P. Lascoumes, Y. Barthe, Seuil, Paris, 2001.

¹⁶ Etude TNS-Sofres – CIREN, publiée en juin 2007, réalisée les 11-12 avril pour le compte de l'ADEME/ANR

¹⁷ *Synthèse de littérature sur l'acceptabilité sociale du captage et stockage du CO₂*, A. Campos, M. Ha-Duong, M. Merad, octobre 2007.

pour l'avenir de la filière, ressort sur la confiance des populations : la confiance accordée dépend de la perception des compétences et des intentions, surtout dans le secteur industriel. Comme le développement de la filière repose principalement sur les pétroliers-gaziers, dont les intentions sont loin d'être philanthropiques, leur mauvaise image dans l'opinion pourrait grever la confiance dans le CSC.

Lors de l'installation d'un site de stockage de CO₂, les riverains concernés pourraient soulever des objections d'ordre sanitaire ou économique.

Ils s'interrogeront sur des remontées éventuelles dangereuses du CO₂, éventuellement par analogie (trompeuse) avec la catastrophe du lac Nyos (cf. IV.1.2). Le risque de fuite et donc de remontée même faible à la surface doit être surveillé avec une grande précision au niveau de l'installation pour rassurer les populations sur ce point. La surveillance et la sécurité se doivent d'être irréprochables et les procédures transparentes. Un site de stockage ne sera acceptable que s'il fait la démonstration de son innocuité pour les populations, c'est une condition sine qua non. C'est la raison pour laquelle nous avons insisté à de nombreuses reprises sur la gestion de la sécurité, la prévention des risques et la prévision des contre-mesures (cf. IV.3). Les riverains demanderont aussi des précisions sur les risques de pollution du sous-sol. Compte tenu de la dimension patrimoniale symbolique du sous-sol, il ne faudra pas que le CSC paraisse empêcher des usages socialement plus valorisés du sous-sol, comme le pompage d'eau potable ou même la récupération d'énergie géothermique. Le devenir des impuretés et des sels minéraux en cas de remontée partielle doit être précisé pour satisfaire à ces exigences. S'il ne semble pas insurmontable de montrer la sécurité du site géologique, il faudra beaucoup d'écoute, d'attention et d'acceptation par les industriels des demandes d'étude et de protection des populations, sous peine de les brusquer et de rendre le projet définitivement inacceptable.

Les objections d'ordre économiques sont plus difficiles à appréhender sereinement car il y a une part de subjectivité liée aux perceptions réciproques des changements anticipés. Ainsi, un argument régulièrement avancé lors de la concertation sur des grands projets est la perte d'attractivité du territoire à cause du projet, et donc la baisse subséquente de la valeur du foncier. On ne peut apporter à ce phénomène de réponse adéquate, car il suffit que les gens pensent que le territoire est moins attractif pour qu'il le devienne effectivement. On a là un exemple d'anticipations autoréalisatrices fréquentes en économie. Un autre argument est celui de l'impact négatif sur les activités économiques d'une image régionale dégradée à cause de la présence d'un site de stockage. Les produits régionaux seraient ainsi estampillés « produit près du site de stockage » dans l'imaginaire des consommateurs ; il en résulterait des ventes plus difficiles et une baisse des revenus, surtout agricoles. Lors de la recherche d'un site de stockage pour les déchets nucléaires, les viticulteurs de l'Hérault s'étaient inquiétés de la mauvaise publicité pour leurs vins que serait l'existence d'un stockage souterrain de déchets nucléaires. Ce genre de propos a refait surface dans le projet de Lacq, parmi les vignerons de Jurançon. Pour que l'image de leur vin ne soit pas ternie par le CSC, on ne parle d'ailleurs pas du puits d'injection de Jurançon, du nom de la commune et de son appellation viticole, mais du puits de Rousse, du nom du lieu-dit où il se trouve.

La stratégie la plus pertinente pour éviter la déprise du territoire est sans doute, comme nous le suggérons plus haut, d'insérer le site de stockage dans une vision à long terme de l'aménagement et du développement du territoire, à même de contrebalancer la mise en place d'une spirale de perceptions négatives. Le projet serait valorisant s'il participe d'une véritable stratégie locale industrielle. Le plus grand écueil pour l'instauration de cette dynamique est, comme déjà mentionné, un trop grand éloignement entre zones de stockage et zones de captage. Un chantage à l'emploi dans les industries émettrices d'une région ne

saurait rendre acceptable un site de stockage dans une autre région. Il faut que l'ensemble des installations soit perçu dans sa globalité, pour éviter les oppositions entre territoires. Cela est d'autant plus important que le CO₂ a un statut symbolique de déchet. Or, il n'est pas bien vu de traiter ses déchets ailleurs que chez soi. Ceci est donc préférable si le territoire autour du site de stockage perçoit le CO₂ enfoui comme étant, d'une manière ou d'une autre, le sien. Dans le cas contraire, on risque de créer une opposition factice entre zone industrielle (de captage) et zone agricole (de stockage), comme le traitement des eaux usées fait parfois surgir des oppositions entre ville et campagne.

V.3.2 Les associations locales

Les associations locales sont bien souvent des caisses de résonance d'enjeux locaux. Avec l'arrivée d'un grand projet comme celui du CSC, des relations se nouent, des points de vue sont partagés, des individus se découvrent un univers commun et finalement, des groupes sociaux nouveaux se constituent, qui n'ont pas au départ d'existence propre en dehors du grand projet. Un grand projet fait émerger des acteurs nouveaux, dont les associations locales sont l'incarnation.

Leur nature même, générée par le projet, fait que certaines de ces associations peuvent paraître non constructives. N'ayant pas à leur agenda d'autres objets que le projet en question, elles peuvent s'enfermer dans une posture de refus, du type « Pas de ça chez moi », ou, selon l'acronyme anglophone consacré, NIMBY (Not in my backyard). Les associations locales ne sont pas seules responsables de cet état de fait, la faiblesse de la culture du dialogue social en France fait que les objections sont rarement écoutées par les porteurs de projet¹⁸. Pour entrer dans une phase de négociations, puis de constructions de compromis, il faut que le rapport de force entre les deux parties ne soit pas trop déséquilibré. Or certaines associations ne négocient pas sans certains compromis substantiels, tandis que certains aménageurs ne sont prêts à accorder que des mesures symboliques. La présence de l'Etat près du promoteur du projet accroît ce sentiment d'impuissance et enferme l'association dans le refus. Lorsque tout paraît joué d'avance, l'association ne veut pas participer à un débat qui n'est pour elle qu'une mascarade ; sentant tous les acteurs ligués contre elle, elle n'a plus d'autre choix que le recours direct à l'opinion publique, y compris par l'action violente. L'association peut aussi élargir progressivement son objet, dans ce cas elle sera moins réticente à la négociation sur un projet précis, car une négociation défavorable apparaîtra éventuellement comme une bataille perdue dans une guerre plus longue.

Les associations reprendront les thèmes évoqués plus haut : risques sanitaires et écologiques, risques économiques. Ces thèmes auront d'autant plus de résonance que le stockage du CO₂ se prête particulièrement à une exploitation d'un vaste registre symbolique. Le CO₂ est un déchet, le déchet évoque l'excrétion, la déjection, ce qui renvoie à la fécalité. Le stockage conjugue ce thème à celui de l'enfouissement, de la dissimulation, associé au registre du sous-sol, terrain méconnu, générateur de riches évocations (les entrailles de la Terre, les Enfers antiques). Même si les conditions techniques sont largement différentes de la gestion des déchets nucléaires, on retrouve le même cocktail de représentations qui peut se révéler explosif s'il est trop manipulé (cf. chapitre IV).

Outre cet imaginaire symbolique toujours présent dans la conscience sociale, quoique rarement exprimé, le point faible sur lequel taperont les associations refusant le projet sera

¹⁸ Voir par exemple J. de Montgolfier, J.-M. Natali, *Le Patrimoine du futur*, Economica, 1987 pour des exemples de gestion de projet avec des impacts environnementaux et de conflits d'acteur.

sans doute le sacrifice apparent du territoire qui bénéficiera à d'autres. Nous avons déjà discuté de ce point crucial dans le paragraphe consacré aux collectivités territoriales, mais insistons encore : le territoire d'accueil du site de stockage doit trouver des compensations pour l'utilisation du sous-sol, mais cette utilisation doit aussi être perçue comme légitime. Cela pourrait s'avérer plus délicat que dans le cas des déchets nucléaires, car ceux-ci sont dus à un choix politique national (le plan Messmer en 1974), exécuté par une entreprise publique (EDF), avec des avantages perçus par tous (une électricité disponible et bon marché). Rien de tel pour le CSC, où les acteurs présents sont surtout privés. Cette situation pourrait donc créer des conflits entre les bénéficiaires de cette technique et ceux qui en supportent les inconvénients.

Elle pourrait aussi se retourner contre la politique climatique de l'Etat. Les associations locales pourraient ainsi faire valoir que leur territoire est pollué par le CO₂ stocké à cause d'une politique nationale de lutte contre une pollution mondiale. Les habitants de ces territoires pourraient se sentir sacrifiés, avec une perception de leur territoire comme poubelle du CO₂. Si cette tension entre pollution locale (CO₂ dans le sol) et pollution mondiale (CO₂ dans l'air) s'exprime, alors elle pourrait s'alimenter d'une remise en cause du réchauffement climatique et donc de l'opportunité de mener une politique de lutte contre les émissions de GES, position défendue par quelques trublions médiatiques. De manière plus raisonnable, ce sont les modalités de la politique contre les émissions de GES qui se verraient contestées. La situation est similaire avec les déboires de la politique de développement de l'éolien.

L'exemple du site pilote de Lacq peut illustrer notre propos. Le contexte est favorable, avec une exploitation de gisements de gaz poursuivie par Total (et son ancêtre la Société nationale des pétroles d'Aquitaine) depuis les années 50. La population est bien sûr marquée par les activités extractrices, qui fournissent un grand nombre d'emplois dans la région. L'expérience du stockage s'enracine donc dans un véritable terreau local. Au niveau de la sécurité, le site retenu à Rousse présente de très bonnes garanties puisqu'il ne s'agit pas d'un aquifère profond mais d'un ancien gisement avec un seul puits de forage. Si le pilote n'a pas soulevé d'objections dans les environs de Lacq où se situe l'usine de captage, il n'en a pas été de même à une trentaine de kilomètres de là au niveau du puits d'injection du CO₂. Deux associations locales se sont créées pour s'insurger contre l'expérience de stockage. Les arguments principalement évoqués ont porté sur les risques sanitaires et les pertes économiques. Cependant, dans les propos des uns et des autres, on perçoit aussi des fractures sociologiques, qui s'expriment à mots couverts, révélatrices de ces conflits de territoires et même de classes sociales. D'un côté ce conflit s'exprime par une opposition entre la vallée, industrielle, et les contreforts des Pyrénées à Jurançon, qui spatialisent des antagonismes ville/campagne et industrie/agriculture. D'un autre côté les associations opposées au projet sont accusées d'être l'expression de points de vue de néo-ruraux, classe riche, qui recherche les agréments de la campagne et qui défend égoïstement son pré carré, tandis que les gens du cru seraient plus attentifs aux problèmes d'emploi de la vallée, avec les habitants de laquelle ils ont des liens familiaux.

Ces remarques montrent que les réactions des riverains au projet sont imprévisibles et dépendent de manière essentielle du contexte local. Toutefois, l'industriel qui cherche un site de stockage doit aussi avoir une attitude irréprochable. A Lacq, il a été au début reproché à Total sa communication inexistante. Il est très important d'agir avec transparence, de faire savoir ce qui est prévu plutôt que d'attendre que de folles rumeurs se propagent. De plus, le citoyen s'agace souvent rapidement lorsqu'il perçoit chez son interlocuteur une prétention à la supériorité de l'ingénieur ou du scientifique qui affirme tout savoir. L'arrogance de celui qui se comporte comme en terrain conquis, même sur un territoire dont il est un acteur habituel,

est rarement récompensée. La moindre des choses est de recueillir les réactions des personnes, face à un projet qui change un peu leurs conditions de vie. Il faut écouter et laisser le projet s'imprégner du contexte social. C'est le lot commun à l'heure de la démocratie technique. On ne répétera jamais assez l'importance de l'attitude et de l'image du promoteur de projet.

V.3.3 Les associations de défense de l'environnement

La controverse locale sur un site spécifique de stockage peut alors se transformer en remise en cause des choix de politique climatique du gouvernement français. Cette thématique environnementale a, à notre avis, plus de chances de surgir au niveau national et d'être abordée par les grandes associations de défense de l'environnement impliquées dans la lutte contre le changement climatique. Nous proposons ici une analyse de l'ambiguïté du CSC et de la façon dont les associations écologistes s'y sont confrontées.

De manière générale, une controverse sur une solution technique entraîne aussi bien souvent un débat sur les choix de société que celle-ci exprime. Une technique est rarement neutre, elle va de pair avec une organisation sociale, des rapports économiques : « la technique est, en réalité, un concept multidimensionnel, qui nous renvoie au capital et au travail mais aussi à des aspects écologiques, aux bilans de ressources et de l'énergie, au problème de la convivialité et de l'aliénation¹⁹ ». Une technique est l'expression, non univoque, de certains rapports de force, d'une certaine configuration du champ social ; elle n'est donc pas non plus déterminante et laisse, en fonction de la conjoncture historique, un certain nombre d'ouvertures.

Le CSC est à cet égard très ambivalent ; il peut être endossé par un vaste ensemble de choix de société possibles. En effet, il participe à un large éventail de futurs possibles, en fonction de l'ampleur qui lui est accordée et de sa position plus ou moins prioritaire relativement aux autres techniques. Il peut être l'élément pivot d'une stratégie de réduction minimale d'émissions de GES, entièrement assurée par le CSC ; ce serait le cas si les économies d'énergie ne trouvent pas à se réaliser et si le développement des énergies renouvelables est contrarié. A contrario, il peut être une pièce complémentaire dans une stratégie ambitieuse de sortie des énergies fossiles, et être installé avant tout sur les industries lourdes. Le premier scénario pourrait être repris à leur compte par les pétroliers-gaziers et les électriciens, car il s'accorde le mieux à leurs intérêts. L'Etat privilégierait plutôt un scénario où le CSC jouerait un rôle de technologie de transition assurant la jonction entre la fin progressive des énergies fossiles et l'arrivée des énergies propres ; il permettrait ainsi une lutte contre les GES sans brusquer la transition énergétique. Le spectre est donc large, et il faut avoir en tête l'ensemble de ces possibles pour comprendre les débats interminables autour du rôle du CSC dans la lutte contre les émissions de GES. D'une part chacun des acteurs privilégie un futur, un scénario idéal, d'autre part il associe le CSC (ou toute autre technique) à un scénario de référence de la technique (alors que plusieurs sont possibles), puis juge cette technique en comparant ce scénario de référence à son scénario idéal.

Pour les associations écologistes, le CSC est irrémédiablement attaché au premier scénario évoqué, celui des pétroliers-gaziers, et cela le condamne à leurs yeux. Pour eux, il ne s'agirait que d'une technique cosmétique pour se donner une bonne conscience climatique, une échappatoire pour éviter de changer nos habitudes de consommation de l'énergie, et les modes de production de celle-ci. Ce serait un alibi qui dispense de faire les vrais efforts sur la lutte contre les émissions, au niveau de la consommation par des économies d'énergie, et au

¹⁹ *Initiation à l'écodéveloppement*, I. Sachs éd., Privat, Toulouse, 1981, p.25.

niveau de la production par le développement des énergies renouvelables. Ici nous retrouvons l'opposition entre deux idéaux-types de société, qui structure la contestation écologiste du mode de développement des sociétés occidentales depuis les années 60, et les grandes luttes contre le nucléaire. D'un côté un modèle technocratique et productiviste, avec de grandes installations centralisées, de l'autre un modèle frugal et autonome, privilégiant la production à petite échelle, par des technologies « douces », décentralisées et facilement appropriables²⁰. C'est donc en partie au nom d'un autre modèle de société que le mouvement écologiste conteste les grandes installations centralisatrices, comme le nucléaire ou le CSC. Le choix technique est lié à une vision politique.

Voyons maintenant les positions de quelques associations.

Pour Greenpeace, le CSC est une « idée séduisante, mais un projet dangereux ». Le CSC ne serait pas intéressant dans la lutte contre le changement climatique car primo, il interviendrait trop tard (vers 2030 alors que nos émissions doivent commencer à baisser vers 2015) ; deusio, il consomme une quantité importante d'énergie ; tertio, il coûte trop cher à installer et renchérit le prix de l'électricité ; quarto, des fuites se produiraient qui pollueraient et dégraderaient les écosystèmes. Les objections de Greenpeace sur les délais et les coûts sont en opposition avec les informations des industriels (voir VI.5 pour un calendrier qui tient compte de l'acceptabilité sociale). Cependant, on ne peut complètement faire confiance aux industriels sur les chiffres qu'ils fournissent, étant donné l'intérêt qu'ils ont à ce que la technologie apparaisse à portée de mains et à moindre coût si les subventions sont versées généreusement. Ce qui est certain, c'est que le CSC a partie liée avec le monde des énergies fossiles (cf. III.3) et qu'en conséquence son surcoût ira croissant avec la raréfaction et le renchérissement des énergies fossiles. Toutefois, Greenpeace évacue un peu trop vite l'intérêt du CSC dans la réduction des émissions, en partie à cause de sa position sur le charbon. Greenpeace ne cesse, avec l'appui de scientifiques comme James Hansen, de réclamer un moratoire sur l'utilisation du charbon. Dans le monde de Greenpeace, le charbon a déjà disparu comme énergie utilisable. Dans la réalité, il n'en est rien, et on peut s'interroger sur la pertinence à long terme d'un tel moratoire. Malgré tous les problèmes de pollution que pose le charbon, plus importants, localement et à court terme, que sa contribution au réchauffement climatique, il est à craindre que le charbon en raison de sa disponibilité soit utilisé longtemps encore. Ainsi le CSC est une option qui devrait être considérée.

Le raisonnement précédent se rapproche de la position du World Wildlife Fund (WWF). Pour le WWF, le CSC pourrait jouer un rôle dans la lutte contre le changement climatique, à certaines conditions : la sécurité et la permanence du stockage doivent être prouvées, ainsi que l'absence d'impacts sur les écosystèmes. Le WWF s'interroge surtout sur les coûts, qui sont estimés par les industriels mais, pour une large part, inconnus. De plus les énergies renouvelables pourraient devenir plus compétitives que le CSC avant son déploiement. Le CSC a surtout le défaut de ne pas proposer d'alternatives à l'énergie fossile. Pour ces raisons, le WWF souhaite que les gouvernements mettent l'accent sur les économies d'énergie et les énergies renouvelables, qui fournissent le moyen d'une véritable transition énergétique, de manière prioritaire, et dans un deuxième temps seulement sur le CSC.

France Nature Environnement (FNE) met en avant la séquestration naturelle du carbone plutôt que la séquestration artificielle par le biais du CSC. Il s'agirait de développer les stockages du CO₂ au niveau des écosystèmes marins et terrestres. C'est une option intéressante, qui est déjà envisagée dans la communauté internationale dans les discussions

²⁰ Voir par exemple *Small is beautiful, une société à la mesure de l'homme*, E. Schumacher, 1979, Seuil.

sur les projets forestiers. Cette solution de réduction a aussi le mérite de pouvoir être combinée à des actions d'adaptation, comme restaurer la capacité des écosystèmes pour qu'ils soient plus résistants au changement climatique. Toutefois les possibilités de stockage du CO₂ dans les écosystèmes ne sont pas non plus infinies. Les forêts du monde représentent environ 2 300 GtC de carbone pour l'ensemble²¹ des écosystèmes en incluant les sols, tandis que les réserves de ressources fossiles représentent au moins 3 700 GtC. On peut douter qu'il soit envisageable de stocker une proportion significative de carbone des combustibles fossiles sous forme de matière organique. Envisage-t-on sérieusement de doubler la biomasse vivant sur Terre ? Cesser de dégrader le couvert forestier sera déjà une bonne action.

Sur le CSC, la position des représentants de FNE que nous avons rencontrés est assez tranchée. Le CSC entraîne une surconsommation d'énergie, or par principe, ils ne défendent pas ce qui entraîne un accroissement de la consommation énergétique. Les ressources fossiles sont des ressources rares, disponibles en quantité limitée et il ne faut pas les gaspiller, quand bien même cela serait pour limiter les émissions de GES. De plus, les installations de CSC supposent une vaste machinerie : unités de captage, tuyaux de transport sur tout le territoire, sites de stockage avec surveillance ; c'est une énorme structure qui n'est pas autonome, et le stockage n'est pas autostable mais doit toujours être ausculté. Nous retrouverons là une série d'arguments classiques, déjà discutés dans l'introduction de ce paragraphe.

Pour ces représentants, la question de l'exportation de ces technologies ne doit pas être un prétexte pour s'engager dans la construction d'installations sur le territoire national. Le CSC n'est pas un enjeu majoritaire en France, peu concernée par le problème des centrales à charbon ; la France n'a donc pas à prendre des risques sur son sol avec cette technologie, mais doit laisser les autres pays se débrouiller. Ils constatent d'ailleurs que les groupes industriels sont multinationaux et qu'ils peuvent très bien développer des pilotes et chercher des subventions ailleurs. Le contribuable français n'a pas à arroser d'argent de grands groupes nantis, pas plus que le riverain ne doit supporter les risques du développement du CSC, qui bénéficiera à d'autres. De manière plus générale, le CSC est perçu comme une technique improductive au niveau global de la société ; elle est rendue économiquement compétitive uniquement parce qu'un certain nombre de coûts ne lui sont pas imputés : coût de la recherche et du développement, assumé en grande partie par l'Etat, coût du risque, supporté par les riverains et surtout les générations futures, coût de la surveillance et de l'entretien du site à vie, qui sont délégués à l'Etat après une période suivant la fin de l'injection.

La question de l'engagement de l'Etat via les subventions est revenue à plusieurs reprises. La politique industrielle, en particulier l'aide à des filières spécifiques, est accusée de préempter les choix politiques à venir. En finançant une filière sur une technique nouvelle, on l'avantage et on lui donne d'autant plus de chances d'arriver à maturité qu'elle aura été lourdement subventionnée. Quelques années plus tard, au moment des choix politiques, cette filière sera présentée comme compétitive, disponible et sera choisie au détriment d'autres filières qui n'auront pas bénéficié d'un soutien public équivalent. La filière solaire, arrêtée dans les années 60 pour financer le lourd programme nucléaire français, a été donnée en exemple. La politique de recherche et de développement conditionne donc les avènements techniques possibles ; FNE ne veut pas que le soutien au CSC, à destination de grands groupes solides, assèche les subventions pour des acteurs moins puissants dans les économies d'énergie et les énergies renouvelables. La politique de l'Etat sur les techniques vertes et la politique climatique n'apparaissent pas comme crédibles. Au fond, pense-t-on, seul le CSC, aux mains de lobbies industriels, est défendu par l'Etat, et tout le reste n'est que poudre aux yeux.

²¹ Rapport 2007 du groupe de travail 1 du GIEC, section 7.3.

Il nous paraît important de relever ce qui touche aux conditions du débat et des négociations au sujet du CSC. L'association FNE n'est pas prête à entrer en discussion au sujet du CSC, parce qu'elle estime que l'Etat est particulièrement roué, que participer à un débat sera pris comme une acceptation sans conditions. Le souvenir du programme électro-nucléaire et l'absence de prise en compte des positions des associations sur ce débat ont laissé des séquelles profondes ; le nucléaire reste une obsession pour ces associations et tout est jugé à l'aune des différentes péripéties de son développement en France. Tant que cet abcès ne sera pas crevé, il sera extrêmement difficile d'engager un dialogue constructif avec les associations. Pour elles, l'Etat n'est plus un partenaire de confiance. Etant donné l'importance du nucléaire dans le positionnement des associations, chaque débat verra revenir ce sujet. Le maintien des lignes de force de chacun sur le nucléaire bloque presque toute discussion sur les aspects énergétiques.

La communication de FNE disponible sur son site internet est moins tranchée que les discussions que nous avons pu avoir avec certains représentants. Il n'y a pas de refus inconditionnel, même si les réserves sont identiques à celles que nous avons rapportées. FNE propose de limiter au maximum le recours au CSC, en lui appliquant un principe de subsidiarité par rapport aux autres techniques, c'est-à-dire que le CSC serait mis en œuvre lorsque les autres solutions auraient été appliquées mais seraient insuffisantes. Elle préconise d'arrêter tout financement public, demande des garanties juridiques comme l'inscription au régime ICPE. Enfin, elle recommande que les projets soient mutualisés au niveau européen plutôt que multipliés à chaque niveau national.

Pour conclure, l'attitude des associations écologistes va d'une hostilité franche à une méfiante circonspecte. Il est vrai que le CSC est autant porté aujourd'hui car il s'accorde aux intérêts de groupes puissants au sein de la société industrielle ; en ce sens il est plus consensuel que d'autres techniques car il préserve nombre d'intérêts acquis. Il est vrai aussi que le CSC entre en conjonction avec des techniques de production qui n'ont rien des technologies « douces » souhaitées par les écologistes. Il devrait toutefois être possible de rendre le débat moins idéologique en revenant à l'objectif de lutte contre le changement climatique. Il faut, pour résoudre ce problème, faire preuve de pragmatisme et envisager toutes les solutions. De même que certains écologistes²² ont accepté le nucléaire comme un moyen de lutter contre le changement climatique, il pourrait être possible de rendre le CSC acceptable au sein d'une stratégie ambitieuse de lutte contre le changement climatique. L'acceptation de la technique dépendra en partie du choix politique pour lutter contre les émissions de GES, et de la sincérité de ce choix. La façon dont s'insère le CSC dans les stratégies de réduction, et plus encore la crédibilité de l'implication du gouvernement sur les autres pans de la stratégie climatique seront déterminantes à notre avis pour les associations écologistes. La question de l'ampleur des fonds alloués à chaque solution sera sans doute cruciale pour cette crédibilité : les associations accusent déjà le gouvernement de consacrer trop d'argent au CSC.

²² Voir par exemple la position de James Lovelock, le défenseur de l'hypothèse Gaïa, dans « Nuclear is the only green solution », *The Independent*, 24 mai 2004 (traduction française, « Le nucléaire est la seule solution écologique », *Le Monde*, 1 juin 2004) ou plus récemment le revirement de quatre écologistes britanniques, « Nuclear Power ? Yes please », *The Independent*, 23 février 2009.

Chapitre VI

L'implication des acteurs sociaux dans une politique de déploiement du CSC

La technologie du CSC nous paraît incontournable pour réaliser en France le « facteur 4 » car elle apporte des marges de manœuvre précieuses pour atteindre un objectif vital mais très ambitieux. Toutefois, comme le stockage du CO₂ touche au domaine du sous-sol, il joue à la fois sur des représentations symboliques et sur des structures sociales, par exemple le droit de propriété ou le cadre de vie. En raison de ces aspects, l'Etat devra impliquer les acteurs sociaux dans le processus de construction de la filière CSC sur le territoire français.

Impliquer les acteurs sociaux ne signifie pas que la stratégie de déploiement du CSC en France relève de la décision de ces acteurs. Il ne faut surtout pas confondre les rôles de chacun. Cette stratégie de déploiement du CSC en France doit être définie par l'Etat. Les acteurs sociaux doivent en revanche être associés au processus de décision.

La première question qui se pose est la suivante : faut-il une politique forte sur le déploiement du CSC en France ?

En effet, une position complètement interventionniste et dirigiste pourrait être perçue, en particulier au niveau européen, comme en opposition au système des quotas de CO₂. Le principe est en effet que les industriels se positionnent librement sur la réduction de leurs émissions, en fonction du signal prix : il n'y a pas d'obligation sur les techniques mises en œuvre.

Toutefois, la France ne peut pas regarder le train passer et ne pas saisir l'opportunité de déployer cette technologie CSC prometteuse tant du point de vue politique environnementale que du point de vue politique industrielle. L'Etat français doit donc bâtir une stratégie de déploiement de cette technologie pour permettre, le moment venu en fonction d'un signal prix favorable, aux industriels implantés sur notre territoire d'opter pour le CSC.

La seconde question à résoudre est : faut-il organiser un débat public national d'option générale sur l'opportunité de développer en France une filière CSC ?

La réponse est « non ». Pourquoi ?

Certains oseront avancer l'argument que ce débat a déjà eu lieu sous une autre forme lors du Grenelle de l'environnement. Cet argument n'est pas recevable. Certes le CSC a été abordé, mais il n'a pas été le sujet central sur lequel les acteurs sociaux ont eu l'occasion de s'exprimer. De plus, les connaissances disponibles sur cette technologie n'étaient pas suffisantes pour que le citoyen soit capable d'appréhender ce sujet.

L'argument qui nous paraît le plus pertinent, porte sur les risques de dérive d'un tel débat qui nuirait de fait au déploiement du CSC. En effet, il est fort à parier que les associations de protection de l'environnement profitent d'une telle occasion pour focaliser l'attention des français sur le grand thème classique : quelle politique énergétique pour la France de demain ? Pour ou contre le nucléaire ?

Il est donc important de définir une politique de déploiement du CSC où stratégie de l'Etat et participation citoyenne puissent aboutir aux meilleurs choix pour notre pays.

Quatre phases de cette politique nous semblent nécessaires :

- *une première phase « pragmatique » consistant à intensifier la stratégie de recherche, axée sur des pilotes et démonstrateurs afin d'acquérir les connaissances indispensables, tant pour les acteurs concernés par cette technologie que pour le citoyen devant être capable d'appréhender le sujet ;*
- *une deuxième phase « politique » consistant à bâtir une stratégie de déploiement du CSC sur le territoire français, en fixant des objectifs de déploiement des capacités de stockage, et en définissant une procédure de recherche de zones « socialement acceptables » pour l'implantation de sites ;*
- *une troisième phase « consultative » consistant à organiser des débats publics pour identifier les projets « socialement acceptables » ;*
- *une quatrième phase « administrative » consistant à instruire chaque projet industriel de stockage de CO₂.*

Comme nous allons le voir, les trois premières phases nécessitent d'une part une forte implication politique, d'autre part la mise en place d'une nouvelle forme de débat public plaçant le citoyen en arbitre de projets en concurrence.

VI.1 Une première phase « pragmatique »

La première phase de la politique de déploiement du CSC est pragmatique. Elle a pour objectif d'intensifier la stratégie de recherche axée sur des pilotes et démonstrateurs afin d'acquérir les connaissances indispensables tant pour les acteurs directement concernés par cette technologie que pour le citoyen devant être capable d'appréhender le sujet.

L'acceptation par la population de la filière CSC, et surtout des sites de stockage de CO₂, nécessite l'acquisition d'une conscience collective de l'opportunité de recherches, de pilotes et de démonstrateurs sur le sujet, alliée à une confiance sur les capacités techniques à maîtriser les risques des opérations.

Tout comme le phénomène général du réchauffement climatique, le stockage de CO₂ appelle un effort de vulgarisation scientifique, en particulier sur les aspects chimiques et géologiques. Il semble important d'apporter des informations synthétiques sur le cycle du carbone et sur sa répartition entre atmosphère, biosphère, lithosphère et océans. Montrer que les activités humaines, en extrayant de la lithosphère le carbone sous forme de fossiles pour le relâcher dans l'atmosphère sous forme de CO₂, perturbent cette répartition, fait apparaître le stockage de CO₂ comme un effort pour remettre l'élément carbone à sa place initiale.

Parallèlement, le citoyen n'acceptera les stockages de CO₂ que s'il est capable d'en appréhender les risques. Ceci ne sera possible que si l'Etat, à travers des organes de recherche ou de formation, est capable de mettre à disposition du citoyen des informations précises sur le procédé employé et ses risques ; informations transparentes, simplifiées, mais quantitatives. La puissance publique ne doit pas laisser le monopole de l'information scientifique aux industriels et aux pétroliers. La position d'impartialité exprimée par des organismes publics apportera du crédit à une analyse des risques plus exhaustive, tournée vers la protection de

l'environnement et des populations ; le citoyen aura moins l'impression d'un complot ourdi à son insu. Sous cet angle, l'existence de réseaux de partage des connaissances scientifiques est primordiale, car elle multipliera la quantité et la fiabilité des informations scientifiques qui seront accessibles au public.

Il est donc essentiel que l'Etat explicite sa stratégie de recherche. Il est d'ailleurs invité par la directive européenne du 23 avril 2009 sur le CSC à préciser la durée de cette phase de recherche, et le nombre d'installations pilotes à but de recherche sur le sol français. Les objectifs devront être raisonnables, mais précis et assortis d'engagements financiers sur les recherches qui devront être lancées.

Afin que cette phase de recherche soit la plus profitable du point de vue de l'acceptabilité sociale, il paraît souhaitable que des objectifs chiffrés de démonstrateurs soient fixés pour chaque bassin sédimentaire susceptible d'accueillir par la suite des installations de stockage de CO₂ : le bassin de Paris, le bassin du sud-est et éventuellement le bassin d'Aquitaine. Ces unités de démonstration, implantées localement, permettront en effet de sensibiliser le plus amont possible les populations, les associations, les élus, ... qui se sentiront ainsi directement concernés. Elles permettront également de mieux apprécier les capacités géologiques des différents bassins à stocker du CO₂.

Pour les raisons évoquées ci-avant et face à la nécessité pour la France de développer des projets CSC on-shore, il paraît souhaitable que les engagements financiers de l'Etat ne portent que sur des démonstrateurs avec stockage on-shore sur le territoire français, hormis éventuellement le cas de la mer Méditerranée (qui peut intéresser la France).

Compte tenu de la durée de cette phase de recherche (une dizaine d'années dans le meilleur des cas), il semble important que cette stratégie de recherche soit inscrite dans une loi votée par le Parlement : la continuité de la représentation nationale la rend en effet plus légitime sur une longue durée que l'exécutif. Cela pourrait se faire lors de la transposition par voie législative de la directive européenne du 23 avril 2009 sur le CSC qui doit avoir lieu courant 2011. Ce travail d'affichage a déjà commencé avec la loi Grenelle 1, mais devra être poursuivi et approfondi au fur et à mesure des avancées de la recherche.

L'inscription dans cette loi de la mise place d'un site internet de partage des connaissances accessible au public avec possibilité pour chaque citoyen de faire part de ses observations ou interrogations, ainsi que de l'obligation de mettre en place une Commission locale d'information et de surveillance (CLIS) dès le lancement d'un projet de pilote ou démonstrateur à l'instar de ce qui s'est fait pour le projet de Lacq, paraît souhaitable.

L'Etat devra communiquer sur le programme de recherche mené sur la technologie du CSC. Il devra à cet effet développer un argumentaire justifiant la recherche sur cette technique. Deux points devraient être mis en avant : d'une part, le CSC sert à réduire nos émissions de GES d'une manière essentielle pour atteindre le « facteur 4 », d'autre part, le développement du CSC est une contribution des savoir-faire français au problème mondial du changement climatique et de la transition énergétique. Ce discours devra éviter quelques pièges.

Il faudra, en premier lieu, veiller à ce que le CSC n'occulte pas les autres efforts à fournir pour réduire les émissions. La position du Commissariat Général au Développement Durable (MEEDDM) et d'agences telles que l'ADEME est à ce sujet fondamentale : contrairement aux industriels et aux organismes de recherche (IFP, BRGM...), ceux-ci incarnent le fait que la puissance publique met en jeu toutes les solutions envisagées. La

solution CSC devra toujours faire partie d'un ensemble de mesures comprenant, entre autres, la sobriété énergétique, les énergies renouvelables ou les transports alternatifs.

Deuxièmement, la connotation des messages devra être subtilement appréciée. Un argument tel que l'évolution de notre base industrielle vers des voies plus vertes, pourrait être aussi présenté comme un moyen pour l'industrie française de rester dans la course internationale, ou comme un moyen de stopper les délocalisations et de protéger les emplois. Cette rhétorique nous paraît hasardeuse, car la stratégie devient alors défensive : le CSC n'est plus que le moindre mal entre polluer les sols et voir les emplois disparaître... La communication, si elle n'est pas tout, peut néanmoins amener l'opinion à refuser en bloc le CSC.

VI.2 Une deuxième phase « politique »

La deuxième phase de la politique de déploiement du CSC est politique. L'Etat français doit bâtir sa stratégie de déploiement de cette technologie sur son territoire.

Le premier axe de cette stratégie est de fixer des objectifs de déploiement des capacités de stockage par bassin sédimentaire retenu et répondant aux besoins. Par exemple, ces besoins peuvent être estimés pour chaque bassin sédimentaire retenu (au minimum le bassin de Paris et le bassin du sud-est), en utilisant les estimations des émissions cumulées sur 50 ans des grands émetteurs (sites émettant plus de 0,9 MtCO₂/an) se trouvant dans le bassin ou à une distance acceptable (quelques centaines de kilomètre) de ce dernier. Ceci n'est qu'un exemple. Ces objectifs et les échéances pour les atteindre devront en effet faire l'objet d'un large débat parlementaire avant d'être fixés dans une loi.

Le deuxième axe de cette stratégie est de définir une procédure de recherche de zones « socialement acceptables » pour l'accueil de sites de stockage dans chaque bassin sédimentaire retenu.

Ce travail de concertation avec les représentants locaux consiste à identifier les zones les plus favorables pour recevoir un ou des sites de stockage de CO₂, sans toutefois présumer qu'une zone puisse être meilleure qu'une autre du point de vue géologique. Il pourra avoir lieu lorsque la puissance publique disposera de suffisamment d'informations scientifiques et d'instruments légaux, pour répondre aux différentes interrogations, par exemple sur les risques de remontée du CO₂ et de pollution. A ce titre, il devra intervenir alors qu'aucune localisation précise n'aura été évoquée, et la présentation devra être indépendante d'un quelconque industriel projetant d'exploiter des stockages.

Ce travail de terrain pourrait faire l'objet d'une mission confiée par le Gouvernement à un député intéressé par ce sujet, à l'instar de ce qui s'est fait avec la mission « Bataille » pour la recherche de sites favorables à l'implantation d'un laboratoire dans le domaine des déchets nucléaires. Son rôle serait d'animer le débat local et de recevoir les opinions, marques d'intérêt ou critiques de la part de toutes les parties prenantes : élus locaux, associations locales, habitants, industriels intéressés... Le choix d'un député, non élu des zones concernées, nous semble judicieux au sens où il apportera un statut d'impartialité, ainsi qu'une sensibilité aux préoccupations locales.

L'objectif de cette concertation n'est pas d'aboutir à des candidatures de territoires plaçant par la suite les élus dans une position délicate par rapport aux habitants (comme cela a été le cas pour la recherche de sites de stockage des déchets de faible activité et à vie longue (FAVL) dans le domaine des déchets nucléaires) mais de compléter la cartographie des zones

géologiquement favorables pour le stockage de CO₂ par une cartographie des zones « socialement acceptables » pour celui-ci.

Cette cartographie des zones « socialement acceptables » permettrait par la suite aux porteurs potentiels de projets de stockage de mieux cibler leur recherche de sites et de ne pas se baser uniquement sur des critères d'acceptabilité géologique comme on peut encore le constater dans différents domaines, comme par exemple pour les centres d'enfouissement de déchets ménagers et assimilés.

Le troisième et dernier axe de cette stratégie est de prévoir le lancement d'appels à projets de stockage afin d'identifier les différents projets en concurrence permettant d'atteindre les objectifs de déploiement des capacités de stockage par bassin sédimentaire retenu.

Ce recensement des différents projets ayant pour objectif de lancer la troisième phase « consultative » de la politique de déploiement, il s'ensuit que les dossiers déposés devront présenter les objectifs et les principales caractéristiques du projet, ainsi que les enjeux socio-économiques, le coût estimatif et l'identification des impacts significatifs du projet (contenu minimal d'un dossier en vue d'un débat public).

Pour asseoir cette stratégie de déploiement du CSC en France, il est souhaitable que les trois axes qui la constituent soient définis dans une loi après un large débat parlementaire.

VI.3 Une troisième phase « consultative »

La troisième phase de la politique de déploiement du CSC est consultative. Elle consiste à organiser, pour chaque bassin sédimentaire retenu, un débat public afin d'identifier, parmi les projets en concurrence suite à l'appel à projets, ceux qui paraissent les plus « socialement acceptables ».

Quant au but de ce type de consultation, un point nous semble primordial : si les scientifiques doivent s'employer à se prononcer sur les aptitudes des sites à recevoir un stockage de CO₂, leur rôle n'est pas de justifier le choix d'un meilleur site possible sur le plan géologique, laissant ainsi la société en marge du processus de choix.

Il est également important, comme les associations de protection de l'environnement ont pu le faire savoir, de ne pas se lancer à nouveau dans des débats publics tels ceux des réacteurs type EPR à Flamanville et Penly où tout semble joué d'avance, et où finalement la société ne voit pas quel rôle elle peut jouer dans ce type de consultation.

Cette nouvelle forme de débat public qui est proposée ici laisse ainsi la plus grande place à la liberté sociale. Il paraît en effet important de laisser une forte marge de manœuvre à la société, afin qu'elle puisse s'exprimer sur les projets, pour lesquels elle accepterait une éventuelle implantation sous certaines conditions, notamment leur localisation.

Outre la possibilité laissée au public de s'exprimer sur les projets, ce type de débat public permettra d'apporter aux différents porteurs de projet un éclairage sur la viabilité de leur projet du point de vue de l'acceptabilité sociale. Le débat public, il faut le rappeler, n'est pas le lieu de décision, ni même de la négociation. Il est un temps d'ouverture et de dialogue dans le processus de décision, un temps riche d'opinions et de positions diverses dans lequel le public, par son « expertise d'usage », peut apporter des points de vue nouveaux qui constitueront autant d'éléments de réflexion pour les porteurs de projet et les aideront à préparer leurs futures décisions. Le débat public mettra en évidence les éléments clés

permettant à chaque porteur de projet soit de refonder son projet et de mieux cerner les conditions de sa réussite, soit de le suspendre, voire de l'abandonner.

Chaque porteur de projet devra par la suite (dans un délai de trois mois) rendre public la décision qu'il prend sur la suite à donner au projet. Il faut que cette décision soit motivée et qu'elle le soit par référence précisément à ce qu'a été le contenu du débat public. C'est très important car c'est ainsi que l'on montre aux participants qu'ils ont été écoutés et que le débat public a été utile.

Pour chaque bassin sédimentaire retenu, le débat public devra se dérouler sur le territoire le plus large possible où se trouvent les différents maillons de la filière CSC ; à savoir les projets de sites de stockage, les territoires des émetteurs potentiellement concernés et des infrastructures de transport.

Ce type de débat public concernant plusieurs projets en concurrence, seule la Commission nationale du débat public peut l'organiser en confiant l'animation de ce débat à une commission particulière.

VI.4 Une quatrième phase « administrative »

La quatrième phase de la politique de déploiement du CSC est administrative. Elle consiste à instruire chaque projet industriel de stockage de CO₂.

Deux procédures sont nécessaires :

- la demande de concession en application du code minier ;
- la demande d'autorisation d'exploiter en application du code de l'environnement et en particulier de la législation sur les installations classées pour la protection de l'environnement.

Ces demandes seront instruites au niveau local par la DREAL, en liaison avec les administrations centrales DGEC et DGPR respectivement pour la concession et l'autorisation d'exploiter.

Une fois les demandes déposées, les questions d'acceptation de l'exploitation par les populations locales se poseront sous l'angle des relations entretenues au jour le jour entre industriel porteur du projet, administration, associations et élus locaux. Il est souhaitable que face à la nouveauté de la technologie, une CLIS soit mise en place dès le lancement de la procédure. Le choix d'un politique local, par exemple d'un membre du conseil général ou régional ou d'un député, pour la présidence de la CLIS, semble intéressant pour l'importance du rôle de médiation locale.

En outre, la posture de la puissance publique, à travers celle de l'administration qui assurera le contrôle de la sûreté de l'installation, sera le facteur déterminant d'un dialogue constructif durant cette phase de concertation. Il est important que le contrôle soit légitimé dès le départ, ce qui sera fait en plaçant les stockages de CO₂ sous le contrôle de l'inspection des installations classées en application du code de l'environnement. En sus, l'administration devra toujours veiller à garder une position indépendante de celle de l'industriel, en particulier parce que l'Etat est aussi promoteur de la technologie au niveau national.

L'administration devra savoir exiger de l'industriel exploitant les informations, ainsi que les actions de prévention qui lui sembleront nécessaires, en commandant au besoin des expertises réalisées par des tiers, indépendants de celui-ci. Elle devra garder sa posture

d'organe d'instruction indépendant, capable le cas échéant de dire « non ». Il est également important que sa communication, dans les procédures d'information locale, reste toujours distincte de celle de l'industriel, tout en gardant un rôle d'éclaircissement sur les risques, même face à des acteurs locaux opposés au projet par principe.

Un point important concernera l'insertion du projet dans la stratégie locale.

L'existence d'un bénéfice pour le territoire, lié à l'installation d'un site de stockage, est en effet un sujet sensible en matière d'acceptation sociale. Ce point mérite à notre sens d'être éclairci par l'Etat, car l'étendue géographique de la zone de suppression dans l'aquifère réservoir peut s'étendre sur quelques dizaines de km, selon les simulations du BRGM. En particulier, il est souhaitable que la concertation locale inclue les structures intercommunales et le Conseil général pour la définition d'un projet de développement du territoire. Les associations locales devraient aussi être consultées dans ce cadre, ce qui donnerait, là encore, une marge de manœuvre incitant à des positions constructives vis-à-vis du projet.

La question des retombées financières est aussi un point à éclaircir. Il paraît en effet souhaitable que l'Etat fixe de manière transparente les modalités de la compensation payée par l'industriel et reversée aux collectivités. Ceci présenterait l'avantage de lever tout a priori négatif sur un accord contractuel entre l'industriel et les communes. Des mécanismes de compensation nouveaux devront être imaginés, et on pourrait penser par exemple à une taxe assise sur la masse de CO₂ injecté, à destination du territoire. Les industriels accepteraient sûrement plus facilement son existence, dans la mesure où elle concourrait à l'acceptation des installations par les populations.

VI.5 Echancier associé à ces quatre phases

Les quatre phases pragmatique, politique, consultative et administrative ont des objectifs précis sur des durées relativement longues.

- la première phase pragmatique consistant à intensifier la stratégie recherche nécessite au minimum une dizaine d'années pour d'une part acquérir les connaissances indispensables sur la technologie, d'autre part sensibiliser le citoyen le plus en amont possible ;
- la seconde phase politique consistant à bâtir une stratégie de déploiement du CSC repose sur trois axes : la définition d'objectifs de déploiement, la recherche de zones « socialement acceptables » et le lancement d'appels à projets. Ces trois axes qui doivent se dérouler successivement, nécessiteront des durées importantes. Une dizaine d'années semble nécessaire pour mener à bien ce travail ;
- la troisième phase consultative consistant à organiser des débats publics pour identifier les projets socialement acceptables nécessitera quant à elle une durée minimale de l'ordre de trois ans ;
- enfin, la quatrième phase administrative consistant à instruire chaque projet industriel de stockage, sera difficile comme pour tout projet touchant au sous-sol et aux déchets. Une durée minimale de trois ans paraît toutefois envisageable pour la mener à bien.

Les durées évoquées ci-avant sont indicatives. Elles ne prennent pas en compte les durées prévues par telle ou telle réglementation pour les différentes procédures. Elles sont

plutôt le reflet de ce que l'on peut voir dans le cadre de procédures analogues sur des sujets difficiles qui touchent au sous-sol ou au domaine des déchets.

En essayant d'optimiser l'enchaînement des différentes phases, on pourra peut-être gagner quelques années. Il faudra toutefois rester attentif à ne pas griller des étapes au risque de voir le travail visant à une meilleure prise en compte de l'acceptabilité sociale, anéanti.

Il faut donc accepter l'idée d'une durée de vingt à trente ans nécessaire à un déploiement de cette technologie sur le territoire français, accepté par la société. En France, le CSC ne pourrait donc se déployer à grande échelle qu'aux environs de 2030-2040 si l'Etat français décidait de mettre en œuvre la politique proposée dans cette étude. Cette durée est d'ailleurs compatible avec celle pour la mise en place d'un réseau de transport du CO₂.

Conclusion

Conçu comme un des instruments de la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre, le captage et stockage du dioxyde de carbone est une technique en devenir. Confinée auparavant dans les laboratoires, elle commence à s'installer en plein air, soumise aux vents de la société. Nous avons vu dans ce mémoire les préoccupations engendrées par ce passage en grandeur nature, en sus des interrogations techniques : localisation des sites de stockage, risques sanitaires et environnementaux, réversibilité, stratégie des acteurs...

Nous avons envisagé l'avenir du CSC sous l'angle de la réaction des différentes composantes de la société à l'entrée de cet objet dans leur champ d'action, problématique résumée sous le vocable d'acceptabilité sociale. Notre étude a débouché sur une proposition de cadre institutionnel dans lequel ces réactions pourraient s'exprimer et se confronter.

En guise de conclusion, nous voudrions formuler un avertissement. La démarche de l'acceptabilité sociale ne doit pas être conçue dans un but de manipulation de l'opinion publique. Elle ne consiste pas à « rendre acceptable », c'est-à-dire à « faire accepter », si besoin par le biais de méthodes proches de la propagande. Bien au contraire.

Prendre en compte l'acceptabilité sociale, c'est placer le citoyen au cœur des choix techniques, tourner le dos à la tentation technocratique et tendre vers plus de démocratie. Il faut désormais inventer de nouvelles formes de représentativité pour discuter des questions techniques, qui ne peuvent être laissées au pouvoir des experts. La procédure proposée en dernière partie est une expérimentation de ce genre. Elle demande de l'ouverture d'esprit de la part de chacun, de l'attention aux avis des autres, de l'honnêteté intellectuelle dans la prise de position.

Notre procédure ne doit pas être considérée comme une clause formelle, purement symbolique, qui sacrifie à la mode du temps ou à une demande politique, sans rien changer au fond. La participation de chacun dans le processus doit être prise au sérieux, elle contribue à la légitimité de la décision. La franchise et la transparence, l'écoute et le débat ne sont pas des maux nécessaires, mais créent la confiance et le respect qui assurent la cohésion de la société. S'il peut être tentant de les contourner pour hâter la réalisation de projets, les effets d'un tel manquement peuvent être désastreux à long terme.

Nous espérons par nos propositions contribuer à donner de l'ampleur à un dialogue social malmené, particulièrement dans le domaine sociotechnique. La société française, et européenne, en aura besoin pour faire face aux défis de l'avenir.

Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont généreusement accueillis dans leurs institutions, et qui nous ont consacré beaucoup de leur temps afin de répondre à nos questions. Beaucoup d'informations nous ont été apportées dans ces entretiens, dont le mémoire ne reprend qu'une partie.

En particulier nous tenons à remercier chaleureusement les personnes suivantes (dans l'ordre alphabétique) :

Olivier Appert (IFP)
Maryse Ardit (France Nature Environnement)
Stéphanie Arnoux (ADEME)
Christian Bataille (Assemblée Nationale)
Gilles Berroir (DGPR)
Philippe Bodenez (DGPR)
Jean Boesch (DGPR)
Didier Bonijoly (BRGM)
Olivier Bouc (BRGM)
Yves Boulaigue (DREAL Aquitaine)
Bruno Cahen (Andra)
Daniel Clément (ADEME)
Denis Clodic (Mines Paristech)
Maxime Courty (DREAL Lorraine)
Stéphanie Croguennec (DGALN),
Fabrice Dambrine (CGIET)
François Démarcq (BRGM)
Philippe Deslandes (CNDP)
Dominique Dron (cabinet du MEEDDM)
Marie-Claude Dupuis (Andra)
Pascal Dupuis (DGEC)
Emmanuel Garbolino (Mines Paristech)
Albane Gaspard (ADEME)
Philippe Geiger (DGEC)
François Giger (EDF)
Christine Gilloire (France Nature Environnement)
Laurent Guillot (Saint-Gobain)
Minh Ha-Duong (CIRED)
André-Claude Lacoste (ASN)
Richard Lavergne (CGDD)
David Lebain (DGEC)
Patrick Legrand (CNDP)
Jean-Marc Leroy (Storengy)
Cindy Letrouvé (DGPR)
Claude Mandil (AIE)
Serge Miraucourt (DGPR)
Sophie Murlon (DREAL Champagne-Ardenne)
François Mudry (ArcelorMittal)

Gilbert Meunier (Storengy)
Stéphane Noel (DGPR)
Alain Paillou (DGALN)
Michel Petit (CGIET)
Jean Poulit
Virginie Schwarz (ADEME)
Marc Sénant (France Nature Environnement)
Monique Sené (GSIEN)
Louis Sonnois (Alstom)
Marie-Solange Tissier (Mines-Paristech)
Philippe Vesseron (BRGM).

Bibliographie

[AIE, 2008] *Energy Technology Perspectives, Scenarios and Strategies to 2050*, AIE, 2008.

[BRGM, 2007] *Capter et stocker le CO₂ dans le sous-sol, Une filière technologique pour lutter contre le changement climatique*, BRGM Editions, 2007

[CAS, 2007] *Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050*, Rapport de synthèse, Centre d'Analyse Stratégique, 2007.

[EU GeoCapacity, 2009] European Commission – Project no. SES6-518318, EU GeoCapacity, Assessing European Capacity for Geological Storage of Carbon Dioxide, D42 GeoCapacity Final Report, 2009.

[IFP, 2010] *Le captage du CO₂. Des technologies pour réduire les émissions de gaz à effet de serre*, IFP, ISBN 978-2-7108-0938-8, 2010.

[INRS, 1999] INRS – Dossier médico-technique 79 TC 74, Intoxication par inhalation de dioxyde de carbone, Documents pour le médecin du travail n°79, 3^e trimestre 1999.

[Audigane et al., 2007] Pascal Audigane, Irina Gaus, Isabelle Czernichowski-Lauriol, Karsten Pruess and Tianfu Xu, Two-dimensional reactive transport modeling of CO₂ injection in a saline aquifer at the Sleipner site, North Sea, *American Journal of Science*, Vol. 307, September 2007, P.974-1008; doi:10.2475/07.2007.02

[Nordbotten et al., 2005] Jan Martin Nordbotten, Michael A. Celia, Stefan Bachu, and Helge K. Dahle. Semianalytical Solution for CO₂ Leakage through an Abandoned Well, *Environ. Sci. Technol.*, 2005, 39 (2), pp 602–611, DOI: 10.1021/es035338i

[Jacquemet, 2009] Nicolas Jacquemet, Leakage of CO₂ with impurities in fresh water aquifer – impact evaluation by reactive transport modelling, BRGM, 2009

[Fabriol et Bouc, 2009] Hubert Fabriol, Olivier Bouc, Critères de sécurité pour le stockage géologique du CO₂. Dossier spécial du BRGM, année internationale de la planète Terre, 10 grands enjeux des géosciences; 2009. ISBN 978-2-7159-2463-5.

[CO₂GEONET, 2008] CO₂ Geonet, Réseau d'excellence européen sur le stockage géologique de CO₂ – Que signifie vraiment le stockage géologique du CO₂ ?, ISBN 978-2-7159-2456-7, novembre 2008.

[TOTAL, 2007] Total S.A., Dossier de concertation – Projet pilote de captage et de stockage géologique de CO₂ dans le bassin de Lacq, octobre 2007.

[GIEC, CSC, 2005] Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat – Rapport spécial, Piégeage et stockage du dioxyde de carbone, ISBN 92-9169-219-0, 2005

[RT I, GIEC, 2007] Résumé technique : éléments scientifiques, Contribution du Groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation, GIEC, 2007.

[RiD II, GIEC, 2007] Résumé à l'intention des décideurs : conséquences, adaptation et vulnérabilité, Contribution du Groupe de travail II au quatrième Rapport d'évaluation, GIEC, 2007.

[RT III, GIEC, 2007] Résumé technique : atténuation du changement climatique, Contribution du Groupe de travail III au quatrième Rapport d'évaluation, GIEC, 2007.

[WRI, 2005] *Navigating the numbers, Greenhouse Gas Data and International Climate policy*, World Resources Institute, 2005.

[McKinsey, 2009] *Pathway to a Low Carbon Economy*, Mc Kinsey, 2009.

Table des matières

Avant-propos	1
--------------------	---

Chapitre I

Eléments de contexte : effet de serre et politiques climatiques

I.1 Une prise de conscience	3
I.2 Le réchauffement	5
I.3 L'origine du réchauffement : l'effet de serre	6
I.4 Les émissions	9
I.5 Agir contre le réchauffement climatique	12
I.6 L'action internationale	13
I.7 Le budget carbone du XXI ^e siècle	14
I.8 Les solutions de réduction des GES	17

Chapitre II

Aspects technologiques et industriels du CSC

II.1 La filière CSC	21
II.1.1 Le captage du CO ₂	22
II.1.2 Le transport	23
II.1.3 Le stockage	23
II.2 Les principaux pilotes et démonstrateurs	25
II.2.1 Les principaux projets dans le monde avec stockage du CO ₂	25
II.2.2 Les projets européens de pilotes et démonstrateurs des producteurs d'électricité	26
II.2.3 Les projets de pilotes et démonstrateurs en France	27

Chapitre III

Les enjeux du CSC pour la France

III.1 Les émissions évitables	29
III.1.1 Les émissions évitables au niveau mondial	29
III.1.2 Les émissions évitables en France	31

III.2 Les capacités de stockage	35
III.2.1 Les capacité de stockage au niveau mondial	36
III.2.2 Les capacités de stockage au niveau européen	37
III.2.3 Les capacités de stockage en France.....	38
III.3 Les enjeux économiques	40

Chapitre IV

Sécurité, prévention des risques : des conditions préalables à l'acceptation sociale

IV.1 Des risques à démystifier, mais aussi à comprendre	44
IV.1.1 Le CO ₂ n'est pas un gaz toxique	44
IV.1.2 Toutefois, les risques de remontée de CO ₂ existent	45
IV.2 Les risques de remontée de CO₂	46
IV.2.1 Comprendre le fonctionnement des stockages en aquifères	47
IV.2.2 L'expérience des pétroliers suffit-elle ?	48
IV.2.3 Certains points sont encore mal connus	51
IV.3 Quelques pistes pour une prévention des risques structurée	53
IV.3.1 Une démarche de prévention à préciser.....	53
IV.3.2 La question de la responsabilité après arrêt des injections.....	54
IV.4 Réversibilité et mémoire des sites : des spécificités à prendre en compte	55
IV.4.1 La question de la réversibilité.....	55
IV.4.2 Echelles de temps, mémoire des sites : un sujet radioactif ?	58

Chapitre V

Stratégies d'acteurs : une influence sur l'acceptabilité sociale

V.1 Des acteurs du monde économique intéressés	61
V.1.1 Les pétroliers.....	62
V.1.2 Les organismes de recherche	63
V.1.3 Les grands émetteurs.....	63
V.1.4 Les électriciens.....	64
V.1.5 Les équipementiers	65
V.2 Une position ambivalente de la puissance publique	66
V.2.1 L'Etat	66
V.2.2 Les collectivités locales	68

V.3 La société civile face à ses interrogations.....	70
V.3.1 La population	70
V.3.2 Les associations locales	72
V.3.3 Les associations nationales de défense de l'environnement	74

Chapitre VI

L'implication des acteurs sociaux dans une politique de déploiement du CSC

VI.1 Une première phase « pragmatique »	80
VI.2 Une deuxième phase « politique »	82
VI.3 Une troisième phase « consultative ».....	83
VI.4 Une quatrième phase « administrative »	84
VI.5 Echancier associé à ces quatre phases.....	85
Conclusion.....	87
Remerciements	89
Bibliographie.....	91
Table des matières	93

