

Document public

Limiter les émissions de CO₂ pour lutter contre le réchauffement climatique. Enjeux, prévention à la source et séquestration



BRGM/RP-52406-FR
juin 2003



Document public

Limiter les émissions de CO₂ pour lutter contre le réchauffement climatique. Enjeux, prévention à la source et séquestration



BRGM/RP-52406-FR
Juin 2003



N. Audibert



Mots clés : Réchauffement climatique, Gaz à effet de serre, CO₂, Cycle du carbone, Puits, Source, Émissions anthropiques, Protocole de Kyoto, Mécanisme de projet, Mécanisme de développement propre, Mesures domestiques, Inventaire d'émission, Scénarios d'émissions, Combustibles fossiles, Capture, Séquestration géologique, Océans, Pétrole, Gaz naturel, Charbon, Aquifères, Réservoirs, Biosphère, Forêt, Analyse de cycle de vie.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Audibert N. (2003) – Limiter les émissions de CO₂ pour lutter contre le réchauffement climatique : enjeux, prévention à la source et séquestration. BRGM/RP-52406-FR, 275 p., 62 fig., 15 tabl., 4 ann.

“Human beings are carrying out a large-scale geophysical experiment of a kind that could not have happened in the past nor be produced in the future. Within a few centuries, we are returning to the atmosphere and the oceans the concentrated organic carbon stored in sedimentary rocks over hundreds of millions of years”.

Revelle R. et Suess H. E., 1957.

Synthèse

Cette étude a été menée dans le cadre du mastère spécialisé en Ingénierie et de Gestion de l'Environnement, formation dispensée à l'ISIGE et commune à l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris, l'École Nationale des Ponts et Chaussées et l'École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts. Le présent rapport correspond à la thèse professionnelle du mastère, rédigée à l'issue d'une mission réalisée au BRGM de mars à septembre 2002 sous la direction d'Isabelle Czernichowski, chef de projet séquestration du CO₂ au BRGM, et d'André Levassor, hydrogéologue à l'École des Mines de Paris et auteur d'un rapport sur la séquestration du CO₂.

Devant la menace d'un bouleversement climatique de grande ampleur, une réduction drastique et rapide des émissions anthropiques de CO₂ dans l'atmosphère apparaît aujourd'hui incontournable. Dans ce contexte, la récupération de ce gaz à effet de serre au niveau des principales sources d'émission industrielles, puis son stockage à long terme fait l'objet d'un intérêt croissant au niveau international. Impliqué dans plus d'une dizaine de projets nationaux, européens ou internationaux, le BRGM, dont les premiers travaux remontent à 1993, est aujourd'hui l'un des acteurs les plus actifs de la recherche française et européenne dans le domaine de la séquestration géologique du CO₂.

Toutefois, outre cette option qui ne peut s'appliquer qu'aux sources concentrées de CO₂, il existe un panel diversifié d'actions possibles pour réduire nos émissions de gaz à effet de serre : la lutte contre le réchauffement climatique est loin de concerner la seule sphère scientifique. Directement confronté à des questions aussi sensibles que la production et la consommation d'énergie et l'utilisation des terres à l'échelle mondiale, les enjeux de ce dossier sont tout à fois économiques, technologiques, politiques et sociaux. Si l'approche de cette problématique nécessite l'intégration de ces différents aspects, il est, dans le même temps, de plus en plus difficile d'embrasser l'ensemble des éléments sans se perdre dans un dédale d'informations très vite obsolètes.

L'objectif de cette étude était donc d'offrir une vision globale du dossier, de ses éléments et acteurs clefs à travers la compilation et la synthèse d'une très importante bibliographie. Plus précisément, il s'agissait de faire le point sur le panel complet des options de séquestration du carbone tout en permettant de comprendre la place et les enjeux de ces actions dans leur contexte politique, économique et sociologique.

Le rapport est divisé en deux grandes parties : la première présente les éléments contextuels du changement climatique et la deuxième s'intéresse plus précisément à l'ensemble des moyens d'actions pouvant être mis en œuvre pour endiguer ce phénomène.

PREMIÈRE PARTIE : ÉTAT DES LIEUX - RÉCHAUFFEMENT PLANÉTAIRE ET GAZ À EFFET DE SERRE : DU CYCLE NATUREL DU CARBONE AUX ÉMISSIONS ANTHROPIQUES DE CO₂

La relation de causalité entre émissions anthropiques de gaz à effet de serre et réchauffement climatique est un fait maintenant acquis par la très grande majorité des experts. Diminution de l'extension de la couche neigeuse de 10 % depuis la fin des années 60, élévation du niveau des mers de 10 à 20 cm depuis 1950 ou augmentation des précipitations de 0,5 à 1 % par décennie pendant tout le XX^e siècle dans les hautes et moyennes latitudes de l'hémisphère Nord sont quelques uns des effets d'ores et déjà perceptibles de ce réchauffement. Principalement incriminées, les émissions anthropiques de CO₂ n'ont cessé de croître depuis le début de l'ère industrielle. Alors que le CO₂ atmosphérique présentait jusqu'alors une remarquable stabilité, il a depuis enregistré une augmentation de 31 %, atteignant 365 ppmv aujourd'hui, une valeur jamais atteinte au cours des derniers 400 000 ans.

Les émissions anthropiques de CO₂ sont liées à deux composantes essentielles de nos modes de développement : de profonds et rapides changements dans l'affectation des terres avec une colonisation de plus en plus importante d'espaces naturels et une domination écrasante des combustibles fossiles dans notre approvisionnement énergétique. Chauffage, transports, industries aux besoins énergétiques importants mais surtout production d'électricité génèrent des quantités très importantes de CO₂.

Toutes cumulées, les quantités émises depuis 1850 sont ainsi telles que le réchauffement observé serait plus marqué encore si les réservoirs de carbone que constituent l'océan et la biomasse continentale ne jouaient un rôle régulateur en absorbant plus de la moitié de nos émissions. Si cet effet se traduit déjà par une acidification des couches superficielles de l'océan qui n'est pas sans conséquence pour les écosystèmes marins, qu'en sera-t-il demain ? Bien que les interactions existant entre le climat, la biosphère, les cycles biogéochimiques et l'utilisation des sols constituent aujourd'hui une source majeure d'incertitude pour la simulation des climats des prochains siècles, l'hypothèse selon laquelle l'amplitude des perturbations serait de nature à annihiler, voire inverser les processus naturels d'absorption du CO₂ atmosphérique, est à considérer sérieusement. On pourrait alors s'attendre à un emballement du système avec des bouleversements climatiques de très grande ampleur. La lutte contre l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, et plus particulièrement du CO₂, se trouve donc au cœur des grands défis mondiaux de ce siècle.

Ce n'est pourtant que près d'un siècle après la mise en garde d'Arrhénius devant l'Académie des Sciences de Suède que la reconnaissance du phénomène de l'effet de serre rejoint la sphère politique sur la scène internationale. Elle s'inscrit dans une prise de conscience générale des problèmes environnementaux à l'échelle planétaire.

Le tout premier signe de cette prise de conscience est la création du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) qui fit suite à la conférence de Stockholm de 1972. Pendant les décennies qui suivent, un intérêt croissant est porté à la question climatique comme en témoigne la création, en 1988, du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC ou IPCC en anglais), par le PNUE et l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Le GIEC établit périodiquement des rapports d'évaluation globaux sur l'état de la compréhension des causes de l'évolution

du climat, ses incidences potentielles et les options stratégiques éventuelles à mettre en œuvre pour y faire face. Il a publié un premier rapport en 1990, un deuxième en 1995, puis un troisième, très alarmiste, en 2001.

Vingt ans après Stockholm, le Sommet de la Terre donne lieu à la signature par 166 pays de la « Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques » (CCNUCC) qui pose un jalon historique en instituant le CO₂ comme substance cible dans la lutte contre l'effet de serre, alors qu'il n'était pas jusque là considéré comme un polluant. En 1997, à l'issue de la conférence de Kyoto où les Parties à la Convention se réunissent pour la troisième fois (COP3), prend forme un accord qui donnera lieu au Protocole de Kyoto. Ce dernier entérine un engagement des Parties consistant en la réduction de leur émissions de gaz à effet de serre sur la période 2008-2012. À l'échéance de 2012, les émissions devront globalement avoir baissé de 5,2 % par rapport à la valeur choisie en référence de 1990. L'Union européenne s'est engagée à une réduction globale de 8 % et a procédé, en 1998, à la répartition de cet objectif entre les quinze états membres. Pour ce qui est de la France, elle devra, en 2012, avoir ainsi stabilisé ses émissions à la hauteur de celles de 1990.

Pour atteindre les objectifs fixés de réduction de leur émissions de gaz à effet de serre, les pays signataires du protocole devront mettre en œuvre des politiques nationales adaptées (actions menées « à domicile » dans chacun des pays, encore appelées « actions domestiques »). En complément de ces mesures, le protocole de Kyoto prévoit la possibilité de recourir à des mécanismes de flexibilité dont l'objectif est de réduire le coût marginal d'abattement des réductions des émissions, en délocalisant les efforts là où ils sont les moins coûteux : l'échange international de permis d'émission, l'activité conjointe et le mécanisme de développement propre (MDP).

L'objectif ultime de la Convention climat et de tous les instruments juridiques que la Conférence des Parties peut adopter, comme le protocole de Kyoto, est de parvenir à la stabilisation des concentrations des gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêcherait toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Cet objectif passe nécessairement par la limitation des émissions des sources et l'augmentation de la capacité d'absorption des puits, qui ne peuvent être mis en évidence que par l'élaboration d'un inventaire fiable et complet.

Malgré les nombreux outils développés par le GIEC et la CCNUCC pour aider les pays à s'acquitter de cette tâche, beaucoup de pays développés ne rapportent pas des inventaires nationaux complets selon les normes établies et un certain nombre de pays à économies en transition n'ont tout bonnement pas soumis d'inventaires annuel. Il n'est donc pas envisageable, à l'heure actuelle, de procéder à un simple cumul des données d'émission de chaque pays pour déterminer les émissions globales de CO₂ au niveau planétaire. On peut en revanche se baser sur des statistiques rendant compte d'une part des changements d'affectation des terres et d'autre part de l'utilisation des combustibles fossiles. Ce moyen d'évaluation permet d'accéder, avec certes moins de précision dans les données, non seulement aux émissions de CO₂ des différentes régions du monde pour les périodes récentes mais également pour des périodes plus anciennes ce qui est riche d'enseignement en terme d'évolutions temporelles.

Pour ce qui concerne maintenant les décennies à venir, la profusion de scénarios utilisables dans le contexte du changement climatique fait qu'il est parfois difficile

d'avoir une vision claire à ce sujet. Leur objectif est d'appréhender de quelle façon et dans quelle mesure le développement socio-économique mondial est susceptible d'influer sur les émissions futures. Ils servent également de base aux experts chargés d'analyser l'évolution du climat et notamment sa modélisation. Au-delà, les scénarios d'émission aident à évaluer les impacts potentiels et permettent ainsi de définir les moyens de les atténuer ou de s'y adapter. Les scénarios d'émission de CO₂ pour les décennies prochaines, même pour les plus optimistes d'entre eux, sont très préoccupants. Les experts prévoient en effet une augmentation des températures qui se situerait entre 1,4 et 5,8 °C à l'horizon 2100. Les profonds bouleversements climatiques qui suivraient toucheraient l'ensemble de la planète avec les désastreuses conséquences sanitaires et sociales que l'on peut subodorer.

Renverser la tendance en diminuant nos émissions, ou au moins leur progression, ne sera pas une tâche aisée. Sur ce point, le protocole de Kyoto a le mérite de fixer des objectifs contraignants qui, s'ils sont modestes d'un point de vue environnemental et encore insuffisants, doivent permettre d'impulser des changements dans nos façons de produire et de consommer.

DEUXIÈME PARTIE : MOYENS D' ACTIONS - LE NOUVEAU MANAGEMENT DU CARBONE

La lutte contre le changement climatique impose en premier lieu « d'agir à la source » pour contrôler les émissions de CO₂ et freiner leur prolifération. Une meilleure gestion des terres et de profonds changements dans l'approvisionnement énergétique mondial sont les deux axes prioritaires, avec, en point de mire, les énergies fossiles, aujourd'hui largement dominantes et grandes émettrices de CO₂. L'action passe notamment par la maîtrise de la demande énergétique et par le recours à des énergies ou des technologies à moindre impact en terme d'émission.

C'est vers le milieu des années 90 que des politiques spécifiques de lutte contre le changement climatique vont commencer à se mettre en place. La définition et le mode de mise en œuvre de mesures selon un plan propre à chaque pays fait en effet parti des engagements pris vis-à-vis de la Convention climat par l'ensemble des parties signataires. Spécialement conçus pour répondre au problème du changement climatique, ces plans utilisent des instruments déjà expérimentés dans le contexte plus large des politiques de lutte contre la pollution.

Malgré la place importante du nucléaire et, dans une moindre mesure, de l'hydraulique, qui place la France en bonne position parmi les pays membres de la Communauté en terme d'émission de CO₂, le respect des engagements de Kyoto nécessite des efforts supplémentaires. Le dernier programme national de prévention du changement de climat (PNLCC) comporte diverses mesures de nature économique visant à inciter les utilisateurs de combustibles fossiles, notamment les industriels, à prendre en compte l'impact de cette utilisation sur la quantité de gaz à effet de serre émise ainsi que des actions structurelles sur l'offre, notamment dans les domaines sensibles du bâtiment-tertiaire, de la production d'énergie et du transport.

L'équivalent européen est le programme sur le changement climatique (PECC) établi en mars 2000 qui prévoit globalement quatre types de mesures : mesures horizontales, mesures relatives à l'énergie, mesures relatives au transport et mesures concernant

l'industrie. En marge de ces mesures mais faisant également parti du PECC, un système d'échange des droits d'émission de gaz à effet de serre interne à l'Union européenne est en cours d'étude. Une proposition de mise en œuvre d'un cadre législatif pour ce plan d'échange des droits d'émission est d'ores et déjà prévue (directive européenne pour l'échange de droits d'émission de gaz à effet de serre). Ce mécanisme d'échange, qui devrait entrer en vigueur en 2005, préfigure le mécanisme global qui se mettra en place pour la période d'engagement 2008-2012 dans le cadre du Protocole de Kyoto.

À noter également que le développement des énergies renouvelables est l'un des piliers de la politique de l'Union en terme de lutte contre le changement climatique. La directive européenne de 2001 relative à la promotion de l'électricité produite à partir de sources d'énergies renouvelables sur le marché intérieur de l'électricité qui prévoit d'accroître la part des énergies renouvelable de 6 % actuellement à 12 % dans la consommation d'énergie en Europe est l'un des instruments phares de cette politique.

Si les mesures préventives sur l'énergie constituent une première étape indispensable pour nos pays, elles ne pourront, à elles seules résoudre le problème climatique. En effet, la demande en énergie primaire des pays en développement devrait être multipliée par un facteur 3 à 5 d'ici 2050. Or, les combustibles fossiles, qui sont les plus accessibles des sources d'énergie disponibles, dominent aujourd'hui très largement le paysage énergétique (85 % des besoins commerciaux en énergie au niveau mondial sont délivrés par les combustibles fossiles).

Quelle que soit l'opinion que l'on puisse avoir à ce sujet, il apparaît donc peu réaliste de croire à un recul des énergies fossiles à court terme qui serait suffisamment important pour ramener le CO₂ atmosphérique à des teneurs sans incidence sur le climat.

Pour les grandes unités centralisées de production d'énergie à partir de combustibles fossiles, des solutions permettant de réduire, voire de s'affranchir de leur impact négatif en terme d'émission de CO₂, commencent à faire leur chemin.

Ainsi, les technologies telles que le « fuel switching » ou les « clean coal technologies » conduisent déjà à une réduction de l'intensité carbone du combustible ou de la chaîne de production énergétique. D'autre part, l'émergence d'un nouveau concept dit de « décarbonisation » des combustibles fossiles fait l'objet d'une attention croissante. Trois principales voies sont exploitables dans la mise en œuvre de ce concept :

- récupérer, à la cheminée, le flux gazeux puis isoler le CO₂ : opération dite de « capture post-combustion » ou encore « downstream decarbonisation ».

Les mesures sont curatives en ce sens que l'on essaie de capturer le maximum de CO₂ dans les effluents gazeux une fois qu'il a été formé dans le processus de combustion. Il existe, à l'heure actuelle, plusieurs techniques à degrés divers de maturité. En effet, certaines sont actuellement disponibles sur le marché alors que d'autres demandent encore des développements. La séparation du dioxyde de carbone peut être réalisée par absorption en présence de solvants aminés (méthode la plus fréquemment utilisée), par adsorption sur charbon activé ou d'autres matériaux, par passage du flux gazeux à travers des membranes spéciales ou par séparation à basse température. Toutefois, ces procédés sont coûteux et de nombreux problèmes techniques demandent encore à être résolus ;

- retirer le carbone en amont, avant la combustion pour prévenir la formation d'effluent contenant du CO₂ : c'est la « capture pré-combustion » ou « upstream decarbonisation ».
Cette option est préventive dans le sens où l'on empêche le CO₂ de se former lors de la combustion. Une des voies actuellement étudiées pour mettre en œuvre ce principe est l'utilisation, après adaptation, d'une installation de gazéification intégrée du charbon à cycle combiné (IGCC) ;
- modifier les procédés et notamment la nature du comburant pour obtenir, en sortie, un flux concentré de CO₂ : c'est le principe des cycles O₂/CO₂.
Le problème principal de la récupération « downstream » tenant dans les faibles teneurs en CO₂ des effluents gazeux des centrales, l'idée est de les augmenter en réalisant la combustion de l'hydrocarbure avec de l'O₂ pur et en utilisant le CO₂ comme fluide de travail (au lieu de l'azote de l'air). Cette dernière technique fait actuellement l'objet de nombreux travaux de R&D.

Pour le moment, la capture du CO₂ pourrait donc d'ores et déjà s'appliquer aux centrales de production d'énergie (charbon et gaz principalement) qui représentent à elles seules près d'un tiers des émissions mondiales de CO₂ anthropique. Cependant, elle pourrait également être avantageusement mise en œuvre dans d'autres types d'installations industrielles. Dans la production d'azote ou le traitement du gaz naturel par exemple, les procédés impliqués nécessitent déjà une séparation du CO₂. La plupart de ce CO₂ est, pour le moment, renvoyé dans l'atmosphère et pourrait donc être facilement récupéré. Cependant, le problème reste entier s'il n'existe pas de moyen d'empêcher, par la suite, le retour à l'atmosphère du CO₂ extrait.

Dans le cadre de la lutte contre l'augmentation de l'effet de serre, séquestrer, piéger, fixer ou encore stocker du CO₂, c'est faire en sorte de l'isoler durablement de l'atmosphère afin qu'il ne concourt pas à perturber l'équilibre thermique de la Terre. Le terme de séquestration recouvre en réalité des domaines très variés et il est nécessaire d'opérer une distinction entre les différents types de sources d'émissions.

Les sources importantes et concentrées ne peuvent pas être traitées comme les petites sources diffuses de gaz carbonique. Seules les premières se prêtent à une capture du CO₂ avant sa diffusion dans l'atmosphère. Une fois le flux gazeux récupéré et éventuellement traité, il est possible d'injecter le CO₂ dans un milieu où il sera durablement retenu. Dans le sens où l'étape de capture fait intervenir la main de l'homme, ce mode de séquestration peut être qualifié d'industriel. Il n'est envisageable que lorsque la quantité d'effluent, d'une part, et sa teneur en CO₂, d'autre part, sont suffisamment importantes.

En revanche, il reste encore aujourd'hui techniquement impossible d'empêcher la diffusion dans l'atmosphère du CO₂ des multiples points d'émissions de taille réduite que sont les sources diffuses. Le chauffage des habitations ou les gaz d'émission des véhicules sont deux exemples, parmi les plus significatifs, de ce type de sources. En valeur cumulée, ces sources représentent cependant des quantités de CO₂ considérables. Puisqu'il n'existe pas de moyens pour empêcher qu'elles contribuent à augmenter le stock de CO₂ atmosphérique, on peut au moins limiter leur temps de résidence dans l'atmosphère. Pour cela, il faut agir sur les flux de carbone échangés en « dopant » les réservoirs autres qu'atmosphériques, c'est-à-dire en augmentant leur capacité de stockage. La séquestration consiste alors à piéger du carbone dans la matière organique terrestre (biomasse et sols) et océanique.

Dans le premier cas, le CO₂ est capturé, transporté et physiquement stocké dans un système clos (option que nous avons désignée sous le terme de séquestration industrielle). Alors que, dans le deuxième, l'intervention est indirecte : on agit sur le réservoir de carbone organique en s'appuyant sur le processus naturel de fixation du carbone qu'est la photosynthèse.

Séquestration industrielle

Il existe de nombreuses voies possibles pour séquestrer un flux concentré de CO₂ (séquestration industrielle). Les deux milieux de confinement possibles sont le sous-sol, qui correspond à l'option géologique, et l'océan par voie d'injection dans les eaux profondes.

Le stockage par injection dans l'océan profond qui consiste à accélérer un processus naturel est une option intellectuellement satisfaisante. Cependant, en raison de ses impacts potentiels sur les écosystèmes marins, cette option rencontre un écho très défavorable de la part du public qui rend peu probable son développement futur comme stratégie de lutte contre le changement climatique.

En revanche, la multiplication des projets pilotes avec de premiers résultats encourageants font de l'alternative géologique une solution très prometteuse pour l'avenir. Elle tient en trois options : les réservoirs d'hydrocarbures (gaz et pétrole) qui ne sont plus productifs ou en phase de déclin ; les veines de charbon non exploitables et les aquifères profonds. Dans les deux premières, l'injection de CO₂ se solde par la récupération d'un produit valorisable commercialement ce qui permet de compenser tout ou partie des coûts de capture et séquestration. Ainsi, la séquestration de CO₂ dans les réservoirs de pétrole dans le déclin n'est que l'adaptation d'un procédé déjà largement expérimenté dans l'industrie pétrolière appelé couramment EOR (Enhanced Oil Recovery) qui permet d'améliorer la productivité des champs de pétrole. De la même manière, la séquestration dans les veines de charbon est l'une des méthodes, dites de récupération ECBM (Enhanced Coal Bed Methane), permettant d'exploiter le gaz naturel qui se trouve piégé dans ces structures.

En marge des méthodes de séquestration par injection dans le sous-sol ou l'océan pour lesquels, même si de nombreuses incertitudes demeurent, de grandes avancées ont d'ores et déjà été réalisées, il existe d'autres concepts, encore embryonnaires, qui pourraient être amenés à se développer à moyen terme. Un intérêt croissant est notamment porté aux processus chimiques et biogéochimiques dans la conversion du CO₂ en produits stables et/ou valorisables (eg. carbonates, méthane).

Le principal frein au développement de ces mesures reste aujourd'hui les coûts impliqués qui sont élevés même lorsqu'il existe une valeur ajoutée à l'opération de séquestration. D'autre part, de nombreux problèmes doivent encore être résolus avant de pouvoir affirmer que cette stratégie peut être généralisée et devenir un instrument efficace de lutte contre le changement climatique. Le premier saut d'échelle à réaliser réside dans le facteur temporel. Les visions à court-terme (10 à 30 ans) des opérations de production pétrolière doivent être étendues aux centaines ou milliers d'années nécessaires à la séquestration. Le second saut d'échelle concerne les volumes de CO₂ à stocker qui sont sans aucune mesure avec les volumes traités à l'heure actuelle. Pour convenir de l'efficacité, sur le long terme, de ces méthodes de séquestration et de

leur innocuité, on doit acquérir une meilleure compréhension des processus physiques et chimiques siégeant dans les réservoirs. Il sera également nécessaire de développer des technologies de surveillance et de contrôle du devenir du CO₂ après injection (migrations et fuites éventuelles).

Bien qu'il existe de fortes incertitudes quant aux capacités exactes de stockage des principales options de séquestration industrielle, il demeure un point essentiel : les potentiels s'avèrent très importants et pourraient couvrir largement les objectifs visés dans la lutte contre le réchauffement climatique.

Séquestration dans la biomasse

Bien que des recherches soient menées pour évaluer les possibilités d'augmenter la capacité de fixation du carbone par la biosphère océanique, les plus gros efforts se concentrent sur la biosphère terrestre avec, prioritairement, les peuplements forestiers et, de façon plus marginale, les actions spécifiques sur les sols.

Les écosystèmes terrestres ayant la spécificité de constituer à la fois un réservoir de carbone, une source de CO₂ (notamment par les pressions qui leur sont appliquées comme la déforestation) et un puits puisque qu'ils sont susceptibles d'absorber une partie du carbone d'origine anthropique, les activités envisageables sur les écosystèmes pour contribuer à stabiliser la concentration atmosphérique en CO₂ sont d'ordres multiples. Si l'importance des activités de conservation (réduire le taux de libération du carbone déjà fixé dans les puits existants) et de substitution (en remplacement des énergies fossiles) est considérable en terme de CO₂ évité, seules les activités de fixation (renforcement de puits de carbone) peuvent être qualifiées de « séquestration » à proprement parlé. Les potentiels de CO₂ fixé par cette seule activité sont cependant limités et correspondent à moins d'une dizaine d'années d'émissions anthropiques de CO₂.

Recourir à la foresterie pour atténuer les changements climatiques a été pour la première fois proposé au cours des années 70. Cependant, il a fallu attendre la fin des années 90 pour que des négociations internationales examinent cette possibilité à l'échelle de la planète, demandent que soit défini et évalué le rôle des forêts et proposent un mécanisme pour la collaboration internationale. Le protocole de Kyoto valide en effet la prise en compte des activités de fixation de carbone dans les écosystèmes terrestres comme un moyen éligible de lutte contre le changement climatique et les Conférences des Parties de Bonn et de Marrakech permettent d'apporter d'importantes précisions sur les instruments pouvant être mis en place dans le secteur du changement d'utilisation des terres. Les possibilités des différents groupes de pays sont mieux définis. Les points essentiels concernent d'une part, les activités domestiques et d'autre part, le Mécanisme de Développement Propre (MDP), instrument central dans les actions de fixation du carbone des écosystèmes terrestres.

Les négociations internationales sur le changement climatique relatives aux forêts sont cependant loin d'être terminées et évoluent rapidement. La durabilité et l'évaluation de l'impact des projets forestiers suscitent encore de nombreuses questions.

Bilan et perspectives

Il est aujourd'hui possible de dresser un premier bilan des actions réalisées (politiques domestiques en France et en Europe, mécanismes de projets, pilotes de séquestration industrielle) et des résultats obtenus en terme de réduction des émissions de CO₂. Ce bilan est l'occasion de confronter en termes de « CO₂ évité » et de « CO₂ séquestré » ce qui est effectif à ce jour et ce qui reste encore du domaine de la projection. D'autre part, la revue des actions réalisées dans le cadre de projets (précurseurs du MDP) permet de mettre en exergue un problème récurrent dans ce dossier : l'évaluation et le contrôle des émissions. Si les outils développés par le GIEC et la CCNUCC ont déjà permis des progrès notables dans la réalisation des inventaires nationaux, l'évaluation des émissions et la définition des procédures de contrôle au niveau des projets ou des entreprises est un domaine qui, en revanche, accuse encore d'importantes lacunes. Cette question fait actuellement l'objet de nombreux travaux, et, parmi les moyens pouvant être mis en œuvre, l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) et des variantes de cet outil de management environnemental connaissent aujourd'hui un fort développement.

Certains redoutent que le recours à la séquestration, que ce soit dans le domaine de la foresterie ou du stockage de CO₂ dans le sous sol, comme moyen d'atteindre les objectifs de réduction des émissions ne s'effectue au détriment des mesures préventives visant à réduire les émissions à la source. Pourtant, il est clair aujourd'hui que ce n'est qu'en associant prévention et traitement ou, en d'autres termes, en cumulant « CO₂ évité » et « CO₂ séquestré » que l'on pourra espérer atteindre une stabilisation des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère et écarter ainsi le risque d'un bouleversement climatique de grande ampleur.

Sommaire

Introduction - Cadre et objectifs du rapport	23
Première partie - État des lieux Réchauffement planétaire et gaz à effet de serre : du cycle naturel du carbone aux émissions anthropiques de CO₂	27
1. Aspects scientifiques	29
1.1. Chronique d'un dérèglement annoncé.....	29
1.1.1. Le siècle le plus chaud du millénaire	29
1.1.2. Des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre qui ne cessent d'augmenter.....	32
1.1.3. Une relation de causalité entre réchauffement et émissions de gaz à effet de serre bien établie.....	35
1.2. Cycle naturel du carbone : de l'atome à la planète.....	37
1.3. Les Émissions anthropiques de CO ₂ et leurs Impacts sur le cycle naturel du carbone.....	42
1.3.1. L'homme énergivore	42
1.3.2. Des systèmes naturels qui, jusqu'à présent, s'adaptent.....	44
1.3.3. Des systèmes naturels qui s'adaptent... mais qui subissent des perturbations	47
1.3.4. Des systèmes naturels qui s'adaptent... jusqu'à quand ?	49
1.4. Conclusion	51
2. Aspects économiques et politiques	53
2.1. Les accords internationaux dans la lutte contre le réchauffement climatique	53
2.1.1. Une prise de conscience à partir des années 1970	53
2.1.2. Une reconnaissance internationale au Sommet de la Terre	54
2.1.3. Une affirmation des engagements : le Protocole de Kyoto	54
2.1.4. Et demain... ..	58
2.2. Caractérisation des émissions anthropiques : évaluations et inventaires.....	60
2.2.1. Les inventaires nationaux d'émission de gaz à effet de serre	61
2.2.2. Évaluation des émissions de CO ₂ à l'échelle mondiale	71
2.3. les scénarios d'émission : quel CO ₂ pour le XXI ^e siècle ?	74
2.3.1. Différents types de scénarios	74

2.3.2. Les scénarios énergétiques	75
2.3.3. Les nouveaux scénarios de référence du GIEC : les scénarios SRES (Special Report on Emission Scenarios).....	77
2.3.4. Les scénarios d'atténuation ou scénarios d'intervention.....	85
Deuxième partie - Moyens d'action Le nouveau management du carbone	87
1. Changer nos façons de produire et de consommer.....	89
1.1. Cibler les actions déterminantes.....	89
1.1.1. La gestion des terres.....	89
1.1.2. La problématique de l'énergie.....	93
1.2. Mettre en place des politiques adaptées	97
1.2.1. France	97
1.2.2. Dans l'Union européenne.....	100
1.2.3. Aux États-Unis	107
1.3. De nouveaux concepts énergétiques pour les combustibles fossiles.....	109
1.3.1. Les filières actuelles de production centralisée d'énergie.....	110
1.3.2. Technologies de contrôle des émissions de CO ₂	111
1.3.3. Enjeux et perspectives	118
2. Séquestrer le CO₂	121
2.1. Séquestration : définition et objectifs	121
2.2. Séquestration industrielle des sources concentrées	123
2.2.1. Cadre d'application de la séquestration industrielle.....	123
2.2.2. Séquestration dans le sous-sol	125
2.2.3. Séquestration par injection dans l'océan profond	149
2.2.4. De nouveaux concepts émergents.....	154
2.2.5. Séquestration industrielle : synthèse	161
2.3. Renforcer les capacités de piégeage des réservoirs organiques : séquestration dans la biomasse	166
2.3.1. Séquestration du carbone dans les écosystèmes terrestres	166
2.3.2. Stockage de carbone dans la biomasse marine	182
3. Bilan et perspectives : les phases opérationnelles du dossier « changement climatique »	187
3.1. Le paysage global de la lutte contre le changement climatique : rappel des domaines d'action et cadre politique	187

3.2. Approche transversale : bilan du carbone évité et/ou séquestré.....	189
3.2.1. Mécanismes de projets : les enseignements de la « phase pilote » de la MOC.....	190
3.2.2. Politiques nationales de lutte contre le changement climatique : premiers bilans et perspectives.....	193
3.3. Un problème récurrent : évaluer et contrôler.....	198
3.3.1. Un outil possible d'évaluation : l'Analyse de Cycle de Vie.....	198
3.3.2. L'ACV adaptée à la lutte contre le changement climatique : un outil plus performant.....	206
Conclusion	211
Bibliographie	219

Liste des figures

Fig. 1 - Évolution temporelle récente des températures : A) Évolution des températures durant le dernier millénaire dans l'hémisphère nord. b) Évolution de la température moyenne de l'air de 1856 à 1995	30
Fig. 2 - Variations des températures depuis l'ère secondaire et les différents âges glaciaires du quaternaire.....	31
Fig. 3 - Variations de la température et des concentrations en gaz carbonique et en méthane de l'air au site de Vostock (Antarctique) au cours des 400 000 dernières années	32
Fig. 4 - Variations de la composition atmosphérique en CO ₂ pour différentes échelles de temps : (a) mesures directes à Hawaï et au pôle Sud pour les 40 dernières années ; (b) reconstitution à partir de l'analyse de bulles d'air piégées dans la glace de l'Antarctique, les valeurs mesurées à Hawaï étant reportées pour comparaison	33
Fig. 5 - Pourcentage des substances impliquées dans le phénomène d'accroissement de l'effet de serre en 2000 pour la France.....	34
Fig. 6 - Résultats des modélisations de températures à la surface du globe.	36
Fig. 7 - Répartition des gisements connus d'hydrates de méthane dans le monde.....	39
Fig. 8 - Cycle global du carbone et principaux échanges entre les principaux compartiments du système terrestre	40
Fig. 9 - Modification annuelle nette de la superficie forestière par région, 1990-2000.....	43
Fig. 10 - Flux de CO ₂ cumulés entre 1850 et 1998 (en GtC).....	45
Fig. 11 - Flux de carbone annuels (en GtC) dans les différents compartiments pour la période 1989-1998	46
Fig. 12 - La circulation thermohaline.....	46
Fig. 13 - Évènements et dates clés du dossier changement climatique.....	55
Fig. 14 - Comparaison des émissions de CO ₂ (avec prise en compte des activités LULUCF) dans l'Union européenne, dans quelques pays de l'UE et aux États-Unis entre 1990 et 1999.....	66
Fig. 15 - Émissions sectorielles cumulées de CO ₂ (sans prise en compte des activités LULUCF) dans l'Union européenne entre 1990 et 1999	67
Fig. 16 - Variations annuelles des émissions de CO ₂ dans l'Union européenne depuis 1991	67
Fig. 17 - Évolutions sectorielles des émissions de CO ₂ (sans prise en compte des activités LULUCF) dans l'Union européenne entre 1990 et 1999	67

Fig. 18 - Émissions sectorielles cumulées de CO ₂ (sans prise en compte des activités LULUCF) aux États-Unis entre 1990 et 1999	68
Fig. 19 - Variations annuelles des émissions de CO ₂ (sans prise en compte des activités LULUCF) aux États-Unis depuis 1991	68
Fig. 20 - Évolutions sectorielles des émissions de CO ₂ (sans prise en compte des activités LULUCF) aux États-Unis entre 1990 et 1999	68
Fig. 21 - Émissions sectorielles cumulées de CO ₂ (sans prise en compte des activités LULUCF) en France entre 1990 et 1999	69
Fig. 22 - Variations annuelles des émissions de CO ₂ en France depuis 1991	69
Fig. 23 - Évolutions sectorielles des émissions de CO ₂ (sans prise en compte des activités LULUCF) en France entre 1990 et 1999	69
Fig. 24 - Émissions sectorielles cumulées de CO ₂ (avec prise en compte des activités LULUCF) en France entre 1960 et 2001	70
Fig. 25 - Émissions de carbone dérivant d'un changement d'utilisation des terres	71
Fig. 26 - Évolution de 1751 à 1998 des émissions de CO ₂ dérivant de l'utilisation des combustibles fossiles, de l'industrie cimentière et du flaring (brûlage de gaz en torche) pratiqué dans l'exploration et la production pétrolière	72
Fig. 27 - Comparaison des émissions de CO ₂ dérivant de l'utilisation des combustibles fossiles dans les différentes régions du monde pour 1973 et 1999	73
Fig. 28 - Les différents types de scénarios	75
Fig. 29 - Émissions mondiales annuelles totales de CO ₂ de toutes les sources (énergie, industrie et modification de l'utilisation des sols) entre 1990 et 2100, en gigatonnes de carbone (GtC/an) pour les quatre familles et les six groupes de scénarios	80
Fig. 30 - Profils d'émissions et concentrations de CO ₂ pour différents niveaux de stabilisation	83
Fig. 31 - Profils de stabilisation de concentration de CO ₂ , de température de l'air et de niveau marin après une réduction des émissions	84
Fig. 32 - Comparaison des scénarios de référence et de stabilisation	86
Fig. 33 - Émissions de CO ₂ et demande énergétique : des systèmes largement chevauchant	93
Fig. 34 Diagramme de phase du CO ₂	114
Fig. 35 - Les sites potentiels de séquestration industrielle par injection dans le sous-sol : les réservoirs de gaz et pétrole en fin de production, les veines de charbon dont le charbon n'est pas exploitable et les aquifères profonds	125
Fig. 36 - Les procédés de récupération assistée de pétrole par injection de CO ₂ . (A) : procédé linéaire ; (B) : procédé en boucle avec recyclage du CO ₂	132
Fig. 37 - Schéma du procédé EOR avec recyclage du CO ₂	132

Fig. 38 - Estimation des volumes de CO ₂ injectés, recyclés et séquestrés pour la durée totale de l'opération EOR de Rangely, Colorado, USA .	135
Fig. 39 - Schéma des équipements du projet pilote de Weyburn	136
Fig. 40 - Les grandes phases du projet de récupération ECBM de l'Alberta Research Council	143
Fig. 41 - Les différentes phases du projet RECOPOL	144
Fig. 42 - Un concept intégrant centrale produisant de l'énergie à partir de combustibles fossiles, récupération ECBM et séquestration du CO ₂	145
Fig. 43 - Coupe schématique du site de Sleipner	146
Fig. 44 - Images de sismique réflexion de la formation Utsira réalisées en 1994 (b) avant que ne commence l'opération de séquestration et en 1999 (c) après que 2 millions de tonnes de CO ₂ aient été injectés dans la formation.	148
Fig. 45 - Les différents scénarios d'injection de CO ₂ dans l'océan	150
Fig. 46 - Récupération et séquestration du CO ₂ produit par une centrale par photosynthèse de microalgues	158
Fig. 47 - Récapitulation des options de séquestration industrielle.	162
Fig. 48 - Estimation comparative des quantités de CO ₂ séquestrables (en Gt de carbone) à l'échelle mondiale	162
Fig. 49 - Potentiel de séquestration en fonction des coûts	165
Fig. 50 - Principaux réservoirs et flux de carbone dans un écosystème forestier.	166
Fig. 51 - Relations entre phase pilote de « Mise en œuvre conjointe » et mécanismes de flexibilité de Kyoto.	171
Fig. 52 - Contribution potentielle à la séquestration totale de carbone par les activités de boisement/reboisement et d'agroforesterie, 1995-2050	179
Fig. 53 - Potentiel estimé des sources et des puits de carbone, pour différents modes d'utilisation des terres	180
Fig. 54 - Évolution du stock de carbone de sols de la zone céréalière du Middle West américain après passage au moindre labour	182
Fig. 55 - La « pompe biologique » des océans).	183
Fig. 56 - Synthèse des éléments structurels du dossier « changement climatique »	187
Fig. 57 - Les différents projets réalisés dans le cadre de la « phase pilote » de mise en œuvre conjointe	192
Fig. 58 - Projection des effets attendus en 2010 et 2020 des mesures existantes et supplémentaires du PNLCC pour le CO ₂ énergétique (A) et non énergétique (B).	194

Fig. 59 - Mesures de lutte contre le changement climatique et instruments politiques « domestiques »	204
Fig. 60 - Comparaison de l'impact « réchauffement global » pour deux types de centrales au charbon et au gaz naturel.	204
Fig. 61 - Émissions directes et indirectes d'une entreprise	208
Fig. 62 - Émissions de CO ₂ estimées par différents guides méthodologiques dans le cas : (A) d'un champ de production pétrolier (320 puits, 6 100 barils/jour) et (B) d'une raffinerie traitant 250 000 barils/jour.....	210

Liste des tableaux

Tabl. 1 - Réservoirs de carbone du système Terre (hors couches profondes).....	38
Tabl. 2 - Moyennes annuelles des flux de CO ₂ anthropiques pour la période 1989 à 1998	45
Tabl. 3 - Répartition des efforts à consentir pour les 15 États membres de l'Union européenne	56
Tabl. 4 - Comparaison des émissions de CO ₂ par habitant pour l'Union européenne, quelques pays de l'UE et les États-Unis en 1999	66
Tabl. 5 - Émissions de CO ₂ (en GtC) en 1990, 2020, 2050 et 2100 et émissions cumulées jusqu'en 2100.....	81
Tabl. 6 - Différentes activités qui peuvent être entreprises dans le cadre de la gestion des écosystèmes terrestres pour lutter contre le changement climatique.	92
Tabl. 7 - Projections pour 2050 de la consommation en énergie primaire (en Gtoe) selon les trois familles de scénarios A, B et C du Conseil Mondial de l'Énergie	94
Tabl. 8 - Parts des différentes sources d'énergies dans la consommation intérieure brute de l'Union Européenne et fourchettes des parts dans les différents États membres en 1998.....	101
Tabl. 9 - Exemples de mesures prises par les États membres de l'UE pour réduire les émissions de gaz à effet de serre	103
Tabl. 10 - Concentrations moyennes en CO ₂ du flux gazeux à la sortie des principaux types de centrales	111
Tabl. 11 - Implication des procédés de capture du CO ₂ sur les technologies charbon, IGCC et NGCC.....	117
Tabl. 12 - Émissions de CO ₂ annuelles en GtC pour les principales sources industrielles	123

Tabl. 13 - Comparaison de certains projets LULUCF	178
Tabl. 14 - Quantités de gaz à effet de serre évitées ou séquestrées dans les projets AIJ	191
Tabl. 15 - Comparaison des quantités de CO ₂ séquestré (opérations en cours ou déjà réalisées) et potentiels de séquestration en MtC.....	197

Liste des annexes

Ann. 1 - Variations climatiques et concentrations en CO ₂ de l'atmosphère depuis le début de l'ère primaire.	235
Ann. 2 - IEA GHG Implementing agreement.	241
Ann. 3 - Activités de recherche et développement dans le domaine de la capture et séquestration industrielle du CO ₂	245
Ann. 4 - Réduction des émissions de gaz à effet de serre : estimations des potentiels pour 2010 et 2020, coûts, barrières et opportunités.....	265

Introduction - Cadre et objectifs du rapport

Le réchauffement planétaire dont nous sommes témoins depuis le milieu du 19^e siècle s'est nettement confirmé durant la dernière décennie pour atteindre des valeurs exceptionnelles, sans égal au cours du dernier millénaire. Il fait aujourd'hui peu de doute que l'augmentation vertigineuse des concentrations des gaz à effet de serre dans l'atmosphère contribuent à amorcer un déséquilibre climatique planétaire. Principalement incriminées, les émissions de CO₂ d'origine anthropique n'ont cessé de croître depuis le début de l'ère industrielle. Le phénomène s'accélère et pourrait connaître un summum avec l'accession au développement, encore réservé à quelques pays privilégiés, de l'ensemble de la population mondiale. Si la relation de causalité entre le réchauffement observé et les activités humaines se confirme, les experts prévoient une augmentation des températures qui se situerait entre 1,4 et 5,8 °C à l'horizon 2100. Conséquence directe de ce réchauffement, la perturbation des cycles hydriques et de profonds changements climatiques touchant l'ensemble de la planète avec les répercussions sanitaires et sociales que l'on peut subodorer.

À l'origine du premier accord multilatéral sur l'environnement s'étant fixé des règles d'observance contraignantes, le problème du changement climatique est unique par son importance et sa complexité. Directement confronté à des questions aussi sensibles que la production et la consommation d'énergie et l'utilisation des terres à l'échelle mondiale, les enjeux de la lutte contre le changement climatique sont tout à la fois économiques, technologiques, politiques et sociaux. Sans oublier que, parce qu'elles touchent à des phénomènes irréversibles, non linéaires et difficiles à modéliser, les prises de décisions dans ce dossier s'inscrivent dans un contexte où le risque et l'incertitude sont prépondérants.

Le dossier du changement climatique fait aujourd'hui l'objet d'une production impressionnante d'écrits de tous ordres à la fois du fait de ses multiples approches possibles et parce qu'il est devenu un sujet d'actualité sur lequel nombreux sont ceux qui souhaitent s'exprimer. À tel point qu'il est de plus en plus difficile, voire impossible, d'embrasser l'ensemble des éléments de cette problématique sans se perdre dans un dédale d'informations très vite obsolètes.

Référence en la matière, le troisième rapport d'évaluation du Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) constitue certainement la synthèse la plus récente et la plus complète qui ait été réalisée sur cette question (GIEC, 2001). Fruit d'une très large collaboration d'experts internationaux, il fait le point sur l'état des connaissances scientifiques en matière de changement climatique, ses incidences potentielles et les options stratégiques éventuelles à mettre en œuvre pour y faire face. Bien qu'il ait donné lieu à des résumés techniques ou à de courtes synthèses à l'attention des décideurs, le rapport, qui compte plus de 3 000 pages, est difficilement accessible à tout un chacun. Beaucoup de notions, comme la connaissance basique des accords politiques internationaux, y sont considérées comme acquises. Par ailleurs, le rapport intègre certains éléments sans s'étendre davantage sur leur nature ou leur portée. Tel est le cas des mesures de séquestration du carbone, l'une des options parmi le panel d'actions pouvant être mises en œuvre dans la lutte contre le changement climatique. Pour ce qui concerne la séquestration biologique (« puits-forêts »), il existe un rapport spécial préparé par le GIEC en 2000

(utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie), rapport qui accuse d'ailleurs déjà certaines lacunes dans ce domaine évoluant très rapidement (GIEC, 2000a). Un document de même nature est en cours d'élaboration pour les options de séquestration industrielle - options qui visent à stocker, dans le sous-sol ou l'océan, un flux de CO₂ préalablement capturé - mais sa publication ne devrait pas intervenir avant le deuxième semestre 2004. En attendant, un public motivé trouvera bien sûr les sources d'information nécessaires (notamment parmi les rapports synthétiques de l'Agence Internationale de l'Énergie ou les nombreux articles de recherche), mais elles exigent une bonne connaissance de l'anglais et, souvent, des bases scientifiques solides.

Ainsi, il n'existe pas encore, à notre connaissance, de document en français, didactique et d'abord aisé, faisant le point sur le panel complet des options de séquestration du carbone tout en permettant de comprendre la place et les enjeux de ces actions dans le contexte plus général du dossier changement climatique. Comblar cette lacune en offrant une vision globale du dossier, de ses éléments et acteurs clés à travers la compilation et la synthèse d'une très importante bibliographie est l'objectif que nous avons poursuivi. Autant que possible, les éléments sont replacés dans leur contexte plus large afin que soit mieux comprise la nature des enjeux. Les processus scientifiques abordés sont repris à leurs bases et dans tous les cas, nous nous sommes efforcés d'illustrer nos propos par des exemples concrets.

Le rapport est divisé en deux grandes parties :

- la première partie présente les éléments contextuels du dossier. Nous faisons état des principales données scientifiques en écartant volontairement toute discussion sur la relation de causalité entre émissions anthropiques de gaz à effet de serre et réchauffement climatique, un fait maintenant acquis par la très grande majorité des experts. La description des éléments basiques du cycle du carbone permettent d'appréhender la nature des perturbations induites par les émissions de CO₂ anthropiques. Ces émissions sont ensuite abordées sous un angle géopolitique. La nature des négociations et accords politiques dont nous reprenons la chronologie montre l'importance de pouvoir disposer d'inventaires d'émissions fiables, en particulier au niveau national. Après la caractérisation des émissions passées et actuelles, nous abordons les projections réalisées pour le siècle à venir. La profusion de scénarios utilisables dans le contexte du changement climatique fait qu'il est parfois difficile d'avoir une vision claire à ce sujet. Notre but n'a pas été ici d'être exhaustif mais de donner quelques points de repères afin de mieux appréhender ces données fort utilisées mais souvent mal comprises ;
- la deuxième partie traite des moyens d'action dont nous disposons pour contrôler les émissions de CO₂ dans le cadre de la lutte contre le changement climatique. En premier lieu, vient l'impérieuse nécessité « d'agir à la source » pour contrôler les émissions de CO₂ et freiner leur prolifération. Une meilleure gestion des terres et de profonds changements dans l'approvisionnement énergétique mondial sont les deux axes prioritaires, avec, en point de mire, les énergies fossiles, aujourd'hui largement dominantes et grandes émettrices de CO₂. L'action passe par la maîtrise de la demande énergétique et par le recours à des énergies ou des technologies à moindre impact en terme d'émission. Un rapide aperçu des politiques engagées en France et en Europe permet d'illustrer comment ces mesures sont mises en œuvre dans la pratique. Elles ont cependant leurs limites et tout montre qu'en terme

d'approvisionnement énergétique les combustibles fossiles resteront incontournables dans les décennies prochaines. Des solutions permettant de s'affranchir de leur impact négatif sur le climat se dessinent aujourd'hui. Sans nous étendre sur des notions très techniques, nous présentons quelques uns des éléments qui montrent comment le concept dit de « décarbonisation » pourrait bientôt être mis en pratique dans les grandes unités centralisées de production d'énergie.

Le développement et la mise en œuvre de ces technologies restent cependant encore conditionnés par la possibilité de stocker le CO₂ durablement et à grande échelle. Après avoir présenté ce qu'est la séquestration du carbone et quel est son cadre d'application, nous dressons un état de l'art des différentes méthodes aujourd'hui développées. Il existe de nombreuses voies possibles pour séquestrer un flux concentré de CO₂ (séquestration industrielle). Dans chaque cas, nous tentons d'en présenter le contexte et les principes élémentaires sur lesquels elles reposent. Nous faisons état des principaux projets de recherche en cours ainsi que, lorsqu'il y a lieu, des sites pilotes. L'octroi d'importants moyens de R&D a déjà permis des progrès sensibles et ces méthodes de séquestration industrielle pourraient bientôt seconder l'option visant à stocker le carbone dans la biomasse, option déjà prise en compte dans les négociations internationales. Dans un chapitre consacré à ce mode de séquestration, nous faisons une large place aux processus politiques en insistant en particulier sur le cadre d'application du Mécanisme de Développement Propre (MDP). La portée des accords sera en effet déterminante dans le rôle futur donné aux mesures relatives à la gestion des terres dans la lutte contre le changement climatique.

Enfin, nous synthétisons les principaux éléments du dossier et faisons le lien entre les mesures de maîtrise du CO₂ atmosphérique et les instruments de politiques nationales et internationales (mécanismes de flexibilité). D'une vision verticale adoptée dans notre partie « séquestration » où les options sont étudiées une à une avec leurs potentiels propres, nous tentons donc davantage une approche transversale. Ce bilan est l'occasion de confronter en termes de « CO₂ évité » et de « CO₂ séquestré », ce qui est effectif à ce jour et ce qui reste encore du domaine de la projection. D'autre part, la revue des actions réalisées dans le cadre de projets (précurseurs du MDP) permet de mettre en exergue un problème récurrent dans ce dossier : l'évaluation et le contrôle des émissions. Cette question fait actuellement l'objet de nombreux travaux, et, parmi les moyens pouvant être mis en œuvre, l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) et des variantes de cet outil de management environnemental connaissent aujourd'hui un fort développement. Il était donc important que ce point soit abordé dans un rapport dont l'objectif est de présenter les éléments clés du dossier « changement climatique ».

Première partie - État des lieux

Réchauffement planétaire et gaz à effet de serre : du cycle naturel du carbone aux émissions anthropiques de CO₂

1. Aspects scientifiques

1.1. CHRONIQUE D'UN DÉRÈGLEMENT ANNONCÉ

Jusqu'à cette dernière décennie, le réchauffement planétaire et tout spécialement ses causes, anthropiques ou naturelles, est une question qui n'emportait pas un total consensus dans la communauté scientifique internationale. Elle a donc fait longtemps débat et couler beaucoup d'encre. En effet, jusque dans les années 80, les modèles étaient peu performants, accordant notamment des degrés d'importance très disparates aux différentes composantes du système climatique tel que l'atmosphère, l'océan ou la végétation.

Cependant, grâce à de grands programmes de recherche internationaux comme le Programme International Biosphère-Géosphère ou le Programme Mondial de Recherche sur le Climat, qui ont permis de mieux structurer les recherches, des progrès très importants ont pu être réalisés notamment dans les observations et mesures réalisées ou dans l'étude des climats passés. L'acquisition de nombreuses données ainsi que le développement spectaculaire des moyens informatiques, ont permis d'améliorer considérablement la performance des modèles climatiques.

La création, en 1988, du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) témoigne de l'intérêt croissant porté à la question climatique. En apportant des éléments d'évaluation de l'information scientifique dans ce système combien complexe que constitue le climat, cette instance scientifique a également contribué à clarifier le débat.

Le GIEC, instance de référence dans la lutte contre le changement climatique

Le « Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat » (GIEC) ou, en anglais, « Intergovernmental Panel on Climate Change » (IPCC) est une instance scientifique consistant en un secrétariat, un bureau et un réseau de 2500 scientifiques mandatés par l'Organisation des Nations Unies (ONU).

Il a pour mission de rassembler les données scientifiques pertinentes, d'en favoriser la production et la diffusion et d'en faire la synthèse critique. Il lui incombe également d'évaluer les incidences écologiques et socio-économiques des changements climatiques envisagés, de formuler et d'évaluer des stratégies possibles de prévention et d'adaptation. Il établit ainsi périodiquement des rapports d'évaluation globaux sur l'état de la compréhension des causes de l'évolution du climat, ses incidences potentielles et les options stratégiques éventuelles à mettre en œuvre pour y faire face. Le GIEC a publié un premier rapport en 1990, un deuxième en 1995, puis un troisième, très alarmiste, en février 2001.

1.1.1. Le siècle le plus chaud du millénaire

On ne dispose d'informations systématiques sur les températures mondiales que depuis 1860. Il s'agit de mesures de la température de l'air au sol et de la température à la surface des mers. Pour les périodes antérieures, ce sont des éléments de preuve indirects qui permettent de reconstituer l'évolution des températures passées : anneaux de croissance des arbres, coraux, calottes glaciaires ou sédiments des océans sont autant d'indices utilisés par les chercheurs. Ces derniers traduisent les quantités mesurables, telles que la composition chimique d'un échantillon de glace, en variables physiques, telles que la température.

L'évolution des températures ainsi reconstituée dans l'hémisphère nord pour le dernier millénaire montre que, après une légère baisse continue des températures entre le XI^e et le XIX^e siècle, le taux d'augmentation et la durée du réchauffement au XX^e siècle n'ont connu aucun précédent durant tout le millénaire (fig. 1.A).

Au cours du XX^e siècle, les températures moyennes au niveau du sol ont augmenté de $0,6 \pm 0,2$ °C (Jones P.D. *et al.*, 1999). Elles ont été marquées par deux périodes de croissance : une première phase de 1910 à 1945 puis une deuxième à partir de 1976 (fig. 1.B). La décennie 1990-1999 a été la plus chaude du millénaire, avec, en point d'orgue, l'année 1998 qui a enregistré les températures les plus élevées depuis qu'il existe des mesures instrumentales.

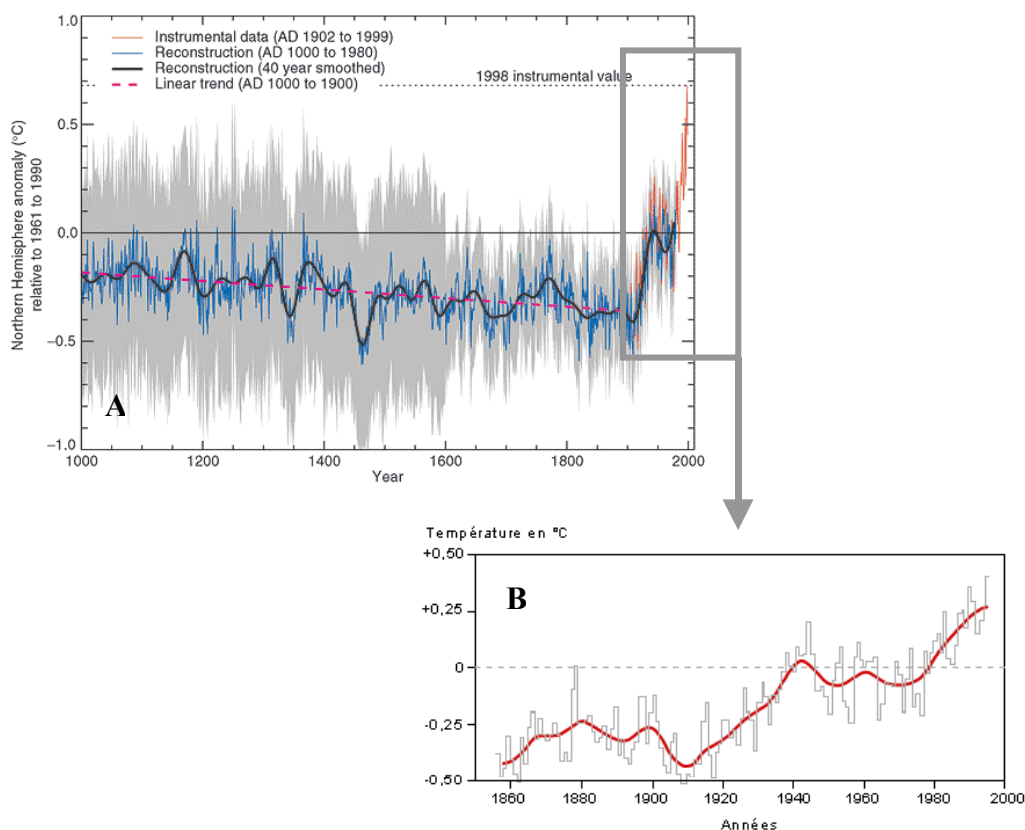


Fig. 1 - Évolution temporelle récente des températures.

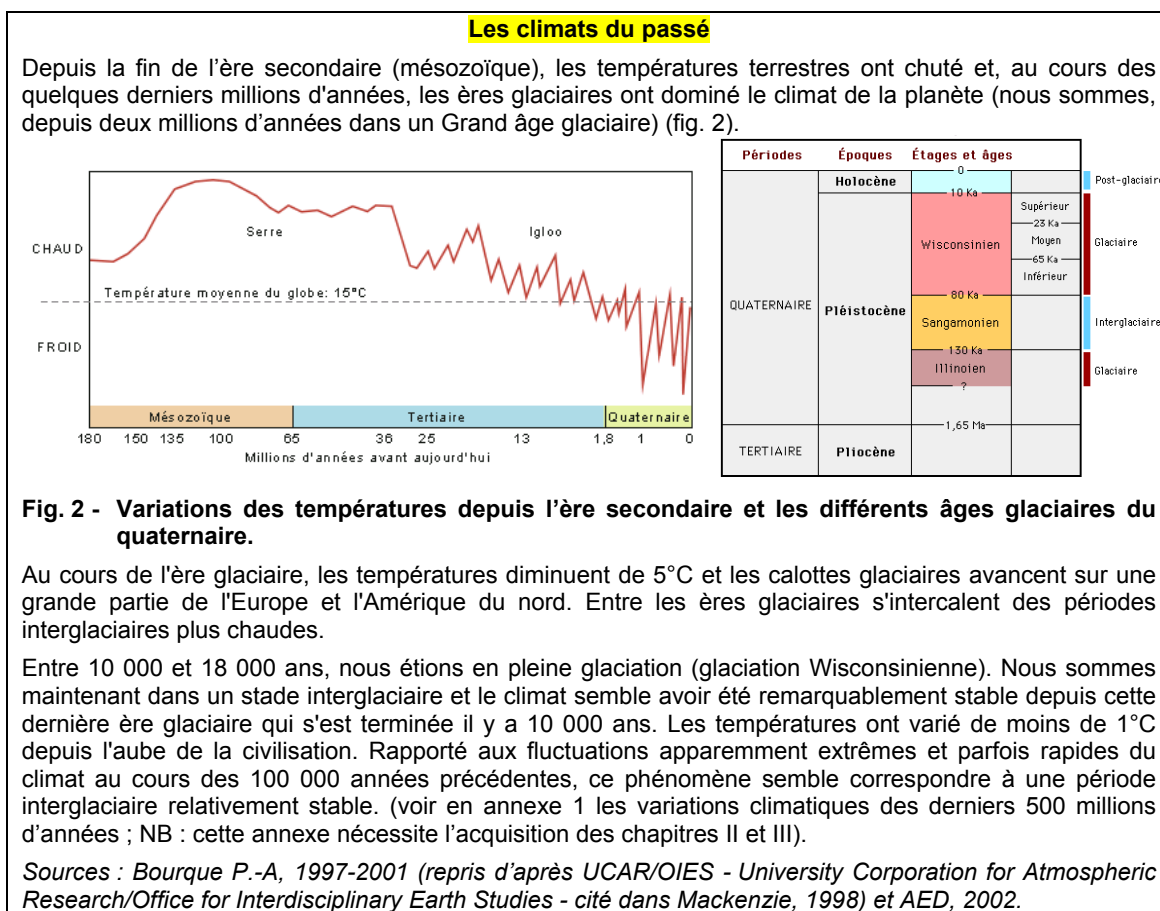
- A Évolution des températures durant le dernier millénaire dans l'hémisphère nord. En rouge : mesures instrumentales pour le dernier siècle ; en bleu : valeurs reconstituées à partir de mesures sur les végétaux, coraux ou carottes glaciaires ainsi que des documents historiques ; la zone grise exprime la marge d'erreur (GIEC, 2001).
- B Évolution de la température moyenne de l'air de 1856 à 1995. Les barres grises indiquent les écarts de températures moyennes annuelles par rapport à la moyenne des températures de la période 1961-1990 (ligne 0). La courbe rouge représente les valeurs moyennes annuelles filtrées (GIEC, 2001).

Tous les moyens d'observation aujourd'hui disponibles (stations du réseau météorologique mondial, données océanographiques, ballons sondes, photographies aériennes et données satellitaires) confirment le changement climatique des dernières décennies (GIEC, 2001 cité dans Duplessy J.C., 2001).

Diminution de l'extension de la couche neigeuse de 10 % depuis la fin des années 60 (Robinson D.A., 1999), élévation du niveau des mers de 10 à 20 cm depuis 1950 (Douglas B.C., 1997) ou augmentation des précipitations de 0,5 à 1 % par décennie pendant tout le XX^e siècle dans les hautes et moyennes latitudes de l'hémisphère Nord (Hulme M. *et al.*, 1998) sont quelques uns des effets d'ores et déjà observables de ce changement.

Avec un degré de fiabilité estimé à 90%, on estime qu'il se produit, chaque décennie depuis 1950, une augmentation des températures au niveau du sol de + 0,15 °C ± 0,05 (cette variation n'est cependant que de 0,05 °C ± 0,1 pour ce qui concerne les températures de l'air sur les 8 premiers kilomètres de l'atmosphère) (Duplessy J.C., 2001 ; Peterson T.C. *et al.*, 1999).

Pour le moment, on n'a pas constaté de changement particulier dans la fréquence des événements extrêmes tels que tornades, tempêtes tropicales, orages ou averses de grêles. Il faut également souligner que certaines régions du globe n'enregistrent aucun signe particulier perceptible de réchauffement. Mais on sait que l'hétérogénéité géographique est de règle en terme de climat : l'expérience acquise sur les climats passés montre par exemple que, même au cours d'une période générale de refroidissement, il demeure des zones ponctuellement plus chaudes (CLIMAP, 1981 cité dans Duplessy J.C., 2001).



1.1.2. Des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre qui ne cessent d'augmenter

Les variations du climat sont gouvernées par de nombreux processus. L'océan avec les changements de la circulation thermohaline et la distribution des courants, les glaces et la végétation sont autant de composantes du système climatique. Les lentes oscillations de l'axe de la terre et son orbite autour du soleil ont une incidence sur la quantité totale d'énergie que la planète reçoit du soleil et en particulier sur sa distribution géographique. La propre activité du soleil, en induisant des perturbations des flux d'énergie reçus par la Terre, joue un rôle déterminant.

Enfin, l'atmosphère est également un élément essentiel de ce système complexe. Elle est constituée essentiellement d'azote (78 %) et d'oxygène (21 %) et d'un grand nombre de gaz en beaucoup plus faible quantité comme la vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone ou gaz carbonique (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote ou oxyde nitreux (N₂O) ou l'ozone (O₃). Plus récemment sont apparus les gaz de la famille des CFC (chlorofluorocarbures, gaz de synthèse responsables de l'attaque de la couche d'ozone) dont l'origine est entièrement anthropique.

De par leur faculté d'absorber une partie du rayonnement infra-rouge produit par le sol terrestre qui est réchauffé par le soleil, certains de gaz présents dans l'atmosphère, bien que très minoritaires, jouent un rôle capital dans la régulation des températures à la surface du globe. En effet, sans eux, la température d'équilibre de la Terre serait d'environ -18 °C.

Les légères variations de l'énergie reçue du soleil à cause des oscillations précitées ne sont pas suffisantes pour expliquer l'ampleur des changements de température durant les ères glaciaires. Il semblerait donc que l'évolution des concentrations de gaz à effet de serre ait contribué, par le passé, à amplifier les cycles glaciaires. L'analyse de bulles d'air piégées dans la glace a ainsi montré des variations importantes de CO₂ et de CH₄ en corrélation très nette avec les variations de températures qui sont déduites de mesures isotopiques (isotopes stables de l'oxygène) (fig. 3).

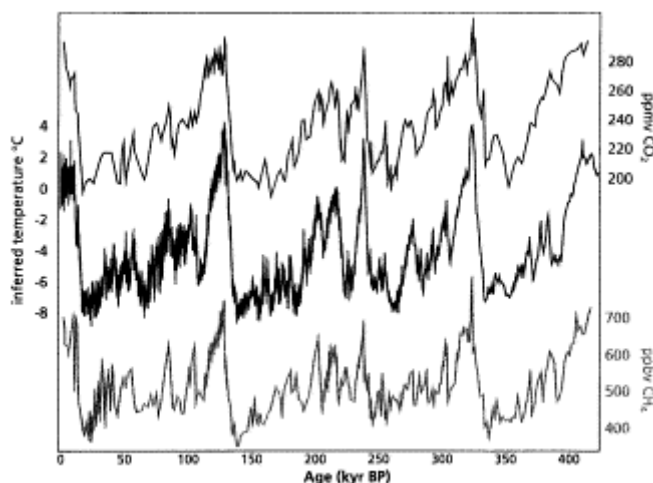


Fig. 3 - Variations de la température et des concentrations en gaz carbonique et en méthane de l'air au site de Vostock (Antarctique) au cours des 400 000 dernières années (Petit J.R. et al., 1999).

Mais aujourd'hui, les teneurs en CO₂ et en CH₄ dépassent largement celles observées au cours des 400 000 dernières années, lorsque les cycles biogéochimiques ne subissaient que des variations naturelles.

Dès 1896, le chercheur suédois Arrhénius avait prédit une augmentation de la teneur atmosphérique en CO₂, suite aux combustions du bois et des énergies fossiles. Mais il fallut attendre quelques décennies et l'installation d'un suivi permanent du CO₂ à Hawaii pour mettre en évidence ce phénomène (fig. 4a). Un peu plus tard, dans les années 1980, la mise au point de la mesure du CO₂ des bulles d'air de la glace ouvrit la voie à une reconstitution fine du dernier millénaire (fig. 4b).

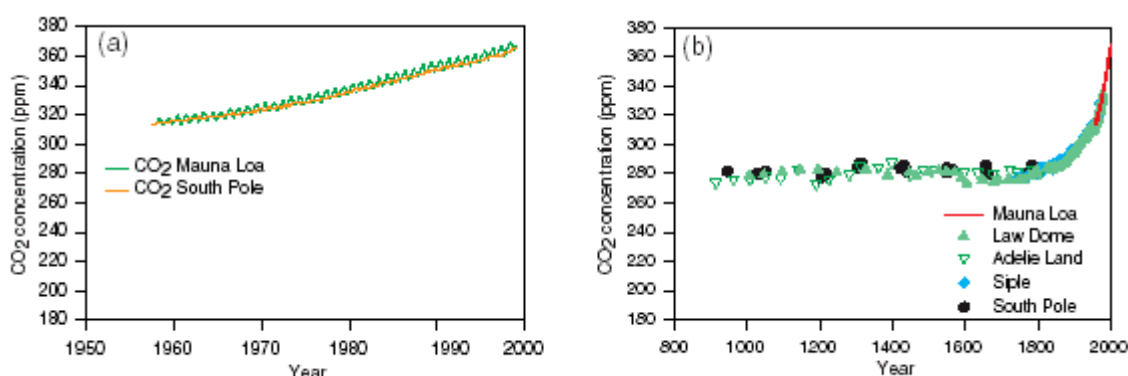


Fig. 4 - Variations de la composition atmosphérique en CO₂ pour différentes échelles de temps : (a) mesures directes à Hawaï et au pôle Sud pour les 40 dernières années ; (b) reconstitution à partir de l'analyse de bulles d'air piégées dans la glace de l'Antarctique, les valeurs mesurées à Hawaï étant reportées pour comparaison (en rouge) (GIEC, 2001).

Il apparaît ainsi qu'avant le XIX^e siècle, le CO₂ atmosphérique était stable à 3 % près, oscillant autour d'une teneur en volume de 0,028 %, soit 280 parties par million (ppmv) correspondant à une masse de 600 milliards de tonnes de carbone (GtC). Depuis le début de l'ère industrielle, un net accroissement du CO₂ atmosphérique est constaté : sa teneur a augmenté de 31 %, atteignant 365 ppmv aujourd'hui, soit une valeur jamais atteinte dans les derniers 400 000 ans. L'augmentation s'est accentuée ces deux dernières décennies avec une croissance moyenne annuelle de 0,4 %, soit 1,5 ppm (variations de 0,9 à 2,8 ppm). À noter que l'on est encore très loin des teneurs présentant un risque sanitaire pour l'homme. En effet, ce n'est qu'au-delà de 5 %* de CO₂ dans l'air, soit plus de 500 fois la teneur actuelle, qu'une exposition peut s'avérer mortelle.

Mais le CO₂ n'est pas le seul gaz concerné : les teneurs atmosphériques en CH₄ et N₂O ont augmenté de 151 % et 17 % respectivement depuis 1750 et continuent aujourd'hui d'augmenter. En revanche, depuis 1995, les teneurs atmosphériques de plusieurs de ces CFC qui sont à la fois nocifs pour la couche d'ozone et à la fois des gaz à effet de serre, augmentent plus lentement qu'auparavant ou même diminuent, grâce au protocole de Montréal.

* 5 % de CO₂ dans l'air provoque une accélération de la respiration et une exposition prolongée dans des concentrations supérieures peut provoquer une perte de connaissance et/ou la mort (Source : IEA).

Les gaz à effet de serre : PGR et équivalent CO₂

Les émissions de gaz à effet de serre dues à l'homme ont déjà entraîné une modification du bilan énergétique mondial d'environ 2,5 watts par mètre carré, ce qui équivaut à environ 1 % du rayonnement solaire net qui gouverne le climat. Le forçage radiatif est différent d'un gaz à l'autre et dépend de la bande d'absorption du rayonnement infrarouge (la Terre émet un rayonnement de 4 à 30 μm, le CO₂ possède par exemple une bande d'absorption de 15 à 18 μm).

Dans l'atmosphère, les gaz subissent des phénomènes de nature physique, chimique ou radiative qui vont les transformer et ainsi, à plus ou moins courte échéance, les retirer de ce milieu. La durée de séjour ou temps de résidence peut être estimée selon une moyenne pour chacun des gaz à effet de serre : une centaine d'années pour le CO₂, une douzaine pour le CH₄ jusqu'à plusieurs dizaines de milliers d'années pour certains gaz de la famille de CFC.

Ces grandes différences d'un gaz à l'autre, à la fois quant à leur forçage radiatif et à leur temps de résidence dans l'atmosphère, rendent difficile les comparaisons. Afin d'être en mesure d'évaluer la contribution relative de chacun, on a donc défini un indicateur spécifique : le potentiel de réchauffement global - PRG. Calculé sur la base d'un horizon fixé à 100 ans, il vise à regrouper sous une seule valeur l'effet additionné de toutes les substances contribuant à l'accroissement de l'effet de serre. Cet indicateur est exprimé en « équivalent CO₂ » : le PGR du CO₂ étant fixé à 1, celui du CH₄ vaut 21, celui du N₂O est de 310, celui du SF₆ est de 23 900. Pour ce qui concerne les HFC, le PGR est très variable (de 140 à 11700). Enfin, le PGR des composés de formule CF varie entre 6500 et 9200. Cela signifie ainsi par exemple que, à poids égal, le CH₄ contribue 21 fois plus que le CO₂ à l'effet de serre.

Grâce à cet indicateur, on est en mesure d'exprimer les contributions des différents gaz (fig. 5).

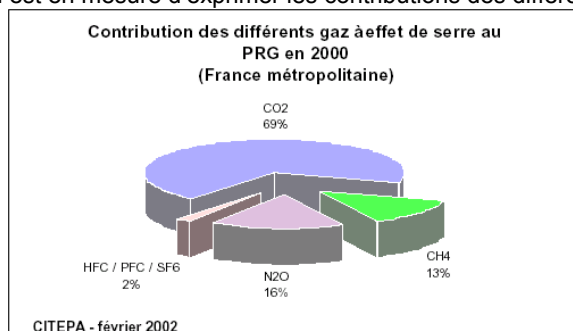


Fig. 5 - Pourcentage des substances impliquées dans le phénomène d'accroissement de l'effet de serre en 2000 pour la France (CITEPA, 2002).

Avec 70 % de contribution au réchauffement, le CO₂ est le principal gaz incriminé. Viennent ensuite le NO₂ (16 %) et le méthane (13 %). Le reste est constitué par les gaz purement industriels PFC, HFC et SF₆ qui, bien qu'ayant un PGR très important du fait de leur très longue durée de vie dans l'atmosphère, sont présents en quantité faible relativement aux autres gaz.

Équivalent CO₂ et équivalent carbone

Par simplification, on ne considère parfois que le poids du carbone dans le CO₂ (ou le CH₄). Le poids du carbone dans un kilogramme de CO₂ est de 0,2727 kg, donc :

1 tonne de CO₂ = 0,273 tonne de carbone (tC) (ou encore : 1 tonne de carbone (tC) = 3,67 tonnes de CO₂)

On le mesure généralement en milliards de tonnes, ou encore Gt (gigatonnes) en abrégé.

Mais il ne s'agit pas véritablement d'équivalent carbone comme on peut, à tort, le lire parfois. **Ce terme d'équivalent carbone ou d'équivalent CO₂ doit être réservé au PGR.**

Équivalent CO₂ d'un gaz = poids du gaz * PGR relatif

Équivalent carbone d'un gaz = poids du gaz * PGR relatif * 0,2727

Pour le CH₄, par exemple, on a 5,73 équivalents carbone par kilo de gaz émis ; pour le NO₂, on a 84,55 équivalents carbone par kilo de gaz émis.

Lorsque l'on parle d'équivalent carbone ou d'équivalent CO₂, termes souvent employés par les économistes, il est important de savoir exactement quel gaz a été pris en compte.

Deux phénomènes souvent confondus : réchauffement climatique et « trou d'ozone »

L'ozone est une molécule qui comporte 3 atomes d'oxygène (au lieu de 2 pour le gaz « oxygène » normal) dont l'origine et les effets sont très différents selon la partie de l'atmosphère où elle se trouve :

- dans la haute atmosphère, où l'on parle d'ozone stratosphérique (couche de l'atmosphère située entre 10 et 50 km d'altitude), il est naturellement présent et son rôle est capital puisqu'il agit comme un filtre pour les ultraviolets émis par le soleil qui ont tendance à « casser » les liaisons chimiques indispensables à la vie ;
- dans la basse atmosphère et plus précisément dans la troposphère (couche la plus près du sol), l'ozone troposphérique est l'un des composants de la pollution locale et provient indirectement de la combustion d'hydrocarbures. C'est un polluant agressif qui entraîne notamment des problèmes respiratoires.

Les CFC (chlorofluorocarbures) sont des gaz d'origine purement anthropique qui sont responsables de la destruction de l'ozone dans la haute atmosphère (créant ainsi un « trou » dans la « barrière filtrante »). Ils étaient utilisés pour diverses applications comme gaz propulseurs, par exemple, mais leur fabrication a été interdite en 1987 par le Protocole de Montréal. C'est bien à cause des dommages qu'ils causaient dans la stratosphère que cet accord international a pu être conclu et non pour leur rôle dans le réchauffement climatique. En effet, il faut également savoir que les CFC sont aussi de puissants gaz à effet de serre, au même titre que le CO₂, le CH₄ ou l'ozone des zones fortement urbanisées. Ils sont maintenant remplacés par des substituts, comme les PFC (perfluorocarbures), qui ne portent pas atteinte à la couche d'ozone stratosphérique mais qui sont également des gaz à effets de serre.

Il existe une différence fondamentale entre effet de serre et destruction de la couche d'ozone : le rôle joué par les gaz à effet de serre est physique, ils perturbent les échanges d'énergie dans l'atmosphère, mais ils n'engendrent pas de réactions chimiques comme les CFC qui détruisent les molécules d'ozone.

Les gaz à effet de serre autres que les CFC n'ont pas d'effet sur l'ozone de la haute atmosphère. En revanche, l'ozone produit par nos activités est en tout point nuisible et ne peut en rien remplacer l'ozone de la haute atmosphère.

Changement climatique et destruction de l'ozone en altitude sont deux phénomènes qui résultent d'émissions humaines de certains gaz particuliers. Il s'agit, dans les deux cas, d'un processus qui concerne l'atmosphère de manière globale, c'est-à-dire que le lieu d'émission des gaz en cause est sans importance, parce que leur durée de vie dans l'air est suffisamment longue (des décennies ou des siècles) pour que le brassage rende la concentration - et donc les conséquences - homogène à peu près partout. Autre conséquence de la longue durée de résidence de ces gaz, il s'agit dans les deux cas d'un phénomène difficilement réversible à court terme.

Source : J.M. Jancovinci, 2002

1.1.3. Une relation de causalité entre réchauffement et émissions de gaz à effet de serre bien établie

Comme nous l'avons vu, il existe une relation très étroite entre fluctuations des teneurs en gaz à effet de serre et fluctuations des températures pour ce qui concerne le CO₂ et le CH₄ (fig. 3). Mais on peut toujours se demander si ce sont des variations dans les teneurs en CO₂ et CH₄ atmosphériques qui ont amené des variations de température ou plutôt l'inverse, des variations de températures qui ont contrôlé les teneurs en CO₂ et CH₄ atmosphériques.

Pour faire le point sur cette question du rôle réel des émissions anthropiques sur l'augmentation des températures d'ores et déjà observées, les experts ont développé des modèles simulant les changements de température à la surface du globe depuis 1960 (fig. 6). Les résultats sont comparés à la courbe des températures réellement mesurées et on tente de séparer les causes naturelles des causes anthropiques.

On voit bien que les causes naturelles seules ne peuvent expliquer l'augmentation des températures des dernières décennies (fig. 6A) : il y a peu de correspondance entre le profil du modèle qui ne tient compte que des causes naturelles et la courbe des températures mesurées. Le profil qui tient compte des causes anthropiques seules (fig. 6B) colle un peu mieux à la courbe des températures mesurées, mais c'est

vraiment celui qui additionne les deux types de causes (fig. 6C) qui se rapproche le mieux des valeurs effectivement mesurées.

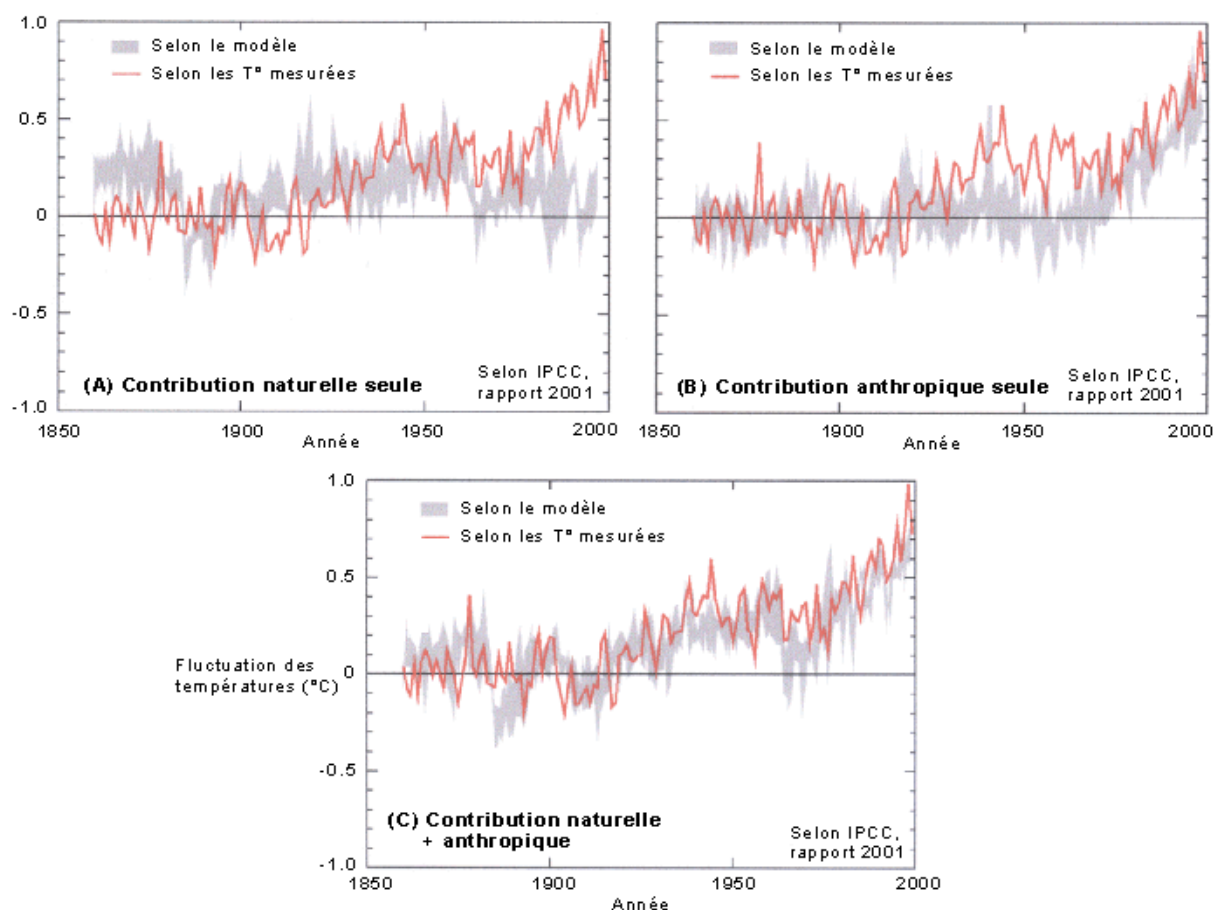


Fig. 6 - Résultats des modélisations de températures à la surface du globe.

Sur les trois graphiques, la ligne rouge correspond aux températures mesurées et le profil en gris, au modèle. Le profil en A ne tient compte que de causes naturelles (variations solaires, activité volcanique); celui en B, que des causes anthropiques (émissions de gaz à effet de serre, aérosols sulfatés) ; celui en C, de la somme des causes naturelles et anthropiques. (Bourque P.A, 1997-2001, repris d'après GIEC, 2001).

Ces résultats montrent que les paramètres utilisés pour la modélisation sont valables, ce qui n'exclut pas qu'il y en ait d'autres, et que les activités anthropiques participent bien au réchauffement planétaire.

C'est principalement sur la base de cette modélisation que le troisième et dernier rapport d'évaluation (2001) du GIEC conclut « à des évidences nouvelles et plus fortes que le gros du réchauffement des derniers 50 ans est attribuable aux activités humaines » (GIEC, 2001).

Effet de serre... un phénomène reconnu de longue date

Le phénomène de l'effet de serre est connu depuis le XVIII^e siècle. Son nom provient de l'analogie décrite par le savant genevois de Saussure (1740-1799) entre l'enveloppe atmosphérique de la Terre et le vitrage d'une serre. Fourier (1786-1830) et Carnot (1796-1832), deux pionniers de la thermodynamique, avancent les premières explications sur les mécanismes de régulation de la température à la surface de la Terre, sur le rôle des océans et celui de l'atmosphère qui permettrait de limiter les pertes de chaleur. Ce sont les prémices de la « théorie de la serre chaude ».

Le CO₂, découvert par le médecin chimiste écossais Black (1728-1799), ne sera considéré comme un gaz à effet radiatif que vers 1860. À cette époque, le physicien météorologue Pouillet (1790-1868) et le physicien irlandais Tyndall (1820-1893) font le lien entre la capacité de l'atmosphère à transmettre de la chaleur et les propriétés radiatives de certains gaz. Tyndall publie ainsi en 1861 un ouvrage qui fait date dans la théorie de l'effet de serre. Il insiste sur le rôle essentiel de la vapeur d'eau et du CO₂ pour lequel il énonce le principe de « la théorie climatique du gaz carbonique ». Chamberlain (1843-1828), autodidacte devenu professeur à l'université de Chicago, affirme le rôle important du CO₂ dans l'histoire climatique de la Terre. Il rencontre cependant peu d'écho dans la communauté scientifique de l'époque.

En 1895, le savant Arrhénius (1859-1927), prix Nobel de chimie, déclare devant l'Académie des Sciences de Suède que la vapeur d'eau et le CO₂ jouent un rôle majeur dans l'équilibre thermique de la Terre. Il est le premier à soutenir que la combustion d'énergie fossile pourrait augmenter l'effet de serre, lançant ainsi le débat sur la perturbation du cycle du carbone par les activités humaines. Ce dernier estime même que ce processus pourrait être un moyen de repousser la prochaine ère glaciaire.

Vernadsky (1863-1945), qui pose les premiers jalons de la biochimie en 1920, souligne l'impact de la déforestation sur l'équilibre du CO₂ dans l'atmosphère et il est le premier à insister sur l'importance de la biosphère dans le phénomène de l'effet de serre. Sa théorie ne sera pourtant pas reconnue par ses condisciples.

Source : C. Mégevand, 2001

1.2. CYCLE NATUREL DU CARBONE : DE L'ATOME À LA PLANÈTE

Le climat est la résultante de multiples processus interactifs qui régissent le système extrêmement complexe que constitue la Terre. Les grands compartiments que sont l'atmosphère, l'hydrosphère (incluant la cryosphère), la biosphère et la lithosphère sont, en quelque sorte, les organes vitaux de ce système. Entre eux s'établissent, en permanence, des échanges d'ordre physiques, chimiques et biologiques où ne participent que quelques-uns des 106 éléments connus du système-Terre. Ces éléments clefs, que l'on retrouve ainsi dans chacun des quatre compartiments du système, sont l'objet d'un recyclage permanent, indispensable au maintien de la vie sur Terre et qui correspond à ce que l'on appelle un cycle biogéochimique.

L'élément le plus critique attaché à ce recyclage est, sans conteste, le carbone. Quatorzième élément constitutif de notre planète en terme d'abondance, le carbone est omniprésent dans notre environnement : dans les tissus des végétaux, dans toutes les eaux douces ou marines à l'état dissous, dans le gaz carbonique de l'air que nous respirons, dans les carbonates des roches ou dans les combustibles fossiles que sont les charbons, pétrole ou gaz naturel... De tous les éléments, le carbone est unique par la variété de produits qu'il peut former.

Son recyclage influence tout particulièrement la **productivité biologique** et le **climat**. Le cycle du carbone implique des processus qui agissent en milieu terrestre et en milieu océanique et où interviennent des réactions chimiques biologiques et inorganiques. Il serait donc difficile d'aborder la problématique des changements climatiques sans connaître les éléments basiques de ces processus. Sans nous étendre sur ces processus très vite complexes, nous présentons ici quelques notions essentielles en insistant cependant sur quelques points qui nous seront utiles dans la suite.

Au sein des différents compartiments atmosphère, hydrosphère, biosphère et lithosphère, le carbone se présente donc, d'un point de vue chimique, sous des formes variées. Chacune de ces formes dans un milieu donné constitue un réservoir. Ainsi, l'atmosphère contient du carbone sous forme de CO₂ et de CH₄, ce qui représente deux réservoirs distincts que l'on pourrait presque qualifier de virtuels car CO₂ et CH₄ sont bien sûr intimement mélangés. De la même manière, dans l'océan, le carbone se rencontre à différents niveaux dans la biomasse (principalement phytoplancton), dans le gaz carbonique dissous, mais également dans les ions carbonates et les ions bicarbonates. Ainsi, il existe bien plusieurs réservoirs de carbone dans l'océan et c'est par abus de langage que l'on parle du « réservoir océanique » (tabl. 1).

Où sont les grandes réserves de carbone ?	Quels sont leurs contenus en carbone? (en GtC)
CH ₄ de l'atmosphère	10
Biomasse vivante (matière organique)	610
CO ₂ océanique dissout	740
CO ₂ atmosphérique	760
Ion carbonate océanique	1 300
Carbone organique dans les sols et sédiments	1 600
Réserves connues de combustibles fossiles	4 200
Ion bicarbonate océanique	37 000
Carbone organique des roches sédimentaires	10 000 000
Calcaires des roches sédimentaires	40 000 000

Tabl. 1 - Réservoirs de carbone du système Terre (hors couches profondes).
Source : Kump L.R. et al., 1999.

Il existe deux formes principales de carbone : organique et inorganique. Le carbone organique est celui qui est produit par des organismes vivants et qui est lié à d'autres carbones ou à des éléments comme l'hydrogène (H), l'azote (N) ou le phosphore (P) dans les molécules organiques ou les hydrocarbures. Le carbone inorganique est associé à des composés qui ne sont pas et n'ont pas été du domaine du vivant et qui ne contiennent pas de lien C-C ou C-H, comme par exemple le carbone du CO₂ atmosphérique ou celui des calcaires CaCO₃.

En faisant le total du carbone présent dans chacun des réservoirs des milieux qui nous sont plus familiers, on obtient les quantités suivantes de carbone :

- atmosphère : **770 GtC** ;
- écosystèmes terrestres (végétation et sols) : **2 210 GtC** ;
- océans* : **39 040 GtC** ;
- croûte terrestre (incluant les combustibles fossiles : charbon, pétrole et gaz naturel) : 54 200 Gt.

Plus que des chiffres précis, qui souvent diffèrent légèrement d'une source d'information à l'autre, ce qu'il est important de retenir, ce sont les ordres de grandeur impliqués :

- atmosphère et végétation terrestre contiennent des stocks grossièrement équivalents ;

* La biomasse océanique représente un stock de carbone très limité, de l'ordre de 2 à 5 GtC.

- les sols contiennent presque trois fois plus de carbone que les végétaux ;
- la biomasse terrestre (végétaux et sols) contient plus de trois fois le stock de carbone atmosphérique ;
- les océans représentent un stock de carbone considérable, cinquante fois plus important que l'atmosphère ;
- les combustibles fossiles non encore exploitées contiennent cinq fois plus de carbone que l'atmosphère.

Les hydrates de méthane : un autre réservoir de carbone

Sous des conditions de température et de pression particulières, la glace (H₂O) peut piéger des molécules de gaz, formant une sorte de cage emprisonnant les molécules de gaz : ce sont les hydrates de gaz ou clathrates.

Lorsque la matière organique incorporée dans les sédiments est décomposée sous l'action des bactéries anaérobies, un volume important de méthane est produit. Une partie se combine aux molécules d'eau pour former l'hydrate de méthane, dans une fourchette bien définie de température et de pression.

On sait que de grandes quantités d'hydrates sont présentes dans les couches sédimentaires superficielles des grands fonds océaniques ainsi que sous le pergélisol des hautes latitudes (fig. 7).

L'estimation des quantités totales à l'échelle de la planète demeure très incertaine. Selon l'United States Geological Survey, ce réservoir de carbone pourrait atteindre des valeurs de l'ordre de 2 fois le cumul de toutes les autres formes de combustibles fossiles.

Source d'énergie potentielle, les hydrates de méthane se trouvent dispersés dans des ensembles très vastes et peu faciles d'accès, ce qui rend leur exploitation impossible en l'état actuel des connaissances.

Sources : Suess et al., 1999 et Bilbaut F., 2002

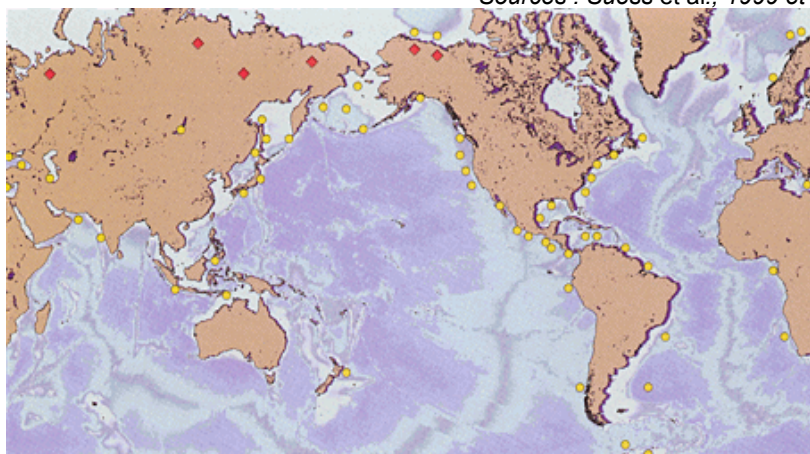


Fig. 7 - Répartition des gisements connus d'hydrates de méthane dans le monde (points jaunes : gisements de plateaux ou talus continentaux ; losanges rouges : gisements dans le pergélisol (Suess et al., 1999).

Les atomes de carbone demeurent plus ou moins longtemps dans les réservoirs, c'est-à-dire sous une forme chimique spécifique : on parle de temps de résidence. Par exemple, le temps de résidence du carbone sous forme CO₂ dans l'atmosphère est de 100 ans environ contre 12 ans pour le méthane. C'est d'ailleurs un des éléments qui rendent critiques les émissions de dioxyde de carbone dans le contrôle de l'effet de serre. Une réaction chimique ou biochimique se produit ensuite et l'atome de carbone change de réservoir. C'est par ce mécanisme qui implique de très nombreuses réactions que s'établissent les flux de carbone entre réservoirs donnant naissance au cycle global (fig. 8).

À cause des périodes de temps très variables pendant lesquels s'établissent les différents processus d'échange, mais également à cause de la nature des réactions chimiques (carbone organique et carbone inorganique), on peut considérer des sous-cycles à l'intérieur du cycle global du carbone. Toute hiérarchisation en sous-cycles est artificielle puisque les processus physiques, chimiques et biologiques agissent ensemble et sont intimement liés. Cependant, ces distinctions simplificatrices permettent une meilleure compréhension du fonctionnement du cycle global du carbone.

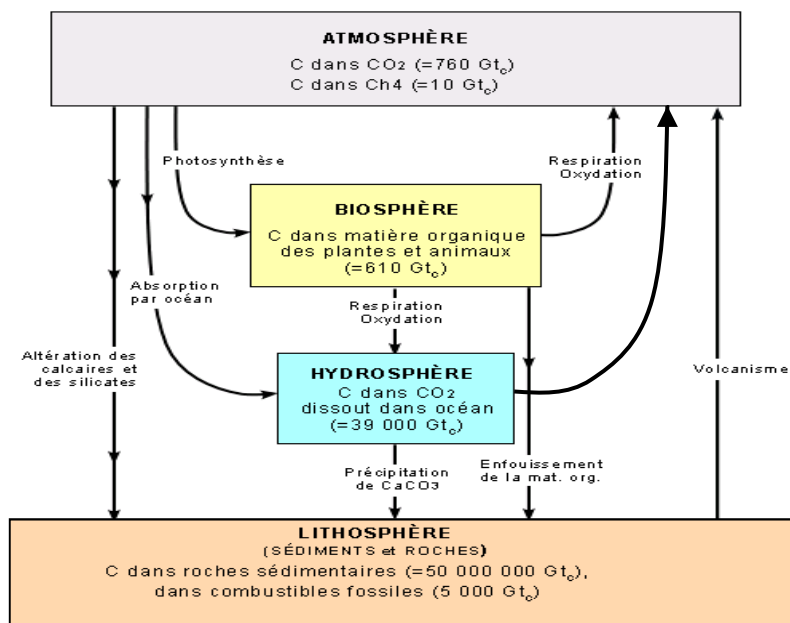


Fig. 8 - Cycle global du carbone et principaux échanges entre les principaux compartiments du système terrestre (repris d'après Bourque P.A., 1997-2001 ; Berner et Berner, 1996 et Kump et al., 1999).

- **Cycle du carbone organique**

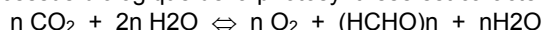
Le processus de base est le couple photosynthèse-respiration, c'est-à-dire la conversion du carbone inorganique du CO₂ en carbone organique des végétaux par la photosynthèse, et le processus inverse, la conversion du carbone de la matière organique en carbone inorganique par la respiration.

Les processus tels que la photosynthèse, la respiration ou la fermentation interviennent sur l'équilibre du CO₂ atmosphérique pour des temps inférieurs au siècle : on peut donc parler du « cycle court du carbone organique ». Les flux de carbone échangés avec l'atmosphère sont, en revanche, très importants (de l'ordre de 125 GtC chaque année).

Sur des échelles de temps beaucoup plus longues, des milliers et des millions d'années, ce sont les processus de nature géologique qui deviennent les contrôles les plus importants. Il s'agit, par exemple, de l'enfouissement des matières organiques dans les sédiments et roches sédimentaires, leur transformation en combustibles fossiles et leur altération (oxygénation) subséquente. Les flux de carbone liés à ces processus sont faibles. En revanche, les réservoirs sont immenses et les temps impliqués très longs. Ainsi, en est-il du remplissage de l'immense réservoir que constituent les hydrocarbures.

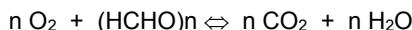
Constitution de la biomasse terrestre et marine : la photosynthèse

Les organismes autotrophes présentent la particularité de pouvoir utiliser les rayonnements lumineux comme unique source d'énergie pour produire les molécules organiques nécessaires à leur maintien et à leur développement. Le processus biologique de la photosynthèse est caractérisé par l'équation suivante :



Ce sont les molécules de CO₂ atmosphérique qui fournissent les atomes de carbone nécessaires à la formation des molécules glucidiques (structure de base (HCHO)_n).

La respiration des organismes vivants libère au contraire du carbone dans l'atmosphère selon la réaction :



Dans la nature, une partie de la matière organique est respirée (oxydée) par les animaux ou les plantes tandis que l'autre partie se retrouve dans les sols terrestres ou les sédiments marins. La décomposition se fait sous l'action de micro-organismes, bactéries et champignons. Ces micro-organismes forment deux groupes : les aérobies utilisent l'oxygène libre et produisent du CO₂ ; les anaérobies utilisent l'oxygène des molécules de la matière organique (même en absence d'oxygène libre, milieu dit anoxique) et produisent du CO₂ et du CH₄ (processus de décomposition de la matière organique par fermentation).

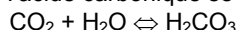
• Cycle du carbone inorganique

Les réservoirs importants de carbone inorganique sont l'atmosphère, les océans, ainsi que les sédiments et roches carbonatées, principalement les calcaires CaCO₃, mais aussi les dolomies CaMg(CO₃)₂.

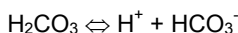
Le processus principal concerne l'échange entre le CO₂ atmosphérique et le CO₂ de la surface des océans : on estime que plus de 180 Gt de carbone sont échangés, chaque année, entre ces deux milieux.

Dissolution du CO₂ atmosphérique dans les couches superficielles de l'océan

Quand le CO₂ se dissout dans l'océan, de l'acide carbonique se forme selon la réaction :

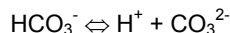


Cet acide carbonique se dissocie en libérant ses atomes d'hydrogène : quand son premier atome est libéré, il se forme un ion bicarbonate :



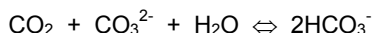
Le pH de l'eau contrôle cette réaction : si la concentration en H⁺ diminue (augmentation de pH), il y a déplacement de l'équilibre vers la droite et une plus grande quantité d'acide carbonique se dissocie. À l'inverse, une augmentation de la concentration en H⁺ (diminution du pH) entraîne un déplacement vers la gauche et forme H₂CO₃ au détriment de HCO₃⁻.

À la libération du second atome d'hydrogène de l'acide carbonique, le bicarbonate HCO₃⁻ se transforme en carbonate CO₃²⁻ :



Pour une concentration en H⁺ donnée, donc un pH de l'eau donné, les quantités relatives d'ions carbonates et bicarbonates vont s'ajuster jusqu'à atteindre l'équilibre.

La réaction chimique exprimant le captage d'un excès de CO₂ par l'océan est la somme de ces trois réactions, soit :



Une chimie semblable à celle des eaux océaniques s'applique à la dissolution du CO₂ dans les eaux de pluies, les rendant naturellement acides (pH normalement entre 5 et 6). Les constantes de temps pour ces équilibres chimiques sont faibles.

Les organismes marins combinent les ions bicarbonates aux ions calcium présents dans l'océan pour sécréter leur squelette ou leur coquille de CaCO₃ (carbonate de calcium). Une partie de ce CaCO₃ s'accumule sur les fonds océaniques peu profonds et est éventuellement enfouie pour former des roches sédimentaires carbonatées. Les échelles de temps impliqués sont alors longs et vont s'étendre souvent sur plusieurs

dizaines de millions d'années : on peut parler de « cycle long du carbone inorganique ». Des mouvements tectoniques peuvent ensuite ramener à la surface les roches carbonatées. Cependant, une partie du carbone de ces roches est également recyclée dans les zones de subduction et retournée à l'atmosphère sous forme de CO₂ émis par les volcans*.

Qu'ils relèvent du cycle de carbone organique ou inorganique, les équilibres chimiques et biologiques génèrent des flux importants entre l'atmosphère et les autres milieux naturels. Bien qu'il existe de fortes hétérogénéités locales dans ces flux, les masses d'air, au cours de leur déplacement, homogénéisent les concentrations de CO₂.

Dans la problématique du changement climatique, l'atmosphère est l'élément central du système, le réservoir intégrateur. Aussi, lorsqu'on établit un bilan des flux sur une période donnée, on parle de « source » si un réservoir émet plus de CO₂ dans l'atmosphère qu'il n'en reçoit, et l'on parle de « puits » dans le cas contraire. La période de temps considérée est importante car, à cause de la variabilité temporelle des processus impliqués (ou, en d'autres termes, de la disparité des temps de résidence), un réservoir peut alternativement être puits ou source.

Nous avons, pour le moment, limité notre champ d'investigation aux phénomènes purement naturels excluant toute interférence anthropique. Cette connaissance basique du fonctionnement du cycle du carbone nous permet maintenant de voir de quelle façon l'homme interfère sur ces processus et de comprendre la nature et la portée des perturbations induites.

1.3. LES ÉMISSIONS ANTHROPIQUES DE CO₂ ET LEURS IMPACTS SUR LE CYCLE NATUREL DU CARBONE

1.3.1. L'homme énergivore

Le besoin de ressources alimentaires et d'espace pour aménager nos lieux de vie nous conduit à coloniser de plus en plus d'espaces naturels. L'appauvrissement de la biodiversité en est la première conséquence. Mais il existe d'autres « effets secondaires » dont la modification de la composition atmosphérique n'est pas un des moindres.

L'intensification de l'utilisation des sols participe à l'augmentation des teneurs en CO₂ dans l'atmosphère de deux façons. Dans un premier temps, la déforestation constitue un déstockage de carbone massif et brutal : il y a relargage immédiat d'une grande proportion de carbone contenu dans la biomasse. Par la suite, la matière organique du sol se minéralise et libère du CO₂. Le sol s'appauvrit et devient une source de carbone. D'autre part, la mise en culture des zones déforestées ou de prairies dont les sols sont très riches en matières organiques accroissent le processus de déminéralisation et intensifient donc les émissions de CO₂. Certaines pratiques agricoles intensives comme le labour profond et le maintien d'un sol nu constituent encore des facteurs aggravants.

* Un volcan en activité émet, en moyenne, 1,3 million de t de CO₂ par an, soit au total sur terre, de 130 à 175 millions de t/an. Les émissions de l'Etna, en Sicile, sont particulièrement importantes : 25 millions de t/an (source : Vignes J.L. et al., 1997-1998).

Déforestation et agriculture : quelques chiffres

La déforestation est la première cause des émissions de CO₂ issues des écosystèmes terrestres (87 %). Les pratiques agricoles constituent les 13 % restants (Houghton *et al.*, 2000).

La déforestation

La superficie du couvert forestier a été estimée à 3 454 millions d'hectares en 1995, ce qui représente environ le quart des terres émergées. Près de 55 % des forêts se situent dans les pays en développement.

On estime à 16,1 millions d'hectares la superficie de forêts naturelles qui, à l'échelle mondiale, ont été perdues chaque année pendant la décennie 1990-2000, dont 14,6 millions d'hectares par déforestation et 1,5 million d'hectares par conversion à des plantations forestières.

La déforestation et la dégradation forestière se produisent quasi-exclusivement dans les pays en développement : 0,9 million d'hectares de forêts naturelles ont été perdus chaque année entre 1990 et 2000 dans les régions tropicales. En revanche, on observe une expansion de la superficie forestière depuis plusieurs décennies dans de nombreux pays industrialisés, notamment dans les zones où l'agriculture ne représente plus une utilisation des terres viables au plan économique. Ce phénomène a été observé, notamment, dans certains pays d'Europe (fig. 9).

Ainsi, sur la période 1850-1990, 77 % des émissions liées aux changements d'utilisation des terres sont imputables aux pays en développement (Austin *et al.*, 1998), ce qui ne correspond toutefois qu'à 23 % de l'ensemble des émissions cumulées de CO₂ sur la même période.



Fig. 9 - Modification annuelle nette de la superficie forestière par région, 1990-2000 (Source : ERF citée dans FAO, 2001).

L'agriculture

L'agriculture s'est développée, au nord comme au sud, aux dépens des écosystèmes naturels tels que les forêts et la prairie qui représentent des stocks de carbone considérables, notamment dans le compartiment sol. L'appauvrissement du sol en matière organique se produit surtout les premières années qui suivent le déboisement de la forêt ou le retournement de la prairie. L'ampleur de la perte varie suivant le type de sol mais on estime qu'entre 20 et 40 % de la quantité de carbone du sol est minéralisé à la suite de la mise en culture (Batjes N.H., 1999). Les horizons les plus perturbés suite à la mise en culture sont les horizons superficiels (en partie du fait de facteurs climatiques). Les effets deviennent négligeables sur les horizons compris entre 10 et 60 cm.

Les pratiques agricoles auraient causé la destruction partielle de la matière organique des sols cultivés équivalent à environ 55 GtC (GIEC, 2000a), dont 30 GtC auraient été perdus à partir de 1860 (Houghton, 1999). Actuellement, les sols des zones tempérées seraient globalement neutres en CO₂ pour l'atmosphère. En revanche, les sols cultivés dans les zones tropicales peuvent être assimilés à des sources nettes de carbone.

Sources : C. Mégevand, 2001 et FAO, 2001

Bien qu'elle s'accroisse avec l'augmentation démographique de ces dernières décennies, la pression que nous exerçons sur la biosphère et les sols est un processus enclenché de très longue date.

En revanche, c'est une découverte récente qui constitue la principale source du problème qui nous occupe : l'énergie chimique des végétaux, que nous puisons d'ores et déjà dans notre alimentation et qui n'est autre que de l'énergie solaire transformée, se trouve stockée en quantité gigantesque dans la matière organique fossile. Cette découverte, qui va révolutionner nos modes de production et de consommation, marque l'entrée dans l'ère industrielle. Depuis cette époque, nous n'avons cessé de puiser sans mesure dans cet énorme réservoir d'énergie que renferme le sous-sol.

Si l'utilisation des sols qui affecte les deux grands réservoirs de carbone que sont la biosphère terrestre et les sols ne perturbe que le cycle court du carbone, l'extraction et la combustion des pétroles, gaz et charbons que nous pratiquons, court-circuitent le cycle long et génèrent un processus beaucoup plus grave car irréversible. De la même manière mais en marge du circuit énergétique, le développement de certaines industries comme la fabrication des ciments constitue une nouvelle atteinte portée au cycle long du carbone. Les calcaires sont, en effet, autant de carbones lentement retirés de l'atmosphère pendant des millions d'années qui sont brutalement renvoyés à l'atmosphère au moment de leur combustion.

La part relative des émissions de CO₂ liées à la combustion des ressources fossiles est en augmentation constante. Si, jusqu'au milieu du XX^e siècle, elle était encore minoritaire (Riedacker, 1991), elle représentait environ les trois quarts des émissions anthropiques dans les années 1980 pour atteindre aujourd'hui environ 80 %.

On estime ainsi que, entre 1850 et 1998, par l'utilisation des combustibles fossiles et la production de ciment, on a injecté dans l'atmosphère environ 270 (\pm 30) GtC sous forme de dioxyde de carbone (Marland *et al.*, 1998). Les émissions dues au changement d'affectation des terres, touchant principalement les écosystèmes forestiers, sont évaluées à environ 136 (\pm 55) GtC (GIEC, 2000a). Au total, ce seraient ainsi plus de 400 GtC de CO₂ d'origine anthropique qui auraient été ajoutés au réservoir atmosphérique.

Le CO₂ ayant un temps moyen de résidence dans l'atmosphère de l'ordre du siècle, une telle quantité aurait dû conduire à des concentrations atmosphériques en CO₂ de l'ordre de 450 ppmv à la fin du XX^e siècle. Or, on constate que ce n'est pas le cas puisque l'augmentation observée n'est que de 28 %, au lieu de 58 % : la concentration atmosphérique est passée de 285 à 366 ppm. Ces concentrations correspondent à une augmentation de dioxyde de carbone dans l'atmosphère évaluée à 176 (\pm 10) GtC. Que sont alors devenues les 230 GtC restantes ?

1.3.2. Des systèmes naturels qui, jusqu'à présent, s'adaptent

Les recherches menées en ce domaine ont montré que les émissions de CO₂ étaient, pour partie, absorbées par les océans. Sur la période 1850-1998, on estime ainsi que 120 GtC sont passées dans le réservoir océanique. Mais restait à trouver un autre candidat pour les 110 GtC restants afin que puisse être ainsi respecté l'axiome de conservation des éléments (fig. 10).

Le « puits manquant » (missing sink) a fait couler beaucoup d'encre. Aujourd'hui, il existe un relatif consensus dans la communauté scientifique : ce puits serait le fait de la biosphère terrestre et ce, malgré les fortes atteintes dont elle fait l'objet. Les écosystèmes auraient, en fait, développé une capacité accrue de fixation du carbone au cours de la période 1850-1998 notamment grâce à l'effet fertilisant du CO₂.

Jusqu'à aujourd'hui, les réservoirs des deux milieux naturels que sont les océans et la biosphère terrestre sont donc parvenus, ensemble, à absorber plus de la moitié de nos émissions de CO₂ (fig. 10) jouant un rôle régulateur très important sur les variations de compositions atmosphériques. On a pu vérifier que ces conclusions restaient vraies à l'échelle décennale.

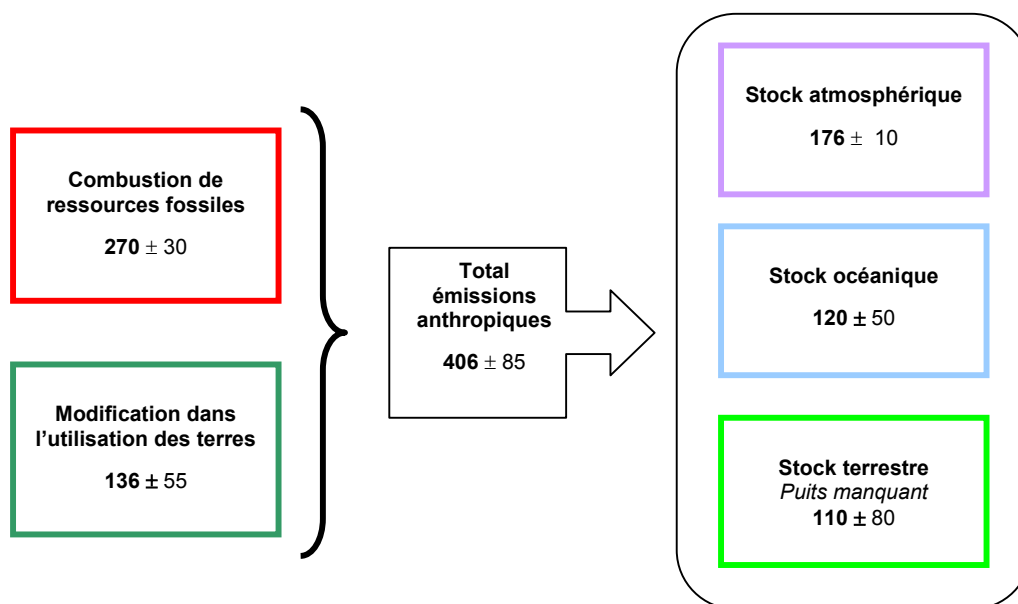


Fig. 10 - Flux de CO₂ cumulés entre 1850 et 1998 (en GtC) (GIEC, 2000a).

Le tableau 2 donne les bilans moyens annuels du carbone dans le monde pour 1989-1998. En dépit des émissions nettes dans l'atmosphère découlant des changements d'affectation des terres, il semblerait que les écosystèmes terrestres aient probablement servi de puits (0,7 GtC) (fig. 11). Cependant la marge d'erreur de ± 1 GtC sur cette valeur montre que d'importantes incertitudes pèsent sur les rythmes et tendances de l'absorption du carbone par les écosystèmes terrestres.

ÉMISSIONS				AUGMENTATION DES STOCKS				
Combustion de ressources fossiles	+	Modification dans l'utilisation des terres	=	Stock atmosphérique	+	Stock océanique	+	Stock terrestre
6,3 (± 0,6)		1,6 (± 0,8)		3,3 (± 0,2)		2,3 (± 0,8)		2,3 (± 1,3)

Tabl. 2 - Moyennes annuelles des flux de CO₂ anthropiques pour la période 1989 à 1998 (GIEC, 2000a).

Le rôle des réservoirs constitués par la biomasse continentale et les sols dans la régulation du CO₂ anthropique reste donc controversé. Ces milieux ne contiennent que trois fois plus de carbone que l'atmosphère et sont extrêmement perturbés en raison

de l'utilisation des terres. Les constantes de temps rapides de ces réservoirs (les temps de stockage dans la végétation ou les sols sont courts, quelques années à quelques décennies), leurs diversités et leurs hétérogénéités en font les réservoirs de carbone actuellement les plus méconnus. Il reste certain que le stockage du CO₂ par la biosphère terrestre ou les sols est beaucoup plus précaire que par les océans.

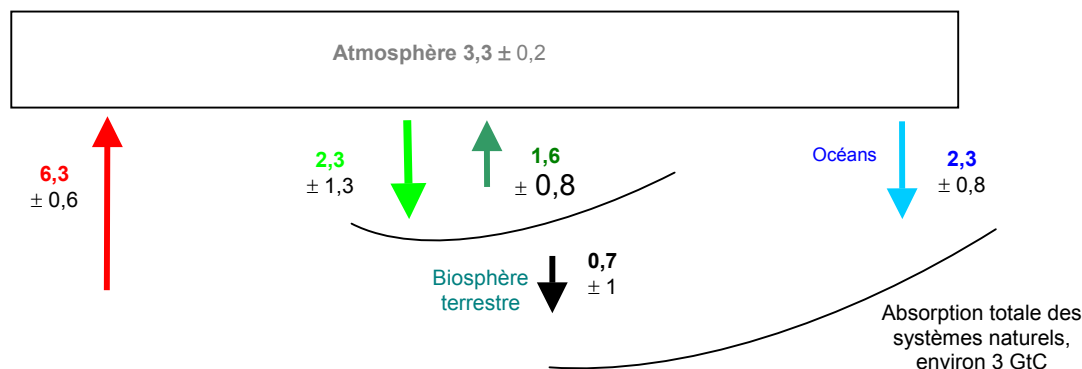


Fig. 11 - Flux de carbone annuels (en GtC) dans les différents compartiments pour la période 1989-1998 (d'après les valeurs fournies dans GIEC, 2000a).

Pour ce qui concerne les réservoirs océaniques, qui contiennent plus de cinquante fois plus de carbone que l'atmosphère, les échanges s'établissent selon deux processus : la solubilité, régie par l'équilibre thermodynamique du CO₂ à l'interface air-mer et l'activité biologique de la biomasse marine (photosynthèse). Les temps de résidence du carbone dans l'océan peuvent dépasser plusieurs siècles. En effet, le CO₂ est fortement soluble dans les eaux froides (donc plus denses) qui, dans les hautes latitudes (près du Groenland), plongent dans les couches profondes de l'océan.

Il en résulte une **circulation thermohaline** de l'eau de mer dans laquelle l'eau froide profonde de l'Atlantique nord (riche en CO₂) descend vers le sud jusqu'à l'Antarctique avant de remonter vers le nord où elle refait surface dans l'Océan indien et le Pacifique équatorial (fig. 12). Là, une partie du CO₂ repasse dans l'atmosphère. On estime ainsi qu'il peut s'écouler environ 1 000 ans entre la plongée de l'eau aux hautes latitudes et leur remontée dans les tropiques.

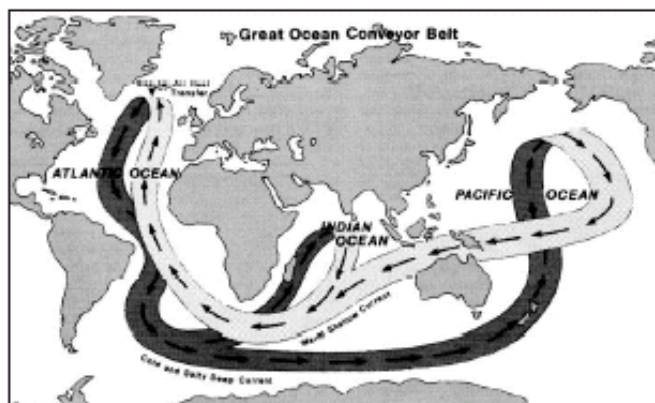


Fig. 12 - La circulation thermohaline.

(en gris foncé : les eaux froides et denses circulant en profondeur ; en gris clair : les eaux plus chaudes circulant en surface) (Source : GIEC, 1996a).

Les flux de CO₂ entre atmosphère et milieux naturels

Une seule station atmosphérique, fonctionnant sur plusieurs décennies comme Mauna-Loa à Hawaï, permet d'établir combien les réservoirs naturels (océan et biomasse) absorbent, mais malheureusement pas d'identifier où.

Pour aller plus loin, il est nécessaire de développer un réseau mondial de surveillance du CO₂. Dans les années 1980, le réseau s'est appuyé sur un ensemble de stations marines, peu affectées par les fortes pollutions continentales, permettant de suivre l'évolution du CO₂ du nord au sud. Dans ce cadre, l'Insu [ndr à travers le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Unité Mixte de Recherche CEA-CNRS] gère deux observatoires : la station de Mace Head en Irlande et la station de l'île d'Amsterdam dans l'océan Indien Sud. Il est apparu alors que l'hémisphère Nord était enrichi en CO₂ relativement à l'hémisphère Sud, en cohérence avec les émissions essentiellement boréales. Toutefois le gradient observé, de l'ordre de 3 ppmv, est sensiblement plus faible que celui estimé par les modèles de transport atmosphérique, qui prennent en compte les lieux des sources anthropiques et le mélange des masses d'air. Cette différence est capitale : elle implique qu'une part substantielle des rejets de CO₂ est réabsorbée dans l'hémisphère Nord. Afin de séparer le rôle de la biomasse continentale de celui de l'océan, des traceurs biogéniques, tels l'oxygène ou le rapport isotopique ¹³C/¹²C du CO₂, ont été récemment utilisés. Ces études indiquent que dans les années 1990-94 près du tiers des 6 GtC émis par an aurait été réabsorbé par la végétation terrestre et les sols, et ce notamment aux moyennes latitudes Nord.

Pourtant de nombreuses incertitudes subsistent quant à la permanence de ce puits boréal. Est-il localisé dans les forêts sibériennes ou canadiennes ? Est-il d'ailleurs toujours boréal ? Quelles sont les erreurs associées aux traceurs biogéniques, au transport atmosphérique ? La variabilité interannuelle ne masque-t-elle pas les tendances à long-terme ? Pour relever ces défis deux axes principaux sont actuellement développés : 1. la densification du réseau mondiale (CO₂ et isotopes, oxygène) dans le sens est-ouest, notamment au-dessus des continents, et l'extension des mesures en altitude pour s'affranchir du « bruit » près du sol ; 2. le développement de modèles atmosphériques prenant en compte la dynamique de la couche limite atmosphérique dans les transferts de CO₂ de la surface vers la troposphère libre et l'évaluation de ces modèles par des traceurs indépendants (SF₆, Radon).

À moyen terme, il sera nécessaire d'effectuer un bilan régional de plus en plus fin du CO₂, tant pour diagnostiquer la dynamique des flux échangés avec l'océan ou la biosphère continentale, que pour contrôler les émissions dans un contexte de stabilisation du CO₂. Dans cette perspective, la télédétection du CO₂ par satellite, calibrée par un réseau au sol et aéroporté, devrait apporter une information essentielle.

Extrait de « 30 ans de recherches en sciences de l'univers (1967-1997) », publication de l'INSU.

Envisat, satellite européen lancé récemment, a pour mission d'étudier l'atmosphère terrestre et les réactions chimiques qui s'y déroulent...

Ces informations pourraient permettre de mieux comprendre les raisons du changement climatique de la planète. Par ailleurs, une autre de ses missions est de lever les incertitudes concernant les concentrations de vapeur d'eau, de dioxyde de carbone, de gaz à l'état de trace dans les différentes couches de l'atmosphère. En effet, si personne ne conteste plus l'influence néfaste du dioxyde de carbone, on ne connaît toujours pas avec précision la quantité de ce gaz contenue dans l'atmosphère ni la quantité recyclée par les océans et les forêts. Envisat permettra aux scientifiques de faire des modélisations et de répondre à ces questions. Envisat sera donc capable de surveiller l'application du protocole de Kyoto et de pointer quasiment en temps réel les pays contrevenants. Ces données permettront peut-être d'éviter les éternels échanges de chiffres au cours des grands sommets sur l'environnement.

Article paru dans ENERGIE PLUS n° 283 du 1^{er} avril 2002

1.3.3. Des systèmes naturels qui s'adaptent... mais qui subissent des perturbations

L'absorption massive de carbone par l'océan et la biosphère due à l'augmentation des concentrations de CO₂ atmosphérique induit des perturbations de ces milieux eux-même.

a) Impacts sur le milieu océanique

Les 2,3 Gt de carbone actuellement absorbés chaque année se traduisent par une augmentation déjà perceptible de la concentration des eaux marines en carbone inorganique dissous. La première conséquence de ce phénomène est une **acidification des eaux**.

On estime ainsi qu'en moyenne, le pH des eaux de surface océanique auraient déjà perdu 0,1 unité de pH comme conséquence indirecte de l'augmentation de la concentration de CO₂ atmosphérique (Haugan P.M. and Drange H., 1996). Les plongées et remontées d'eaux chargées plus ou moins chargées en CO₂ (circulation thermohaline) se traduisent, dans certaines zones (Atlantique Nord et Pacifique Nord), par des variations temporelles du pH relativement marquées en surface. Dans d'autres sites au contraire, les variations saisonnières sont beaucoup plus faibles. Des calculs ont montré qu'une augmentation de l'ordre de 15 ppm par décennie du CO₂ atmosphérique devrait se traduire par une diminution moyenne du pH des eaux marines de 0,015 unité dans le même intervalle de temps (Haugan P.M. and Drange H., 1996).

Au-delà des modifications du pH dont pourrait souffrir la biomasse marine, des études récentes montrent que l'augmentation de CO₂ dissout agit sur la photosynthèse et sur l'utilisation des nutriments limitant (azote et phosphore).

Afin de quantifier ces processus, la communauté scientifique développe des modèles globaux, régionaux ou locaux du cycle du carbone océanique, intégrant à la fois le cycle naturel et la perturbation anthropique. La représentation de la circulation océanique en est l'élément pilier.

WOCE - World Ocean Circulation Experiment

Le projet de recherche américain sur les courants dans les océans à l'échelle mondiale (WOCE : World Ocean Circulation Experiment) regroupe, depuis 1990, des données satellites et des observations physiques et chimiques *in situ* de 30 pays sur les 4 océans. Il travaille à élaborer des modèles globaux dont les buts sont essentiellement :

1. **d'appréhender les changements climatiques et de rassembler les données nécessaires pour tester ces modèles.** Cela, en particulier au niveau (i) des grands courants froids et chauds avec leurs variations quinquennales et annuelles, (ii) de l'équilibre dynamique des courants océaniques mondiaux et de l'influence des courants de surface sur cet équilibre, (iii) des composantes des variations à des échelles allant du mois à l'année ainsi que des statistiques à plus petites échelles, (iv) de la fréquence et de la nature de la formation, de la répartition et de la circulation des masses d'eaux qui influencent le système climatique sur des échelles de 10 à 100 ans.
2. **de préciser le niveau de représentativité des séries de données spécifiques quant au comportement à long terme des océans et de trouver des méthodes pour déterminer les variations des courants.** Cet objectif passe par l'identification des paramètres et indices océanographiques qui sont essentiels à l'observation du système climatique à l'échelle de la dizaine d'années et par le développement de techniques économiquement rentables pour la mise en œuvre d'un système d'observation climatique.

b) Impacts sur les écosystèmes terrestres

Pour le moment, l'augmentation du CO₂ atmosphérique s'est traduit par une fertilisation de la biosphère terrestre, ce qui, comme on l'a vu, aurait permis de compenser les pertes de carbone dues à la déforestation. Mais ce phénomène reste encore très mal

connu. Même si l'on sait que ce phénomène de fertilisation aura ses limites, on n'est pas en mesure, aujourd'hui, d'en mesurer les impacts potentiels.

Cependant, il est probable que l'augmentation de la concentration en CO₂ de l'atmosphère aura pour conséquence de modifier l'équilibre entre espèces. En effet, nous avons présenté la photosynthèse comme processus global de fixation du carbone par la biomasse. Mais il existe des variations dans ce processus : la photosynthèse C₃ correspond à la synthèse de composés à trois atomes de carbone alors que la photosynthèse C₄ implique des composés à quatre atomes de carbone. Les plantes C₄ (maïs, canne à sucre, pâturages) sont capables de photosynthétiser à des teneurs atmosphériques de CO₂ bien inférieures à celles qui sont nécessaires pour les plantes C₃. En revanche, elles répondent plus mal que les plantes C₃ à une augmentation des teneurs en CO₂. Ainsi, l'augmentation du CO₂ atmosphérique devrait défavoriser certaines cultures par rapport à d'autres.

Compte tenu de l'imprécision des connaissances sur les processus impliqués, toute appréciation des impacts à long terme de l'absorption de CO₂ par les milieux naturels (écosystèmes et océans) comporte de grandes incertitudes. En revanche, il est clair que les changements climatiques induits par l'augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique, s'ils se confirment, devrait être une source de perturbation certaine et de forte ampleur sur les milieux naturels.

1.3.4. Des systèmes naturels qui s'adaptent... jusqu'à quand ?

Dans le domaine marin, un réchauffement des eaux superficielles affectera la vie pélagique. On estime ainsi que la maladie blanche qui affecte actuellement les coraux et qui serait reliée au réchauffement des eaux superficielles aurait déjà détruit 20 % des récifs coralliens et que 40 % seraient en danger .

Par ailleurs, comme nous l'avons vu, la circulation de l'océan global forme une boucle qui prend son origine dans l'Atlantique-Nord où les eaux froides (refroidies par les vents froids du Canada), salées, denses et bien oxygénées plongent vers les profondeurs. La remontée locale (upwelling) de ces eaux froides riches en nutriments alimentent le plancton en surface et contribuent ainsi à la forte productivité biologique marine dans certaines régions (Grands Bancs de Terre-Neuve, côtes du Pérou).

Un ralentissement dans le transport des masses d'eau, qui serait causé par un réchauffement des eaux de surface dans l'Atlantique-Nord et par une diminution de leur salinité (fonte des glaces du Groenland et de l'Arctique), aurait non seulement une influence néfaste sur la ressource halieutique mais également sur l'équilibre climatique global. Plusieurs modèles montrent d'ailleurs que la circulation thermohaline décline depuis quelques décennies et que, à l'exception de deux modèles, cette diminution ira en s'accroissant (GIEC, 2001). Certains modèles prévoient même qu'une augmentation de 1 % par an de la teneur atmosphérique* en CO₂ pendant 100 ans entraînerait une coupure nette de la circulation thermohaline.

* Il faut savoir par ailleurs que l'on estime à 111 millions de tonnes la quantité de carbone fixée chaque année par les récifs coralliens sous forme de carbonate de calcium (source : Société Française de Chimie, voir Vignes et al., 1997-1998).

* À titre de rappel, le taux d'augmentation de la teneur en CO₂ atmosphérique a été en moyenne de 1,5 ppm (0,4%) par an durant les deux dernières décennies.

Pour ce qui concerne la capacité de l'océan à continuer à absorber une partie du CO₂ des émissions anthropiques, elle devrait être doublement perturbée par une montée des températures à cause (1) de la disparition des courants thermohalins puisqu'ils permettent les échanges de carbone entre eaux de surface et eaux profondes et (2) de la diminution de la solubilité du CO₂ dans les eaux de surface.

Les écosystèmes terrestres répondront de façons disparates aux changements de température et de taux d'humidité qui accompagneront les variations de teneurs en CO₂. Ainsi, certaines espèces d'arbres supportent mieux les augmentations de température et de teneurs en CO₂ que d'autres. Par exemple, le pin et le bouleau supportent bien les teneurs élevées en CO₂, alors que le tremble dépérit quand les températures deviennent trop chaudes. L'abondance relative et la distribution de certaines espèces de végétaux dans un écosystème donné risquent donc d'être modifiées par un réchauffement planétaire, avec toutes les implications attendues sur les autres végétaux et la vie animale (Bourques, 1997-2001).

Pour une estimation plus détaillée des effets des modifications climatiques en fonction des types de forêts (boréales, tempérées, tropicales, montagneuses tropicales et mangroves), on peut consulter le dernier rapport de la FAO sur la situation des forêts mondiales (FAO, 2001).

Si les changements climatiques projetés se matérialisent, ils auront probablement des effets spectaculaires et prolongés sur les forêts. Les écosystèmes forestiers devraient survivre pendant quelques temps à ces changements climatiques, mais à plus long terme, leurs réactions dépendront de la capacité des espèces à s'adapter aux nouvelles conditions ou à modifier leur répartition géographique.

Pour ce qui est du processus d'absorption du CO₂, les modèles qui ont été développés montrent que les effets indirects des activités anthropiques devraient conduire au maintien, durant plusieurs décennies au moins, de l'absorption supplémentaire du CO₂ dans les écosystèmes forestiers à l'échelle planétaire, mais que cette absorption diminuera graduellement et que les écosystèmes forestiers risquent même de devenir par la suite des sources de carbone (GIEC, 2000a). Cela s'expliquerait notamment par le fait que la capacité des écosystèmes à fixer une quantité supplémentaire de carbone est limitée par les nutriments et d'autres facteurs biophysiques. La détérioration des écosystèmes due à l'évolution du climat pourrait constituer un facteur aggravant.

Cependant, les modèles réalisés sur le devenir des puits de carbone que sont aujourd'hui les écosystèmes terrestres diffèrent quelque peu quant à leurs résultats, même si, globalement, ils arrivent au final aux mêmes conclusions. Ainsi, dans la simulation obtenue à l'aide du modèle de l'IPSL (Institut Pierre Simon Laplace, Paris), les forêts continuent pendant un certain temps à absorber des quantités importantes de CO₂ (Dufrenne *et al.*, 2002).

En revanche, les sols et la biosphère continentale deviennent rapidement des sources de CO₂ dans le modèle du Hadley Center en raison d'une augmentation de l'activité bactérienne liée au réchauffement (Cox P.M. *et al.*, 2000). Dans ce modèle, le puits biosphérique disparaîtrait après l'an 2080. On pourrait alors s'attendre à une accélération significative du réchauffement planétaire.

1.4. CONCLUSION

Bien que faibles au regard des réservoirs naturels que constituent la biosphère et les océans, les émissions de CO₂ générées par les activités humaines perturbent de façon grave et durable le cycle du carbone :

- elles bouleversent le réservoir de carbone atmosphérique (modification de la composition atmosphérique) ;
- elles perturbent les milieux qui échangent des flux avec l'atmosphère : la biomasse en tant qu'élément constitutif de toutes les molécules organiques et la géochimie marine par acidification des eaux de surface.

Au-delà, la modification de la composition atmosphérique induisant un déséquilibre thermique et par la suite climatique, les milieux naturels que sont les écosystèmes terrestres et l'océan devraient subir de nouvelles perturbations.

Les interactions existant entre le climat, la biosphère, les cycles biogéochimiques et l'utilisation des sols constituent aujourd'hui une source majeure d'incertitude pour la simulation des climats des prochains siècles. Cependant, l'hypothèse selon laquelle l'amplitude des perturbations serait de nature à annihiler, voire inverser les processus naturels d'absorption du CO₂ atmosphérique est à considérer sérieusement.

2. Aspects économiques et politiques

2.1. LES ACCORDS INTERNATIONAUX DANS LA LUTTE CONTRE LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

2.1.1. Une prise de conscience à partir des années 1970

Ce n'est que près d'un siècle après la mise en garde d'Arrhénius devant l'Académie des Sciences de Suède (voir encadré première partie, § 1.) que la reconnaissance du phénomène de l'effet de serre rejoint la sphère politique sur la scène internationale. Elle s'inscrit dans une prise de conscience générale des problèmes environnementaux à l'échelle planétaire.

Le tout premier signe de cette prise de conscience est la création du **Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE)** ou United Nations Environment Programme (UNEP) qui fit suite à la conférence de Stockholm de 1972. Cependant, il faut attendre Genève, en 1979, pour qu'une conférence internationale soit entièrement consacrée au climat (fig. 13).

La conférence de Vienne en **1985** et le **protocole de Montréal** en **1987** sur les substances qui portent atteinte à la couche d'ozone marquent un tournant important dans la volonté internationale de préserver l'atmosphère des activités anthropiques.

En **1987**, le rapport Brundtland pour la Commission mondiale sur l'environnement et le développement appelle à la protection de l'atmosphère et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Le développement durable y trouvera sa définition de référence : « Répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs ».

L'année suivante, en **1988**, au cours de la Conférence de Toronto, les scientifiques, responsables politiques et fonctionnaires de 48 pays et les Nations Unies lancent un appel en vue d'une réduction des émissions de CO₂ de 20 % pour l'an 2005.

C'est cette même année 1988 que l'UNEP et l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM ou WOM en anglais) décident de mettre en place un organisme intergouvernemental pour traiter de la problématique du changement climatique en les abordant selon trois thèmes :

- thème 1 : comprendre l'impact de l'augmentation de la concentration atmosphérique des gaz radiatifs sur le climat,
- thème 2 : étudier les impacts socio-économiques potentiels du changement climatique,
- thème 3 : définir les politiques d'intervention et d'adaptation au changement climatique.

Au mois de novembre 1988, le **Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat** (GIEC ou IPCC en anglais) se réunit pour la première fois à Genève (fig. 13). Les trois thèmes sus-cités sont pris en charge par trois groupes de travail. Depuis une

quinzaine d'années maintenant, les décideurs, les scientifiques et d'autres experts s'appuient largement les publications du GIEC - rapports spéciaux, documents techniques, méthodologies, directives - qui sont devenus des ouvrages de référence faisant autorité.

En mars 1989 à La Haye, à l'initiative des premiers ministres de la France, des Pays-Bas et de la Norvège, 24 chefs d'états s'engagent à lutter contre le renforcement de l'effet de serre. En juillet de la même année, le Groupe des 7 adopte une résolution pour faire face à la menace du changement climatique.

2.1.2. Une reconnaissance internationale au Sommet de la Terre

Vingt ans après Stockholm, en 1992, se tient à Rio de Janeiro le **Sommet de la Terre** (deuxième conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement). Elle donne lieu à la signature de deux conventions, l'une sur la préservation de la diversité biologique et l'autre sur le changement climatique.

Cette dernière, la « **Convention Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques** » (CCNUCC) ou « United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) » fut signée par 166 pays et entra en vigueur au printemps 1994. L'objectif ultime de cette convention, comme le précise l'article 2, « est de stabiliser [...] les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique ».

Comme ce fut déjà le cas auparavant, à l'occasion d'autres événements, le Sommet de la Terre n'est suivi d'aucune mesure précise relative au changement climatique de la part des pays signataires. Cependant, ce dernier pose un jalon historique qui ouvre la voie à la véritable prise en compte de ce problème à l'échelle internationale. Ainsi, la Convention Cadre sur le Climat est la première étape officielle instituant le CO₂ comme substance cible dans la lutte contre l'effet de serre, alors qu'il n'était pas jusque là considéré comme un polluant. D'autre part, la Convention a encouragé la création de nombreuses Organisations Non Gouvernementales (ONG), basées sur les principes fondamentaux de protection de l'environnement que le Sommet de la Terre a permis de définir.

À partir de 1995, la Conférence des Parties (CdP ou CoP en anglais) qui est l'organe suprême de la Convention Climat, s'est réunie périodiquement afin de définir plus strictement les objectifs et les conditions de leur mise en œuvre (fig. 13).

Le Mandat de Berlin, en **1995**, permet d'adapter les engagements de réduction des émissions de gaz à effet de serre aux différents groupes des Parties de la Convention. Il établit que seuls les pays de l'annexe I - principaux responsables de l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère - doivent s'engager à stabiliser en 2000 leurs émissions au niveau de 1990.

2.1.3. Une affirmation des engagements : le Protocole de Kyoto

En 1997, à Kyoto, les Parties à la Convention se réunissent pour la troisième fois (COP3, troisième Conférence des Parties à la Convention), afin de négocier les objectifs quantifiés de réduction des émissions de gaz radiatifs.

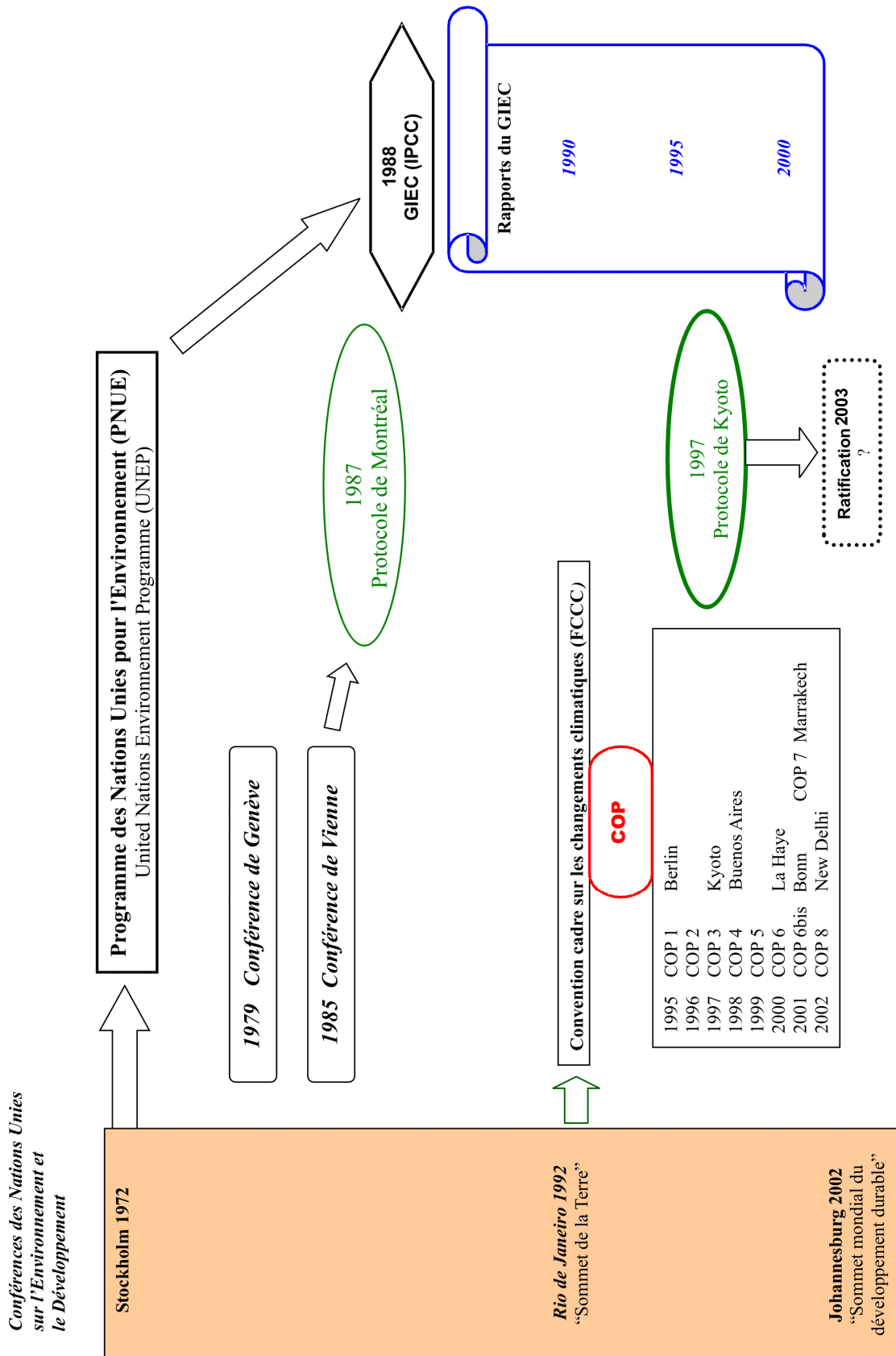


Fig. 13 - Événements et dates clés du dossier changement climatique.

À l'issue de cette Conférence, prend forme un accord entre les Parties à la Convention qui donnera lieu au **protocole de Kyoto**. Ce dernier entérine un engagement des Parties* consistant en la réduction de leur émissions de gaz à effet de serre sur la période 2008-2012.

Six gaz - contre trois prévus initialement au Sommet de la Terre de 1992 - sont pris en compte et constituent le « panier » de Kyoto, à savoir le dioxyde de carbone ou gaz carbonique (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote ou oxyde nitreux (N₂O), l'hydrofluorocarbure (HFC), perfluorocarbure (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF₆)**.

À l'échéance de 2012, les émissions devront globalement avoir baissé de **5,2 %** par rapport à la valeur choisie en référence de 1990 et l'annexe B du protocole contient les engagements chiffrés auxquels chaque Partie s'est engagée.

En décembre 1997, les États-Unis sous l'Administration Clinton ont signé le Protocole de Kyoto s'engageant ainsi à réduire de 7 % des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2008-2012 par rapport au niveau de 1990***.

L'Union européenne, quant à elle, s'est engagée à une réduction de 8 %, au lieu des 15 % annoncés avant la COP3. Elle a procédé, en 1998, à la répartition de cet objectif entre les quinze états membres (tabl. 3). Les pays les plus industrialisés et économiquement performant se voient demander les efforts les plus importants. En revanche, les pays les moins avancés sont autorisés à augmenter leurs émissions pour ne pas nuire à leur développement économique. Pour ce qui est de la France, elle devra, en 2012, avoir ainsi stabilisé ses émissions à la hauteur de celles de 1990.

Répartition adoptée le 17 juin 1998 à Luxembourg par le Conseil pour 6 gaz à effet de serre			
États membres	Pourcentage	États membres	Pourcentage
Belgique	- 7,5 %	Luxembourg	- 28 %
Danemark	- 21 %	Pays-Bas	- 6 %
Allemagne	- 21 %	Autriche	- 13 %
Grèce	+ 25 %	Portugal	+ 27 %
Espagne	+ 15 %	Finlande	0 %
France	0 %	Suède	+ 4 %
Irlande	+ 13 %	Royaume Uni	- 12,5 %
Italie	6,5 %		
Union européenne		- 8 %	

Tabl. 3 - Répartition des efforts à consentir pour les 15 États membres de l'Union européenne (d'après CITEPA, 2001b).

Pour entrer en vigueur et avoir ainsi force de loi internationale, le protocole de Kyoto doit être ratifié par au moins 55 pays Parties à la Convention sur les changements climatiques. Parmi ces pays, devront figurer des pays développés dont les émissions

* Aujourd'hui, en juillet 2002, nombre de signatures : 84, nombre de ratification/accession : 75 (dont 52 pays de l'Annexe I). NB : certaines ratifications/accessions ne passent pas systématiquement par l'étape de la signature.

** Il existe d'autres gaz à effet de serre, comme le monoxyde de carbone (CO), les composés organiques volatils non méthaniques (COVNM), le NOx ou le SO₂, qui participent indirectement à l'accroissement de l'effet de serre en tant que polluants primaires intervenant dans la formation de polluants secondaires contribuant à l'effet de serre comme l'ozone ou les aérosols. Ils n'entrent pas cependant pas dans le « panier » de Kyoto et ne sont pas assortis d'un PRG par les experts du GIEC.

*** Malheureusement, quatre ans après, le nouveau président des États-Unis, Georges Bush, s'est prononcé, en mars 2001, contre le Protocole de Kyoto et a ainsi refusé d'honorer les engagements que son pays avait signés.

de dioxyde de carbone représentaient en 1990 au moins 55 % des émissions totales de ces pays à la même date (règle des 55/55, article 25 du protocole).

Pour atteindre les objectifs fixés de réduction de leur émissions de gaz à effet de serre, les pays signataires du protocole devront mettre en œuvre des politiques nationales adaptées (actions menées « à domicile » dans chacun des pays, encore appelées « actions domestiques »). Par ailleurs, en complément de ces mesures, le protocole de Kyoto prévoit la possibilité de recourir à des mécanismes de flexibilité qui introduisent une marge de souplesse dans la réalisation des objectifs :

- **l'échange international de permis d'émission** : cette disposition permet de vendre ou d'acheter des droits à émettre entre pays industrialisés. Ainsi, des pays ayant réduit leurs émissions au-delà de l'objectif convenu pourront céder leurs droits d'émission à d'autres pays qui ont des difficultés à atteindre leurs objectifs ;
- **l'activité conjointe**^{*} qui permet, entre pays développés ou en transition, de procéder à des investissements visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre en dehors de leur territoire national et de bénéficier des crédits d'émission générés par les réductions ainsi obtenues ;
- **le mécanisme de développement propre** (MDP) qui repose sur le principe d'attribution de « Certificats de Réductions d'Émissions » (CRE^{**}) à des projets réalisés entre des entités des pays industrialisés et des pays en développement après 2000. Ces projets localisés dans des pays en développement devront prouver qu'ils contribuent à diminuer la concentration atmosphérique en GES, et les CRE seront attribués proportionnellement à cette contribution. Ces CRE fonctionnent comme des permis d'émissions : ils sont échangeables et utilisables par les entités du nord pour la réalisation des objectifs de réduction d'émission fixés par le Protocole. Comme les autres permis d'émissions, les CRE pourront donner lieu à rémunération et constituer une valeur ajoutée d'un projet.

L'objectif de ces mécanismes flexibles est de réduire le coût marginal d'abattement des réductions des émissions, en délocalisant les efforts là où ils sont les moins coûteux. On estime ainsi que, sans marché carbone, le coût serait entre 67 et 584 dollars E.U./tonne C, alors qu'avec marché, le prix devrait être situé entre 20 et 50 dollars E.U./tonne C. Le marché carbone global est estimé à 14-65 milliards de dollars E.U./an, plus réaliste entre 10 et 20 milliards de dollars E.U./an. L'offre attendue^{***}, tous mécanismes confondus, est évaluée entre 621 millions et 1,32 milliards de tonnes de C, dont 265-723 millions de tonnes C/an pour le MDP (FAO, 2002).

La **Conférence de la Haye** (COP6), en **2000**, se solde par un échec. Elle marque la divergence majeure entre européens et américains qui ne réussissent pas à trouver de compromis sur des questions telles que l'engagement des pays en voie de développement, le recours aux marchés d'échanges de permis et les contraintes liées au non-respect des engagements (compliance).

^{*} Ce mécanisme découle de « la Mise en Oeuvre Conjointe » (MOC) qui relève de la Convention Climat de 1992 (Article 4, § 2) dans lequel elle est spécifique des politiques et mesures. La MOC ouvre la voie à des mécanismes de coopération entre pays investisseurs et pays hôtes pour des projets d'atténuation du changement du climatique. C'est le Mandat de Berlin en 1995 qui élargit la MOC à la réalisation de projets (C. Megevant, 2001). Des précisions sur cette question sont données en Deuxième partie, B, III.

^{**} Depuis la 7^e CdP, on sait que le terme « CRE » sera réservé aux réductions d'émissions. Pour la fixation du carbone, les unités obtenues dans le cadre des activités MDP seront des unités distinctes, qui pourraient être basées sur le principe des crédits temporaires mais aucune décision n'a encore été prise à ce sujet.

^{***} La Banque mondiale estime la demande pour les permis d'émissions de 0,7 à 1,3 milliard de tonnes de C/an de 2008 à 2012.

Pour sauver le protocole de Kyoto, une nouvelle Conférence est organisée à Bonn (COP6bis) en juillet 2001. Cependant, en mars de cette même année, le Président Bush, nouvellement élu, annonce le retrait de son pays du protocole de Kyoto. Ce n'est donc qu'en tant qu'observateur que les États-Unis participeront à cette Conférence. Contre toute attente, un accord est annoncé le 23 juillet 2001. Mais certaines ONG dénoncent alors un affaiblissement de la portée du protocole qui étend l'éligibilité des activités de fixation du carbone pour le respect des engagements.

L'accord politique de la conférence de Bonn (COP6bis) est enfin traduit en termes techniques et juridiquement contraignants lors de la **Conférence de Marrakech** (COP7) en novembre **2001**.

Les textes sur l'observance (respect des obligations) ont pu être conclus mais des difficultés ont été rencontrées quant aux mécanismes de flexibilité et aux méthodes d'élaboration et de vérification des inventaires nationaux. Des assouplissements ont dû être consentis au Japon et à la Russie qui s'est vue attribuer des droits d'émission excédant de beaucoup ses émissions actuelles (« air chaud » russe qui sera mis sur le marché). En effet, les États-Unis ayant annoncé qu'ils ne ratifieraient pas le protocole de Kyoto, la ratification de ces deux pays étaient devenue indispensable pour atteindre le chiffre de 55 % des émissions nécessaire à l'entrée en vigueur du Protocole.

Si l'on a pu, un temps, espérer que l'entrée en vigueur du protocole de Kyoto interviendrait dix ans après Rio, au moment de la tenue du **Sommet Mondial du Développement Durable** (Johannesburg, septembre 2002), beaucoup font, aujourd'hui, preuve de pessimisme sur cette question.

Johannesbourg : le bout du tunnel de Kyoto ? pas sûr...

Barely a month before the crucial Johannesburg summit which is expected to review the advancement since the historic Rio Earth Summit in 1992, chairman of Inter-governmental Panel on Climate Change (IPCC) Dr R K Pachauri today ruled out any breakthrough from the meeting.

The World Summit on Sustainable Development (WSSD), to begin in the last week of August, is expected to find out progress made in various fields since the Rio summit. Furthermore, it will discuss how successful the countries are in implementing Kyoto Protocol and how to overcoming the shortcomings, if there is any. In fact, some of the advanced nations including the US had refused to implement Kyoto on the ground that it would affect their economy directly.

However, talking to Deccan Herald on the sidelines of a CII meeting on environment, Dr Pachauri said that he is not hopeful about the outcome of the summit. « The meeting will focus on issues such as poverty and education which are not related to environment directly. I don't think it will yield much » he said.

Deccan Herald, Tuesday, July 9, 2002

2.1.4. Et demain...

La création d'une bourse mondiale devrait permettre à partir de 2008 d'autoriser et de favoriser les échanges entre les divers permis d'émission et la mise en oeuvre des mécanismes de flexibilité. Mais, dès 2005, les négociations concernant la deuxième période d'engagement (2013-2017) devraient s'engager avec, en point de mire, les conditions d'une adhésion des USA et l'engagement éventuel de pays en développement dont la Chine et l'Inde, gros émetteurs de gaz à effet de serre.

Annexe I, Annexe II, Annexe B... faisons le point

Pays/Parties de l'annexe I (annex I countries/Parties)

Groupe des 36 pays inclus dans l'annexe I (comme amendé en 1998) de la Convention cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique, incluant tous les pays développés de l'OCDE (Organisation pour la coopération et le développement économique) et les pays dits à économies en transition. Par défaut, les autres pays sont référés comme les Pays/Parties ne figurant pas à l'annexe I. Selon les articles 4.2 (a) et 4.2 (b) de la Convention, les pays de l'annexe I se sont spécifiquement engagés dans l'objectif de ramener individuellement ou conjointement leurs émissions de gaz à effet de serre en 2000 à leurs niveaux de 1990.

Pays/Parties ne figurant pas à l'annexe I (non-annex I countries/Parties)

Les pays ayant ratifié ou ayant accédé à la Convention Climat et qui ne sont pas inclus dans l'annexe I de la Convention.

Pays de l'annexe II (annex II countries)

Groupe des pays inclus dans l'annexe II de la Convention Climat incluant tous les pays développés de l'OCDE. Selon l'article 4.2 (g) de la Convention, ces pays doivent fournir des ressources financières pour aider les pays en développement à respecter leurs obligations telles que la préparation de leurs rapports nationaux. Les pays de l'annexe II doivent également faciliter le transfert de technologies respectueuses de l'environnement vers les pays en développement.

Pays/Parties de l'annexe B (annex B countries/Parties)

Groupe des 39 pays inclus dans l'annexe B du Protocole de Kyoto qui ont accepté un objectif chiffré d'émissions de gaz à effet de serre en 2008-2012 par rapport à leurs niveaux de 1990 (depuis une réduction de 8 % pour l'UE jusqu'à une augmentation de 10 % (Islande). Cela inclut tous les pays de l'annexe I (comme amendé en 1998) sauf la Turquie et le Belarus.

Pays/Parties ne figurant pas à l'annexe B (Non-annex B countries/Parties)

Les pays qui ne sont pas inclus dans l'annexe B dans le Protocole de Kyoto.


N.B : En pratique les pays de l'annexe I de la Convention et les pays de l'annexe B du Protocole de Kyoto sont quasiment identiques. Cependant, pour être précis, ce sont les pays de l'annexe I qui peuvent investir dans les projets JI et CDM ou qui peuvent accueillir des projets JI et les pays qui ne figurent pas à l'annexe I qui peuvent accueillir des projets CDM même si se sont les pays de l'annexe B qui se sont engagés à des objectifs fixés d'émissions de gaz à effet de serre. Le Belarus et la Turquie appartiennent à l'annexe I mais ne figurent pas à l'annexe B. La Croatie, le Liechtenstein, Monaco et la Slovénie sont listés dans l'Annexe B mais pas dans l'annexe I.

Glossaire du troisième rapport d'Évaluation du GIEC, 2001

L'actualité des engagements au jour le jour

La complexité des accords et de leurs modalités rend difficile la lecture de la scène politique actuelle et l'on doit souvent faire le constat de contradictions ou de confusions parmi les informations diffusées dans la presse grand public.

Outre l'ensemble des textes relatifs aux accords internationaux, on trouve sur le site Web de la Convention Cadre des Nations unies sur les Changements Climatiques (www.unfccc.int), une base de données mise régulièrement à jour présentant l'état d'avancement des ratifications et signatures des différents pays sous la forme de fiches synthétiques (adresse : <http://unfccc.int/resource/country/index.html>). Des liens vers les sites officiels de chaque pays sont également donnés.

France 			
<ul style="list-style-type: none"> ▶ Ratification of the Convention Date of signature 13 June 1992 	Date of ratification 25 March 1994	Type R	Entry into force 23 June 1994
<ul style="list-style-type: none"> ▶ The Kyoto Protocol Date of signature 29 April 1998 (*) 	Date of ratification or accession 31 May 2002	Type Ap	
<ul style="list-style-type: none"> ▶ National climate change web site ▶ Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement 			
<ul style="list-style-type: none"> ▶ On-line national communication 	English First Second		
<ul style="list-style-type: none"> ▶ Executive summary of the first national communication ▶ In-depth review of the first national communication 	Français First Second		Third
<ul style="list-style-type: none"> ▶ In-depth review of the second national communication 	Summary pdf html		
<ul style="list-style-type: none"> ▶ Contact point for ordering national communication ▶ National focal point - html - pdf 	Summary pdf html		

* The French Republic reserves the right, in ratifying the Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, to exclude its Overseas Territories from the scope of the Kyoto Protocol.

2.2. CARACTÉRISATION DES ÉMISSIONS ANTHROPIQUES : ÉVALUATIONS ET INVENTAIRES

Contrairement aux gaz portant atteinte à la couche d'ozone qui sont spécifiques de quelques activités industrielles et qu'il a été assez facile de remplacer par des substituts depuis leur interdiction (protocole de Montréal), limiter les émissions de gaz à effet de serre est un problème beaucoup plus complexe. En effet, les émissions sont liées à un très grand domaine d'activités qui touchent au fondement même du modèle sociétal des pays développés.

Nous l'avons vu, l'agriculture et plus généralement l'utilisation des terres contribuent à l'augmentation des émissions. Certains processus industriels tels que la production de ciment, l'extraction et le traitement des hydrocarbures, la mise en décharge ou l'incinération des déchets, la réfrigération, l'utilisation de solvants constituent autant de sources d'émission de gaz à effet de serre. Mais, ce sont les processus qui consomment de l'énergie fossile qui, globalement, sont la composante essentielle du problème. Ils sont omniprésents : production d'électricité, chauffage, transport, industries aux besoins énergétiques importants pour leurs activités de production... Tout cela génère des effluents, en quantité plus ou moins importante et avec des concentrations plus ou moins fortes de CO₂, premier des gaz à effet de serre.

On opère souvent une distinction entre les sources ponctuelles, importantes et concentrées et les sources diffuses de tailles limitées et à effluents plus dilués. Dans cette approche, les sources ponctuelles relèvent alors plutôt d'installations industrielles tandis que les diffuses sont davantage catégorisées dans le domestique. Mais on pourrait également considérer les sources suivant leur étendue géographique : les sources ponctuelles sont alors opposées aux sources surfaciques (espaces cultivées, circulation urbaine) et aux sources linéaires (axes de circulation, gazoducs). Dans une autre approche, on pourrait distinguer les sources fixes (habitat, industries) et les sources mobiles (véhicules). Enfin, il est également possible de classer les sources suivant les secteurs d'activité dont elles relèvent.

En fait, une classification trop simple ne peut se suffire à elle-même et n'est pas assez extensive pour intégrer toutes les sources existantes. Évaluer de façon rigoureuse les émissions d'un système considéré est donc une opération difficile. Il est évident que plus le système est grand ou complexe, plus les incertitudes sont fortes et plus il est nécessaire de disposer d'une méthode élaborée. Cela est le rôle des inventaires d'émissions.

Un **inventaire d'émission** est la description qualitative et quantitative des rejets de certaines substances dans l'atmosphère issus de sources anthropiques et/ou naturelles. Un inventaire d'émission doit présenter les qualités suivantes :

- complet : toutes les sources doivent être prises en compte et les émissions renseignées,
- cohérence : la série obtenue sur la période étudiée doit être homogène, impliquant des méthodes identiques et des données homogènes,
- comparabilité : l'inventaire doit être réalisé au moyen d'une méthodologie reconnue et documentée, afin d'assurer la comparabilité des résultats,
- traçabilité : les informations fournies doivent être suffisamment détaillées pour permettre à un tiers de reconstruire les émissions.

Ces qualités facilitent les opérations de validation et de vérification qui consistent à respectivement vérifier que l'inventaire a été réalisé conformément à la méthodologie annoncée et s'assurer que les émissions obtenues reflètent, à peu près bien la réalité.

CITEPA, 2000

L'élaboration d'un inventaire d'émission peut être motivée par différents objectifs. Les émissions inventoriées, naturelles ou anthropiques, constituent les valeurs d'entrée pour les modèles élaborés par les scientifiques. La connaissance des quantités de certaines substances rejetées dans l'atmosphère est également une étape indispensable à toute politique de protection de l'environnement. Les politiques doivent, en effet, pouvoir s'appuyer sur des données chiffrées aux fins d'orienter leur choix dans les processus décisionnels et définir les stratégies adaptées. Enfin, les inventaires sont indispensables aux agences ou organisations chargées d'exercer un contrôle sur les émissions.

Les modes de calculs diffèrent en fonction des objectifs que l'on s'est fixé et des contraintes inhérentes à chaque système considéré. Nous avons choisi de nous intéresser ici à deux systèmes d'échelle distincts : l'échelle d'un pays et l'échelle planétaire.

2.2.1. Les inventaires nationaux d'émission de gaz à effet de serre

a) Généralités et cadre des inventaires d'émission nationaux

Comme nous l'avons vu, l'objectif ultime de la Convention climat et de tous les instruments juridiques que la Conférence des Parties peut adopter, comme le protocole de Kyoto, est de parvenir à la stabilisation des concentrations des gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêcherait toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique.

Cet objectif passe nécessairement par la limitation des émissions des sources et l'augmentation de la capacité d'absorption des puits, qui ne peuvent être mis en évidence que par la mesure ou l'évaluation. La mesure directe des émissions et absorptions n'étant pas encore techniquement possible, la seule manière de les estimer passe par l'élaboration d'un inventaire fiable et complet.

L'ensemble des pays que comptent les Nations Unies, c'est-à-dire la quasi-totalité des pays dans le monde*, ont montré leur désir de s'engager dans la lutte contre le réchauffement climatique en procédant à la ratification de la Convention climat.

L'article 4 de la Convention stipule que « toutes les Parties, tenant compte de leurs responsabilités [...], établissent, mettent à jour périodiquement, publient et mettent à la disposition de la Conférence des Parties [...] des inventaires nationaux des émissions anthropiques par leurs sources et de l'absorption par leurs puits de tous les gaz à effet de serre non réglementés par le Protocole de Montréal, en recourant à des méthodes comparables ».

Ces inventaires doivent être fournis au secrétariat de la Convention dans les « communications nationales » auxquelles sont contraints l'ensemble des parties (ann. I et non-ann. I).

* Les Nations Unies comptent 185 membres. Ce nombre est souvent présenté comme le nombre total de pays dans le monde. Cependant, quelques pays ont choisi de ne pas intégrer l'organisation. Au total, le monde compterait 190 ou 192 pays selon les sources (192 : chiffre pour l'année 2000).
La Convention climat a été ratifiée par 186 Parties : les 185 pays membres des Nations Unies plus l'Union Européenne.

Afin de les aider dans cette tâche, le GIEC a mis au point des guides méthodologiques : les « Lignes directrices révisées du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre (1996) ou Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories ». Les parties sont ainsi conviées à employer ces directives dans la préparation des inventaires nationaux.

Cependant, les Parties incluses à l'annexe I de la Convention (pays développés) n'ont pas les mêmes obligations que les Parties non incluses à l'annexe I (pays en voie de développement).

Ainsi, seuls les pays de l'annexe I sont tenus de soumettre des inventaires annuels de gaz à effet de serre depuis l'année de référence (en général, l'année 1990) jusqu'à l'année n-2 (par exemple, dans leur soumission de 2002, les pays de l'annexe I fournissent les données depuis l'année de référence jusqu'à l'année 2000 incluse).

Par ailleurs, à partir de l'année 2000 et selon une décision de la 5^e Conférence des Parties (COP5), les pays de l'annexe I doivent se conformer aux « revised UNFCCC reporting guidelines » qui prévoient l'utilisation d'un format commun de présentation (CRF, common reporting format) ainsi qu'aux guides pour la revue technique (guidelines for the technical review).

b) Outils développés par le GIEC et la CCNUCC pour l'élaboration des inventaires nationaux

- **Lignes directrices du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre - Version révisée 1996**

En 1995, paraît la première version des « Lignes directrices », ce qui constitua une étape importante dans la définition des méthodologies d'élaboration des inventaires nationaux. Des améliorations furent ensuite apportées permettant la parution, un an plus tard, de la version révisée (GIEC, 1996b). Plusieurs centaines d'experts et d'utilisateurs ont dû être mis à contribution, bénéficiant de supports financiers de nombreux pays et d'organismes internationaux.

L'ouvrage se décompose en trois volumes distincts :

- instructions pour la présentation de l'inventaire des gaz à effet de serre ;
- manuel pour l'inventaire des gaz à effet de serre ;
- manuel de référence pour l'inventaire des gaz à effet de serre.

Ces trois volumes contiennent et fournissent l'ensemble des informations nécessaires pour programmer, effectuer et présenter les résultats d'un inventaire national conformément au système adopté par le GIEC. Ils incluent des conseils spécifiques pour inventorier les émissions et les absorptions selon six secteurs : **énergie** (consommation des combustibles des différents secteurs socio-économiques), **procédés industriels** (hors part énergie), **utilisation de solvants et autres produits**, **agriculture**, **changement d'affectation des terres et foresterie**, **déchets**.

Développées pour un large éventail d'utilisateurs, les lignes directrices possèdent un grand degré de flexibilité dans l'évaluation des données d'inventaire. Elles offrent, en effet, la possibilité d'utiliser différentes méthodes, notamment dans les types de

facteurs d'émission. Cette flexibilité peut se solder par des différences dans des évaluations d'émission d'un secteur donné. Par ailleurs, les méthodes incluses dans les directives ne facilitent pas toujours une évaluation et une restitution complète des émissions et des absorptions.

Les Lignes directrices s'appliquent à la constitution ainsi qu'à la communication des inventaires nationaux de gaz à effet de serre établis en vertu de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et non en vertu du Protocole de Kyoto. Cependant, lors la Conférence qui s'est tenue à Kyoto en 1997, la COP a réaffirmé que les « Lignes directrices révisées » devaient être utilisés dans le calcul des objectifs de réduction des émissions pour la première période d'engagement.

Facteur d'émission

Un facteur d'émission correspond au taux d'émission estimé d'un polluant donné pour une source donnée. Pour chaque type de source, de combustible et de technique utilisée, on détermine des facteurs d'émission. Ils tiennent compte de données spécifiques relatives à chaque secteur et/ou à des spécificités nationales. Dans le cas particulier du CO₂ résultant de la combustion d'énergie fossile, des facteurs d'émission sont donnés en kg CO₂/GJ. Pour les autres sources, non relatives à l'utilisation de l'énergie, les facteurs d'émission sont déterminés au cas par cas.

- **Guides de bonnes pratiques et de gestion d'incertitude dans les inventaires nationaux de gaz à effet de serre (Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories)**

À compter de 2001, la constitution des inventaires nationaux doit également suivre les directives des « Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories ». Ces guides ont été élaborés à la demande d'un organe de la Convention, le SBSTA* (Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice), afin de compléter les « Lignes directrices » dans lesquelles certaines limites et imperfections avaient été mises en évidence.

L'objectif reste le même : aider des pays à produire leurs inventaires avec le plus de rigueur possible et cela dans un souci d'harmonisation d'un pays à l'autre. Pour chaque secteur défini par le GIEC (voir les « Lignes directrices »), des conseils sont notamment fournis sur le choix des méthodes les plus appropriées, des facteurs d'émission et d'autres données nécessaires, et ce en fonction des circonstances nationales. Selon la prescription du SBSTA, ces guides devaient être utilisés dans les soumissions à compter de 2001. Cependant, jusque là, seuls quelques pays les ont employés.

Les pays de l'annexe I ont préparé et ont soumis à la Conférence des Parties leurs inventaires depuis 1994 et sur une base annuelle depuis 1996. La qualité et la transparence de ces inventaires ont beaucoup différé d'un pays à l'autre. Afin d'améliorer l'adéquation et la fiabilité des données, la COP a adopté en 1999 des guides révisés pour les comptes rendus des inventaires annuels (reporting guidelines) et des guides pour la revue technique des inventaires (review guidelines) des pays développés.

* La Convention Climat dispose d'un organe censé trancher sur les questions techniques relatives à l'application de la Convention : l'Organe subsidiaire chargé de fournir des avis scientifiques et technologiques (SBSTA - Subsidiary Body on Scientific and Technological Advice).

- **Guides de la CCNUCC pour la restitution des inventaires (UNFCCC reporting guidelines)**

Dans le même souci d'harmonisation et pour compléter les « Lignes directrices » qui s'étaient avérées insuffisamment précises, la COP a adopté, en 1999, des guides plus complets pour la restitution des inventaires (« UNFCCC reporting guidelines »). L'objectif de ces guides est de faciliter notamment l'analyse des inventaires et leur examen postérieur par les experts.

Selon ces directives, les données des inventaires doivent être soumises selon le « rapport d'inventaire national » (NIR - national inventory report) et le « format de rapport commun » (CRF - common reporting format). Le NIR doit contenir l'information détaillée et complète sur l'inventaire national pour toutes les années depuis l'année de référence (1990) jusqu'à l'avant dernière année de la soumission (par exemple la soumission de l'année 2000 doit inclure des données des inventaires des années 1990 à 1998). Il ne peut seulement être édité qu'électroniquement et doit être mis à jour annuellement pour faire état d'éventuelles modifications. Les CRF, qui sont une partie du NIR, sont un ensemble normalisé de tables pour rapporter les évaluations des émissions/absorptions de gaz à effet de serre à un niveau global et doivent être soumis sous la forme électronique (en employant une application MS Excel) et en copie papier. La fourniture des données d'inventaire dans un format électronique standard facilite la manipulation et le traitement des données pour le processus de revue. La transparence des données et des modes de calcul permet des comparaisons plus aisées des données nationales avec les statistiques internationales.

- **Les guides de la CCNUCC pour l'examen technique des inventaires (review guidelines)**

Jusqu'en 2000, les inventaires nationaux ont été passés en revue au cours de l'examen des communications nationales préparées par les pays développés. En général, cet examen était pratiqué par un expert seulement et dans un laps de temps très limité (1 jour). Ce genre de revue n'était pas suffisant pour évaluer la qualité et la fiabilité des données rapportées. Ainsi, la COP a adopté en 1999 des lignes directrices pour l'examen technique des inventaires.

Le but de l'examen technique des inventaires est, entre autres, de s'assurer que la COP dispose d'une information adéquate sur les inventaires d'émission et d'aider les pays à améliorer la qualité de leurs inventaires. Le processus technique de revue comporte trois étapes, à savoir : un premier contrôle (complétude des données, format), une synthèse et une évaluation des données et une revue individuelle détaillée. À chaque stade du processus, les pays peuvent justifier des données présentées et fournir des informations additionnelles. Les résultats sont édités sur le site Web de la Convention selon un ensemble de tableaux et de graphiques qui permet de comparer les inventaires des différents pays.

- **Bases de données et outils informatiques**

Après une première base de données développée en 1995 suite aux premières soumissions des pays, un système plus sophistiqué pour gérer l'information a dû être mis au point à partir de l'année 2000 sur la base de la structure de CRF.

Grâce à cet outil, les données des inventaires sont mises à jour au cours du deuxième trimestre suivant la réception des soumissions (chaque année avant le 15 avril). Il est possible de consulter cette base sur le site dédié par la Convention (GHG Inventory database : <http://ghg.unfccc.int/>). Elle présente les données d'émission de CO₂, CH₄, N₂O, CO, NO_x, NMVOCs et SO₂ pour l'ensemble des pays figurant et ne figurant pas à l'Annexe I de la Convention de 1990 à 1997 (tableaux et graphiques). Ces dernières sont fournies selon les catégories de sources définies dans la version révisée de 1996 des Lignes directrices du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre.

c) Bilan

Parallèlement à l'amélioration des méthodologies permettant d'estimer les rejets de divers types d'émetteurs, des travaux d'harmonisation sont engagés depuis plusieurs années à l'échelle internationale. Ils impliquent non seulement le GIEC mais également de nombreux autres organismes comme la Commission Européenne, Commission Économique pour l'Europe des Nations Unies, EUROSTAT ou l'Agence Internationale de l'Énergie. Des révisions des guides du GIEC sont actuellement à l'étude et de nouvelles versions devraient être adoptées lors de la prochaine Conférence des Parties programmée pour le second semestre 2002 (la COP 8 devrait se dérouler du 23 octobre au 1^{er} novembre 2002 à New Delhi). Les résultats des inventaires d'émissions sont donc régulièrement révisés, y compris rétrospectivement, afin de maintenir des séries cohérentes. Les corrections peuvent alors concerner toute la série chronologique ou n'affecter ponctuellement que certaines années. Ceci explique les disparités que l'on peut observer, dans différentes soumissions, pour des émissions pourtant relatives à une même année.

Les « reporting guidelines » ont contribué à l'augmentation du nombre d'inventaires rapportés par les pays développés. Ce nombre était de 21 en 1998, 28 en 1999 et 32 en 2000. L'expérience acquise par les experts depuis les premiers guides méthodologiques a également permis d'améliorer la qualité de restitution des données. Ainsi, le nombre de pays développés fournissant le CRF dans leurs inventaires pour la période « année de référence - (n-2) » est passé de 5 en 2000 à 14 en 2001.

Qui réalisent les inventaires nationaux ?

En **France**, le CITEPA, centre technique interprofessionnel créé en 1961, remplit la fonction de Centre National de Référence. Il réalise donc annuellement, sous contrat avec le Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, un inventaire annuel des émissions de gaz à effet de serre sous la forme d'un rapport (voir notamment : CITEPA, 2001a). Les estimations des émissions sont déterminées et rapportées conformément aux prescriptions définies par l'UNFCCC (Lignes directrices de 1996). Plus précisément, les émissions sont estimées selon les méthodes préconisées ou des méthodes équivalentes et les données sont rapportées selon la structure définie dans les tables du format de rapport commun (CRF).

En **Europe**, l'Agence Européenne pour l'Environnement (AEE) publie, au mois d'avril de chaque année, un rapport présentant les résultats des inventaires d'émission des gaz à effet de serre dans l'Union européenne depuis 1990 (voir notamment : EEA, 2001). Ces résultats sont soumis au Secrétariat de la Convention-cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques par l'Union européenne en tant que Partie à la Convention. Ce rapport représente donc la base légale de la compilation de l'inventaire de la Communauté européenne. Les données contenues dans le dernier rapport ont été révisées et elles remplacent ainsi celles publiées dans les rapports antérieurs.

Aux **États-Unis**, c'est l'Agence de protection de l'environnement qui remplit cette fonction (Environmental Protection Agency, EPA).

Cependant, beaucoup de lacunes et de problèmes demeurent. Beaucoup de pays développés ne rapportent pas des inventaires complets selon les « reporting guidelines » et un certain nombre de pays à économies en transition n'ont toujours pas soumis leurs inventaires annuels.

Ainsi, malgré les nombreux outils développés par le GIEC et la CCNUCC, il reste impossible, à l'heure actuelle, de procéder à un simple cumul des données d'émission de chaque pays pour déterminer les émissions globales de CO₂ au niveau planétaire. Un mode de calcul différent et nécessairement simplificateur doit donc être adopté.

Le tableau 4 et les figures 14 à 24 présentent quelques données relatives aux émissions de CO₂ aux États-Unis, dans l'Union Européenne, ainsi que dans quelques pays de l'UE et plus particulièrement en France.

COMPARAISONS DES ÉMISSIONS DE CO₂ DE QUELQUES PAYS

Année 1999	t CO ₂ / habitant
Allemagne	10,1
Espagne	6,4
France	5,7
Italie	7,7
Royaume-Uni	9,1
Union européenne	8,6
États-Unis	17,3

Tabl. 4 - Comparaison des émissions de CO₂ par habitant pour l'Union européenne, quelques pays de l'UE et les États-Unis en 1999 (CITEPA, 2001b).

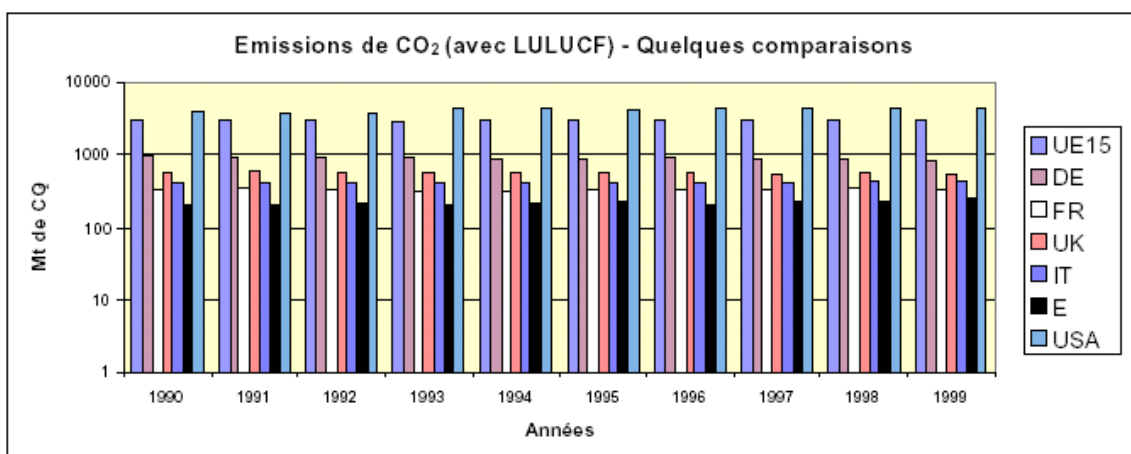


Fig. 14 - Comparaison des émissions de CO₂ (avec prise en compte des activités LULUCF) dans l'Union européenne, dans quelques pays de l'UE et aux États-Unis entre 1990 et 1999 (CITEPA, 2001b).

ÉMISSIONS DE CO₂ DANS L'UNION EUROPÉENNE

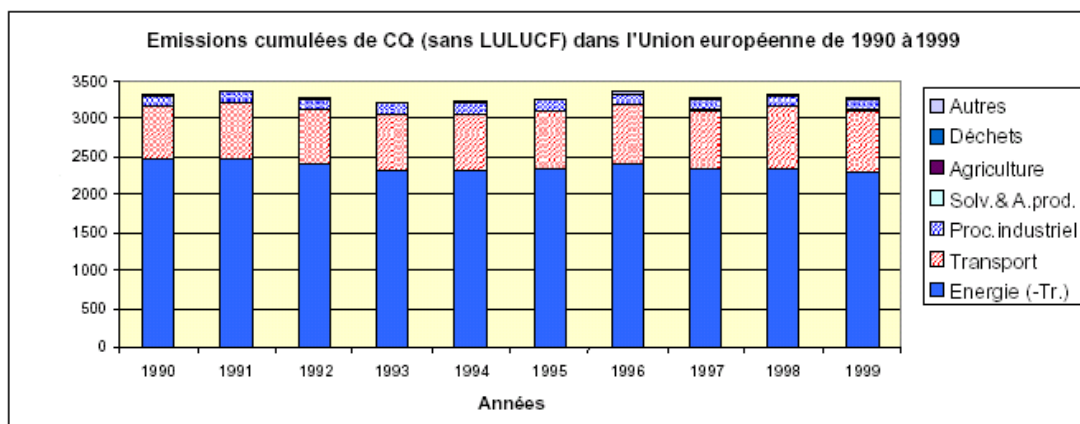


Fig. 15 - Émissions sectorielles cumulées de CO₂ (sans prise en compte des activités LULUCF) dans l'Union européenne entre 1990 et 1999 (CITEPA, 2001b).

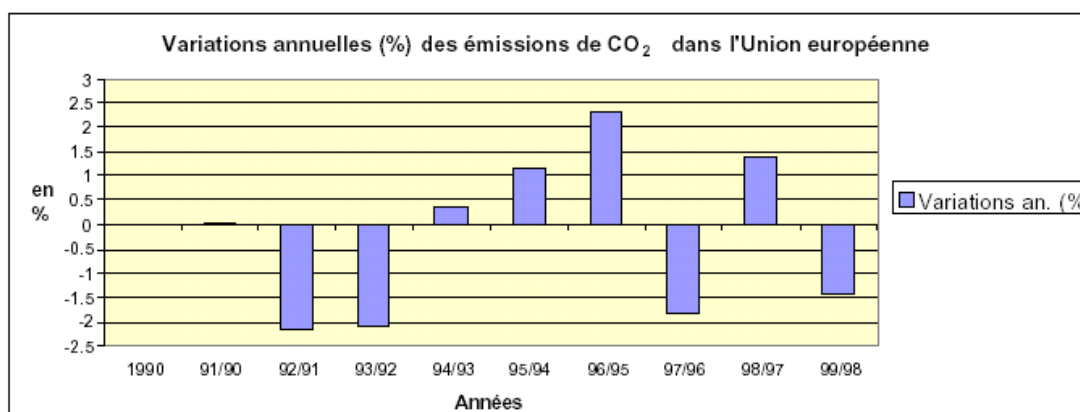


Fig. 16 - Variations annuelles des émissions de CO₂ dans l'Union européenne depuis 1991 (CITEPA, 2001b).

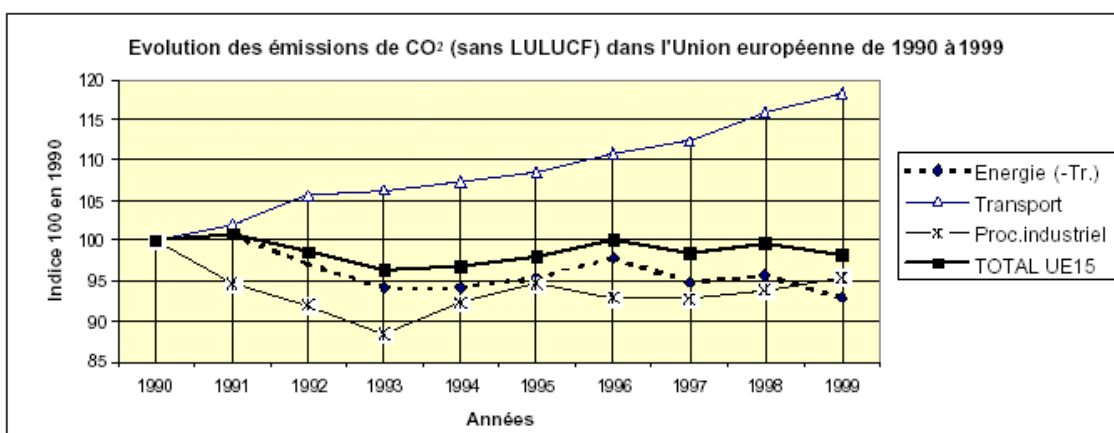


Fig. 17 - Évolutions sectorielles des émissions de CO₂ (sans prise en compte des activités LULUCF) dans l'Union européenne entre 1990 et 1999 (CITEPA, 2001b).

ÉMISSIONS DE CO₂ AUX ÉTATS-UNIS

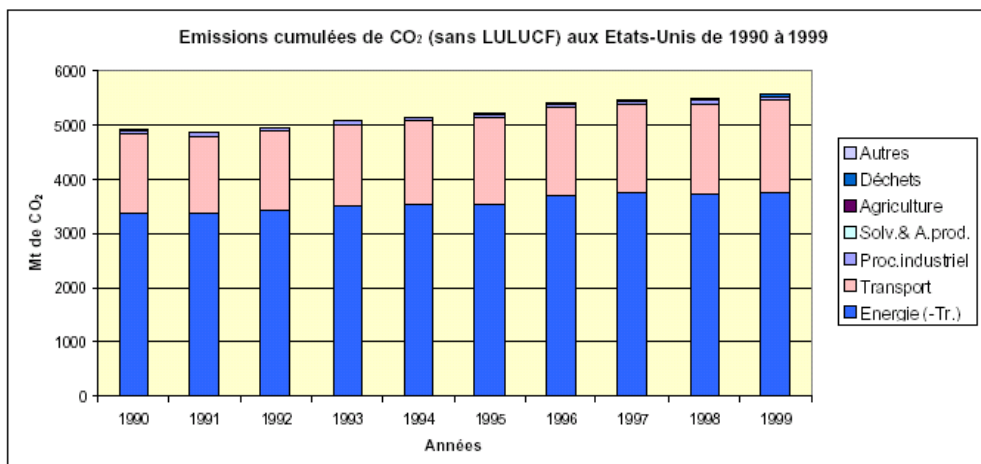


Fig. 18 - Émissions sectorielles cumulées de CO₂ (sans prise en compte des activités LULUCF) aux États-Unis entre 1990 et 1999 (CITEPA, 2001b).

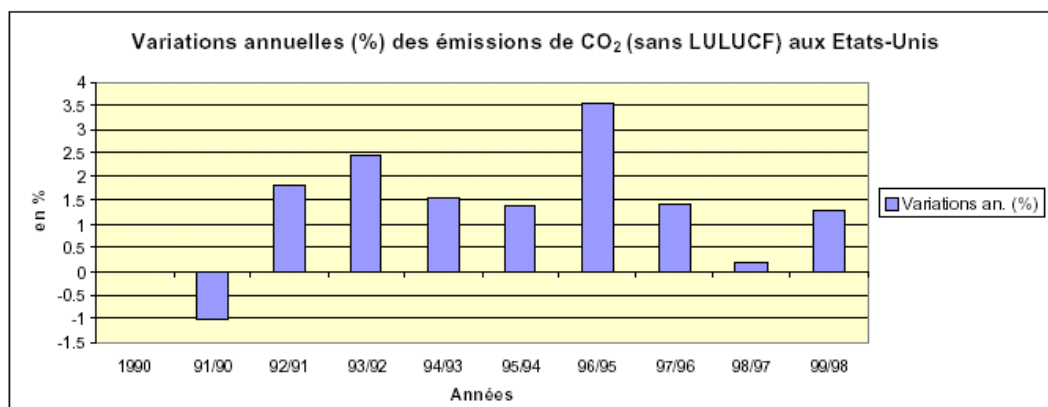


Fig. 19 - Variations annuelles des émissions de CO₂ (sans prise en compte des activités LULUCF) aux États-Unis depuis 1991 (CITEPA, 2001b).

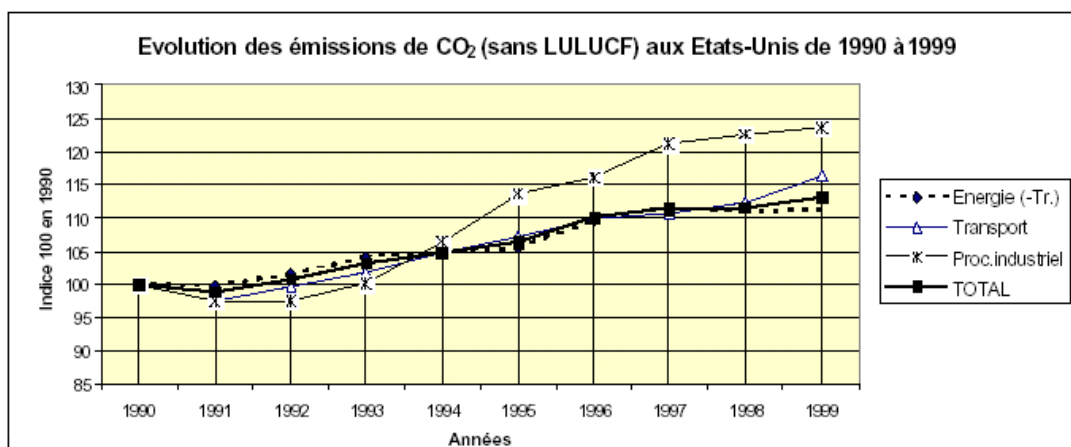


Fig. 20 - Évolutions sectorielles des émissions de CO₂ (sans prise en compte des activités LULUCF) aux États-Unis entre 1990 et 1999 (CITEPA, 2001b).

ÉMISSIONS DE CO₂ EN FRANCE (1)

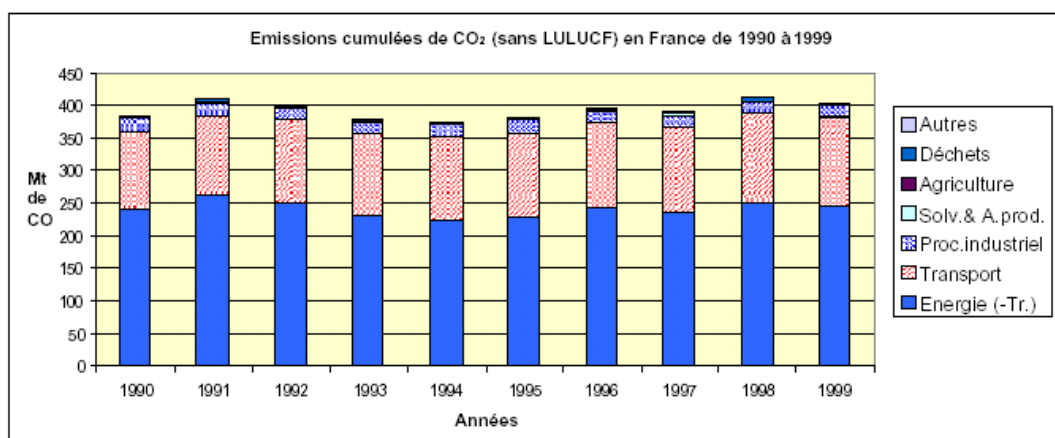


Fig. 21 - Émissions sectorielles cumulées de CO₂ (sans prise en compte des activités LULUCF) en France entre 1990 et 1999 (CITEPA, 2001b).

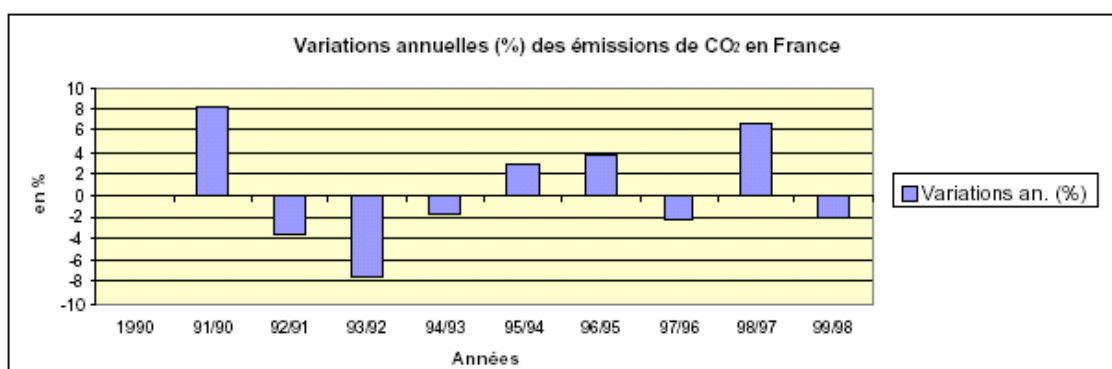


Fig. 22 - Variations annuelles des émissions de CO₂ en France depuis 1991 (CITEPA, 2001b).

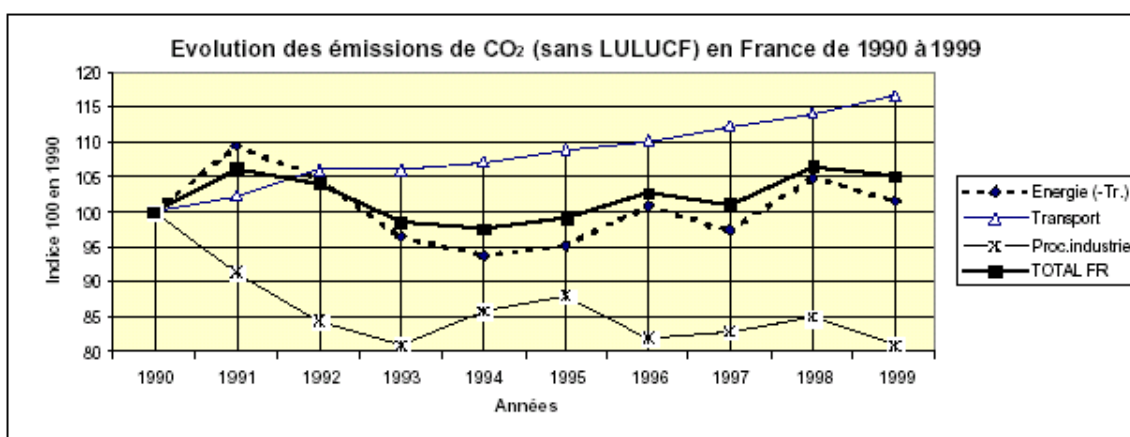


Fig. 23 - Évolutions sectorielles des émissions de CO₂ (sans prise en compte des activités LULUCF) en France entre 1990 et 1999 (CITEPA, 2001b).

ÉMISSIONS DE CO₂ EN FRANCE (2)

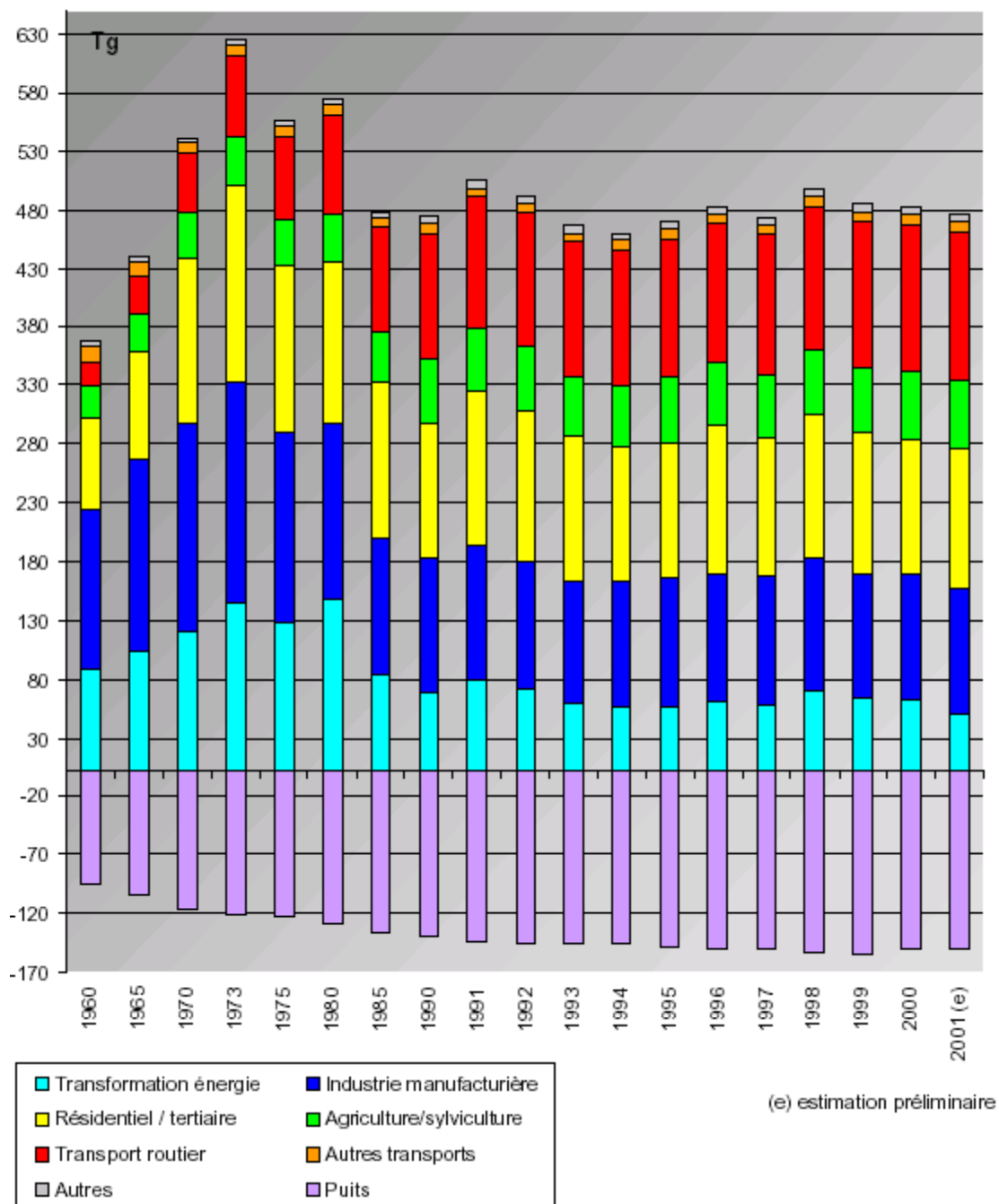


Fig. 24 - Émissions sectorielles cumulées de CO₂ (avec prise en compte des activités LULUCF) en France entre 1960 et 2001 (CITEPA, 2002).

2.2.2. Évaluation des émissions de CO₂ à l'échelle mondiale

Malgré l'absence d'inventaires nationaux fiables et complets d'émissions de gaz à effet de serre pour l'ensemble des pays du monde, il reste possible d'évaluer les émissions de CO₂ en se basant sur des statistiques rendant compte d'une part des changements d'affectation des terres et d'autre part de l'utilisation des combustibles fossiles. Ce moyen d'évaluation permet d'accéder, avec certes moins de précisions dans les données, non seulement aux émissions de CO₂ des différentes régions du monde pour les périodes récentes mais également pour des périodes plus anciennes, ce qui est riche d'enseignement en terme d'évolutions temporelles. Les sources d'informations et les modalités de calculs sont largement explicitées dans les différents rapports d'évaluation du GIEC et notamment le dernier auquel on pourra se reporter pour de plus amples explications (GIEC, 2001).

Les émissions liées aux activités anthropiques dans l'utilisation des terres sont calculées selon des modalités complexes à partir de nombreuses sources d'informations (textes historiques d'origines diverses, rapports, statistiques officielles...) rendant compte de l'affectation des terres dans les différentes régions du monde et les modifications subies d'une année sur l'autre. Les nouvelles technologies utilisées comme les images satellites ont permis d'améliorer grandement la fiabilité des données. Aujourd'hui, les informations proviennent principalement de la FAO (United Nations Food and Agriculture Organization). Les importantes bases de données qui ont été constituées permettent de rendre compte des quantités de CO₂ émises depuis environ 150 ans (fig. 25).

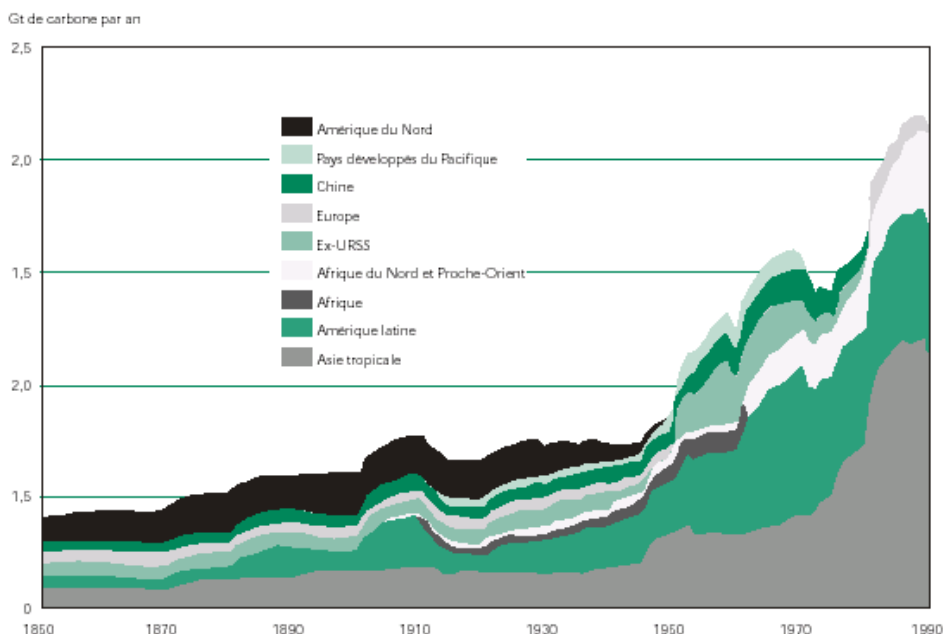


Fig. 25 - Émissions de carbone dérivant d'un changement d'utilisation des terres (FAO, 2001 d'après Houghton, 1999).

D'autre part, les publications contenant des statistiques historiques sur l'énergie ont permis d'estimer les émissions de CO₂ liées à l'utilisation des combustibles fossiles depuis environ 250 ans (fig. 26). De la même manière que pour les données liées aux modes d'affectations des terres, les bases de données reposent sur un travail très important de compilation de données historiques. Elles sont basées sur des statistiques annuelles relatives à la fois à l'exploitation et à l'utilisation des différents combustibles exploités (charbon, lignite, pétrole...) dans les différents pays ou régions du monde et aux flux d'import-export entre pays.

Grâce à d'autres sources comme, notamment, les statistiques de l'USGS (US Geological Survey) et du DOE (Département Américain à l'Énergie), il a également été possible d'évaluer les émissions relatives à la fabrication de ciment et au flaring (brûlage en torchères) pratiqué dans l'industrie pétrolière depuis plusieurs décennies (fig. 26).

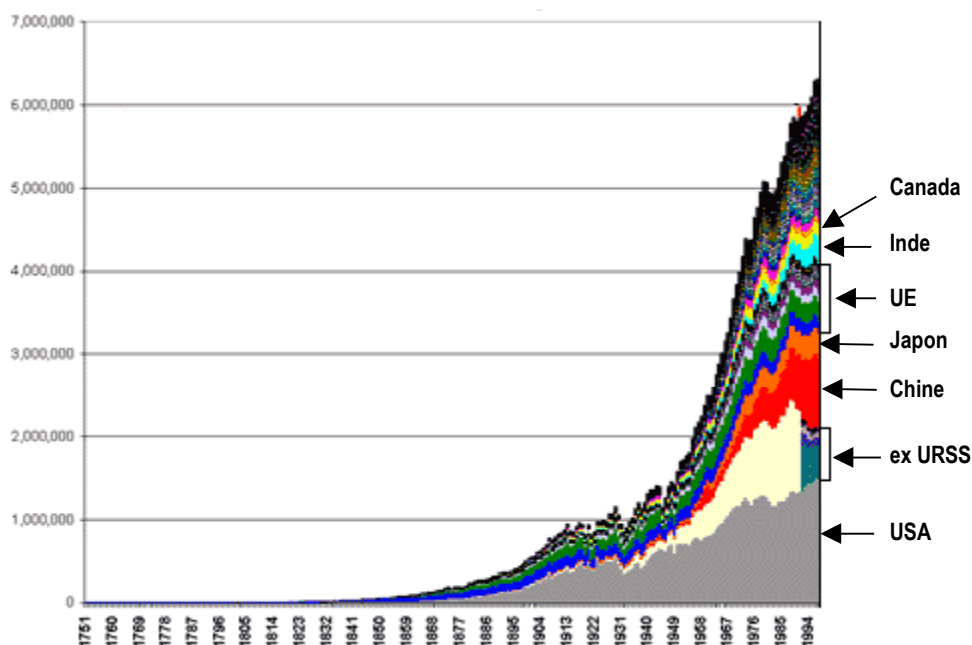


Fig. 26 - Évolution de 1751 à 1998 des émissions de CO₂ dérivant de l'utilisation des combustibles fossiles, de l'industrie cimentière et du flaring (brûlage de gaz en torche) pratiqué dans l'exploration et la production pétrolière (d'après Marland G. et al., 1998)

Pour ce qui concerne plus spécifiquement les émissions de CO₂ dues aux combustibles fossiles, l'Agence Internationale de l'Énergie est une référence en la matière. Elle publie périodiquement des rapports qui permettent de suivre l'évolution des émissions depuis une trentaine d'années dans plus de 140 pays ou régions par secteur et par type de combustibles (fig. 27 et IEA, 2002a).

Les émissions y sont calculées à partir des bases de données sur l'énergie dont dispose l'IEA et selon les préconisations des Lignes directrices du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre - version révisée 1996.

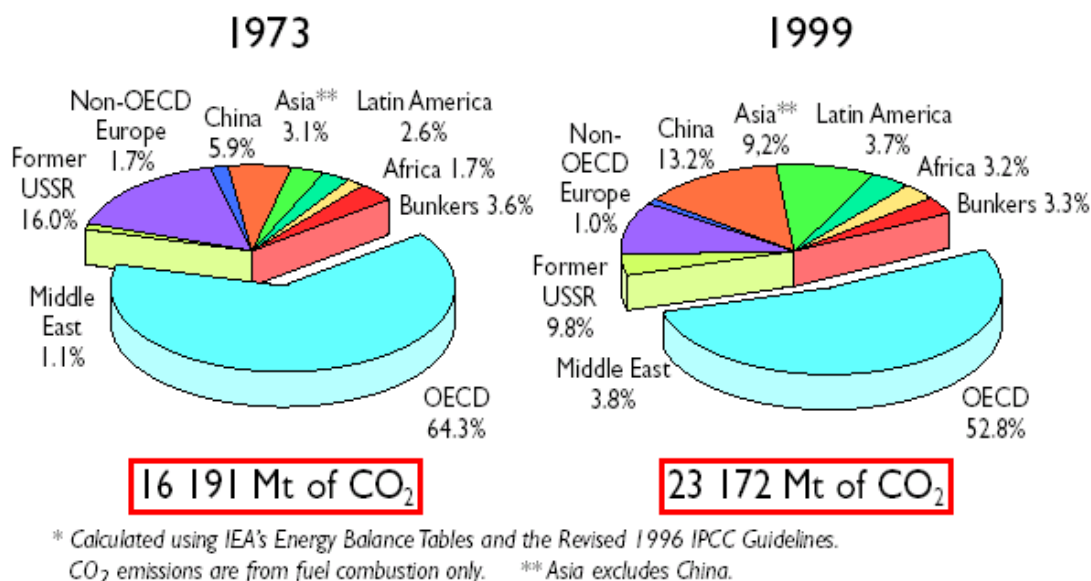


Fig. 27 - Comparaison des émissions de CO₂ dérivant de l'utilisation des combustibles fossiles dans les différentes régions du monde pour 1973 et 1999 (IEA, 2002a).

L'IEA (International Energy Agency)

L'IEA fut fondée le 15 novembre 1974 sous l'égide de l'OCDE pour implémenter un programme international sur l'énergie dont l'objectif est d'améliorer la sécurité énergétique de ses pays membres* (Allemagne, Australie, Autriche, Belgique, Canada, Corée du Sud, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Italie, Japon, Luxembourg, Nouvelle-Zélande, Norvège, Pays-Bas, Portugal, République Tchèque, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Turquie, USA). Cet objectif passe notamment par l'amélioration de l'efficacité énergétique ainsi que le développement et la recherche de sources d'énergie alternatives.

L'IEA a été mandatée par ses États membres pour fournir un travail analytique sur la place de l'énergie dans la problématique du changement climatique ainsi que les implications de la Convention Climat et du Protocole de Kyoto dans le secteur de l'énergie. Au-delà des politiques et des mesures nationales visant à limiter les émissions de gaz à effet de serre due à de l'énergie et le développement de technologies « propres », l'IEA travaille également à la coopération internationale (incluant les différents instruments de flexibilité de Kyoto) afin d'atteindre les objectifs de réduction des émissions aux coûts les plus bas possibles.

* La Commission de l'Union européenne participe également aux travaux de l'AIE.

D'importants progrès dans le domaine des inventaires nationaux doivent encore être réalisés dans de nombreux pays. Ces efforts seront indispensables au regard des engagements pris à Kyoto qui doivent pouvoir être contrôlés. Nous avons vu cependant que les statistiques disponibles sur l'énergie et les changements d'affectation des terres permettent d'évaluer globalement les émissions de CO₂ et de bien appréhender l'évolution suivie depuis plus d'un siècle. Nous allons maintenant nous intéresser aux projections qui sont réalisées pour les prochaines décennies ce qui est l'objet des scénarios d'émissions.

2.3. LES SCÉNARIOS D'ÉMISSION : QUEL CO₂ POUR LE XXI^E SIÈCLE ?

Distincts des prédictions qui sont de simples extrapolations de tendances historiques, les scénarios nous mettent au défi d'explorer différentes façons dont l'avenir pourrait se présenter et de cerner des enjeux et questions afin d'orienter les recherches futures. On les considère également comme des outils importants contribuant à la prise de meilleures décisions sur des questions qui auront des conséquences à long terme dans l'avenir.

Comme le postule le Troisième Rapport d'évaluation du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), « les effets des activités d'origine anthropique vont continuer à changer la composition de l'atmosphère tout au long du 21^e siècle » (GIEC, 2001). Est-il possible de mieux qualifier et quantifier ces changements ?

Les scénarios d'émission permettent d'appréhender de quelle façon et dans quelle mesure le développement socio-économique mondial est susceptible d'influer sur les émissions futures. Ils servent également de base aux experts chargés d'analyser l'évolution du climat et notamment sa modélisation. Au-delà, les scénarios d'émission aident à évaluer les impacts potentiels et permettent ainsi de définir les moyens de les atténuer ou de s'y adapter. Ils ne décrivent pas un avenir hautement probable mais un avenir possible. Divers scénarios peuvent ainsi décrire divers avenir également susceptibles de se réaliser.

La profusion de scénarios utilisables dans le contexte du changement climatique fait qu'il est parfois difficile d'avoir une vision claire à ce sujet. Il en existe à ce jour plusieurs centaines provenant de sources distinctes et très abondantes. Le but n'est pas ici d'être exhaustif, mais de donner quelques points de repères afin de mieux appréhender ces données fort utilisées mais souvent mal comprises. Nous donnerons à titre indicatif quelques grandes lignes sur les résultats. Cependant, il est important de garder à l'esprit que ces chiffres ont peu de sens sortis de leur contexte. Pour les utiliser dans un argumentaire, il est souhaitable d'avoir compris de quelles façons les valeurs ont été obtenues : depuis les hypothèses retenues jusqu'au mode opératoire employé. Si l'on souhaite aller plus avant sur cette question, des sources d'information sont fournies dans la bibliographie.

2.3.1. Différents types de scénarios

L'analyse des conséquences des changements climatiques et l'évaluation critique de leurs interactions avec les autres aspects des activités humaines nécessite d'examiner les modèles possibles de sociétés futures de façon exhaustive. Cela implique « d'imaginer » des tendances difficilement quantifiables, notamment sur les aspects tels que l'équité ou le développement durable tout en faisant appel aux outils beaucoup plus rationnels que sont les modèles mathématiques. La part relative de qualitatif et de quantitatif, avec les inconvénients que l'on subodore pour chacune, varie en fonction de la nature des scénarios et de l'utilisation que l'on souhaite en faire.

Après les premiers scénarios globaux de la fin des années 1960 qui étaient davantage des projections des tendances présentes et qui ne rendaient compte que d'une gamme étroite de possibilités d'évolution de la conjoncture socioéconomique, on a atteint une certaine maturité dans ce domaine. On peut s'appuyer aujourd'hui sur une très grande variété de scénarios permettant une analyse plus fine des futurs possibles.

Les scénarios qui examinent les futurs possibles dans leur globalité (Global future scenarios) contiennent des données pertinentes pour appréhender la problématique des changements climatiques (fig. 28). Bien qu'ils n'aient pas été expressément établis à cet effet, ils contiennent parfois des données sur les émissions de gaz à effet de serre. Ces scénarios permettent d'explorer des aspects non quantifiables, comme les structures sociales, pouvant être déterminantes dans les résultats des politiques d'intervention. Ils offrent un plus certain dans l'évaluation des scénarios d'émissions quantitatifs.

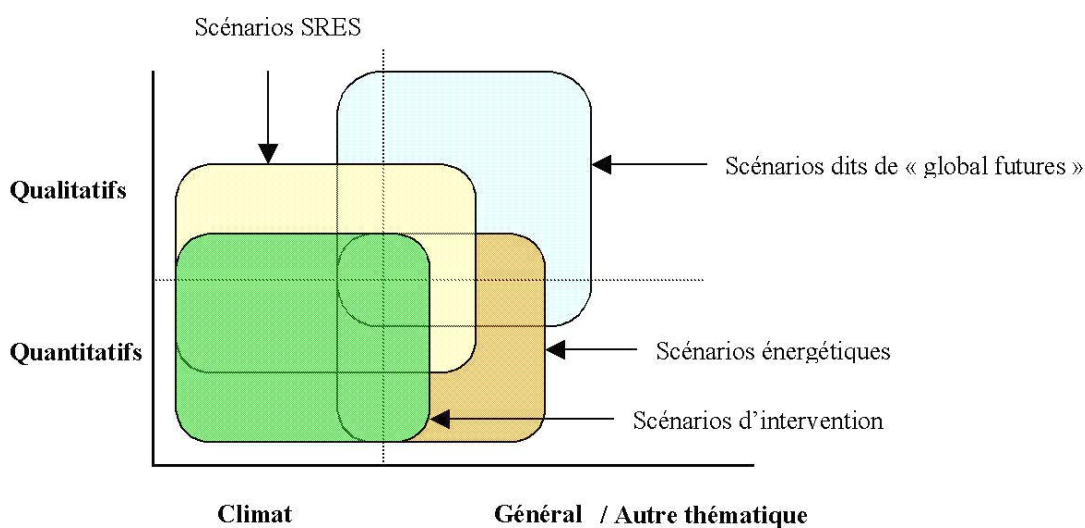


Fig. 28 - Les différents types de scénarios

Certains scénarios à caractère sectoriels, comme les scénarios énergétiques, constituent, tout particulièrement, une source d'information très utile dans le cadre de la lutte contre les changements climatiques.

Enfin, de nombreux scénarios ont été construits expressément pour progresser dans cette problématique. Parmi les scénarios d'émission, on distingue généralement les scénarios de référence où aucune mesure d'atténuation n'est intégrée et les scénarios d'intervention (mitigation scenarios) qui permettent d'étudier l'impact potentiel de ces mesures.

Les travaux menés par le Groupe Intergouvernemental sur ces différents types de scénarios sont considérés comme des références en la matière.

2.3.2. Les scénarios énergétiques

Comme nous l'avons vu, plus des trois quarts des émissions de CO₂ sont imputables aux combustibles fossiles. On estime en effet aujourd'hui que ces derniers constituent 85 % de l'énergie mondiale (Wawersik *et al.*, 2001). Quelle que soit la tendance future, il est évident que l'évolution des émissions de CO₂ au prochain siècle sera conditionnée essentiellement par la politique énergétique mondiale. Ainsi, les scénarios énergétiques, dont la vocation première est de mieux orienter les choix politiques et économiques en matière d'énergie, ont tout logiquement un volet consacré aux émissions de CO₂. Les gouvernements en établissent, de même que les

organismes nationaux et internationaux qui ont un rôle de veille sur l'activité socio-économique. Les fournisseurs d'énergie et notamment l'industrie pétrolière y ont également recours à des fins stratégiques. Dans ce contexte, il est important de se rappeler que les estimations ne sont basées que sur une seule source de CO₂, celle dérivant directement de la combustion des ressources fossiles. C'est le cas, par exemple, des scénarios énergétiques de la Commission Européenne, du Conseil Mondial de l'Énergie (World Energy Council), de l'Agence Internationale de l'Énergie (IAE), du DOE ou de Shell. Pour une analyse comparative détaillée de ces cinq scénarios, on pourra se référer aux travaux de la Direction Générale de l'Énergie et des Matières premières (DGEMP, 1999). Chacun de ces organismes a développé un panel de scénarios marqués par de grandes orientations incluant souvent plusieurs variantes notamment dans la dominance relative des différents types d'énergies. Considérons, à titre d'illustration, les scénarios du Conseil Mondial de l'Énergie.

Le Conseil Mondial de l'Énergie (CME) développe des scénarios depuis plus d'une vingtaine d'années en y apportant régulièrement des améliorations. Après avoir limité l'étude à trois familles, il a élaboré, depuis 1993 et en collaboration avec l'IIASA (International Institute of Applied Systems Analysis) six scénarios qui se prolongent jusqu'en 2100 :

- trois scénarios hauts à forte croissance économique (A) :
 - A1, tourné vers les hydrocarbures,
 - A2, orienté vers le charbon, à la suite d'un choc pétrolier et/ou gazier,
 - A3, axé sur le développement du gaz naturel, du nucléaire et des énergies renouvelables ;
- un scénario intermédiaire servant de référence mais distinct d'un BAU (business as usual) (B) ;
- deux scénarios écologiques (C) :
 - C1, axé sur le gaz et les énergies renouvelables,
 - C2, centré sur le nucléaire et les énergies renouvelables.

Ces différents scénarios évaluent notamment, à différents horizons, la consommation d'énergie primaire, les variations des intensités énergétiques pour différentes zones géographiques, la répartition entre les différentes énergies et les émissions de CO₂.

Seuls les scénarios écologiques C1 et C2 ramènent les émissions de gaz carbonique à un niveau proche du montant actuel de 6 GtC (émissions des combustibles fossiles), celles des autres scénarios variant entre 9,2 et 15,1 GtC pour l'horizon 2050.

Toutefois, il est important de relever que les hypothèses utilisées dans l'établissement des scénarios C1 et C2 comprennent des mesures de politiques environnementales propres à limiter les émissions, contrairement aux autres familles de scénarios A et B.

On trouve là une illustration des inconvénients à utiliser ces scénarios non spécifiques aux changements climatiques : dans le même panel, sont considérés des scénarios de référence et des scénarios d'intervention. Par ailleurs, ces scénarios non spécifiques au changement climatique peuvent considérer certains instruments (une taxe sur l'énergie comme c'est le cas pour les scénarios C1 et C2) de façon ponctuelle mais n'intègre pas une politique cohérente globale de lutte contre l'effet de serre.

Enfin, ce type de scénarios non spécifiques au changement climatique ne prend pas toujours en compte les changements dans l'utilisation des terres et donc le rôle de la biomasse dans l'évolution future des concentrations atmosphériques de CO₂.

Au contraire, les scénarios développés dans le cadre de la lutte contre l'augmentation des GES, et notamment ceux proposés par le GIEC, prennent en compte ces facteurs et marquent également une différenciation bien marquée entre des scénarios de référence et des scénarios d'intervention.

2.3.3. Les nouveaux scénarios de référence du GIEC : les scénarios SRES (Special Report on Emission Scenarios)

Afin d'évaluer les conséquences environnementales des émissions futures de gaz à effet de serre et proposer des options de stratégies d'atténuation et d'adaptation, il était nécessaire d'établir des scénarios spécifiques d'émissions à l'échelle mondiale. Le GIEC produit les tout premiers, en 1992 (ces scénarios, souvent référencés dans la littérature, sont appelés IS92). L'évolution dans la compréhension de ces phénomènes a conduit à l'élaboration, en 1996, d'un nouvel ensemble de scénarios, dits SRES, qui sont présentés dans le Rapport Spécial du GIEC sur les scénarios d'émissions (GIEC, 2000b). Ces nouveaux scénarios constituent une contribution importante au troisième rapport d'évaluation de 2001 (TAR, third assessment report : GIEC, 2001).

Ces scénarios d'émissions ne sont pas les seuls qui aient été produits. Mais leur intérêt réside justement dans le fait qu'il a été tenu compte de l'ensemble des scénarios existants dans la documentation dont ont été seulement exclus les scénarios marginaux de « surprise » ou de « catastrophe ». Les grandes caractéristiques de ces scénarios de la documentation et leurs interrelations ont été analysées, afin de proposer quatre « canevas » narratifs, de nature typiquement qualitative, pour décrire des futurs possibles. Chacun de ces canevas a ensuite été traduit en données quantifiables selon différentes approches de modélisation. À partir de là, les scénarios ont été examinés selon un processus « ouvert », notamment via un site Web. Enfin, trois révisions des scénarios et du rapport ont été effectuées, à savoir l'examen formel des experts du GIEC et l'examen final combiné des experts du GIEC et des gouvernements. C'est dans l'application de cette méthodologie très rigoureuse que réside l'intérêt majeur des scénarios SRES.

Ces scénarios sont des **scénarios de référence** : ils ne tiennent pas compte des initiatives en cours ou proposées pour réduire les émissions (politiques générales d'intervention explicite au sujet des changements climatiques) qui iraient, par exemple, dans le sens de l'application de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) ou du Protocole de Kyoto.

Cependant, les émissions de gaz à effet de serre sont directement influencées par des politiques générales d'autres types. Lors de l'analyse des options d'atténuation ou d'adaptation, on doit avoir conscience que, si aucune initiative climatique supplémentaire n'est incorporée aux scénarios SRES, divers changements ont été envisagés comme, par exemple, la pénétration significative des nouvelles technologies énergétiques.

Un ensemble de 40 scénarios a donc été développé en tenant compte de différents facteurs susceptibles d'influencer les émissions futures de gaz à effet de serre et de soufre.

Ces 40 scénarios ont été groupés en quatre familles, A1, A2, B1 et B2. Chaque famille correspond à un « canevas » qui raconte, en quelque sorte, une société future en en définissant les grands traits et formant ainsi une image cohérente de l'avenir. Les familles de scénarios se différencient du point de vue qualitatif comme du point de vue quantitatif. Les deux familles A, par exemple, supposent une croissance économique forte tandis que les deux familles B explorent les conséquences d'une croissance économique faible (fig. 29). Les familles A1 et B1 sont orientées dans le sens d'une convergence mondiale tandis que les familles A2 et B2 sont axées davantage sur les structures régionales. La famille A1 a été subdivisée en trois sous-familles qui résultent de choix différents en termes énergétiques. Les scénarios englobent toutes les directions de changement possibles, depuis des parts élevées de combustibles fossiles (pétrole et gaz ou charbon) jusqu'à des parts élevées de combustibles non fossiles.

Un scénario d'illustration a été choisi dans chacun des groupes de scénarios établis à partir des canevas. Pour choisir ces marqueurs, on a examiné laquelle des quantifications initiales reflétait le mieux le canevas mais les scénarios marqueurs ne sont ni plus ni moins vraisemblables que n'importe quel autre scénario.

Caractéristiques des quatre familles définies dans le SRES

Famille A1 : décrit un monde futur à croissance économique très rapide, une population mondiale qui atteint un sommet au milieu du siècle et qui diminue ensuite, et l'introduction de technologies nouvelles et plus efficaces. Les traits dominants sont la convergence des régions, l'augmentation des interactions culturelles et sociales, avec une réduction substantielle des différences régionales. Les trois sous-familles de A1 expriment leurs différences principalement dans leur choix au niveau des énergies : A1T choisit des sources d'énergie non fossiles, A1F1 est fortement centrée sur les énergies fossiles, et A1B tente un équilibre entre toutes les sources d'énergie.

Famille A2 : décrit un monde très hétérogène. Le trait dominant est l'auto-suffisance et la préservation des identités locales. La convergence des patrons de fertilité entre les régions est très lente, ce qui résulte en une augmentation continue de la population. Le développement économique est d'abord orienté régionalement et sur la croissance individuelle. Les changements technologiques sont plus fragmentés et plus lents que chez les autres familles.

Famille B1 : décrit un monde convergent qui, comme en A1, possède la même population mondiale qui culmine au milieu du siècle et décline par la suite. Elle s'en distingue par un changement rapide des structures économiques qui se dirigent vers une économie de services et de l'information, avec une réduction du matérialisme et l'introduction de technologies propres et efficaces au niveau des ressources. L'emphase est mise sur des solutions globales quant à la durabilité du développement économique, social et environnemental, incluant une amélioration de l'équité, mais sans initiatives additionnelles concernant le climat.

Famille B2 : décrit un monde où l'emphase est mise sur des solutions locales en ce qui concerne la durabilité du développement économique, social et environnemental. C'est un monde où la population mondiale croît continuellement, mais à un rythme plus lent que A2. Le développement économique se situe à un niveau intermédiaire et les changements technologiques sont moins rapides et moins diversifiés par rapport à B1 et A1. Bien que ce scénario soit aussi orienté vers la protection de l'environnement et l'équité sociale, il est centré sur le local et le régional. Repris de (GIEG, 2000b).

Pour pouvoir utiliser les différents modèles mathématiques, il était nécessaire de traduire en termes quantifiables la description narrative des quatre canevas. Pour cela, ont été définies des forces motrices des émissions futures*. Il est apparu que les

* Apparaît ici une différence fondamentale avec les scénarios énergétiques qui « sautent » une grande partie de cette première étape de travail et où la plupart des hypothèses de départ relèvent directement d'éléments quantifiés (par exemple, dans le cas du CME, la croissance économique) (fig. 28).

principales forces étaient **l'évolution démographique**, le **développement économique et social**, le rythme et la direction de **l'évolution technologique**.

L'influence relative de ces différents facteurs permet d'obtenir des résultats intermédiaires pour l'énergie et pour l'utilisation des sols. Par exemple, l'évolution connexe dans l'utilisation des terres agricoles est due principalement aux nouvelles demandes alimentaires et aux bouleversements démographiques. Mais de nombreux autres facteurs sociaux, économiques, institutionnels et technologiques influent également sur les parts relatives des terres agricoles, des forêts et d'autres types d'utilisation des terres.

Les incertitudes dans les évolutions futures des principales forces motrices des émissions peuvent entraîner de grandes incertitudes dans les émissions futures, même avec des voies de développement socio-économique identiques.

- **Ce que nous apprennent les scénarios SRES**

Dans le rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émissions, les émissions de CO₂ pour les différents scénarios ont été déterminées pour les deux principales sources : énergie et industrie d'une part et utilisation des terres d'autre part, ce qui permet de comparer leurs importances relatives (tabl. 5). La figure 29 présente les résultats pour la totalité des émissions de CO₂ pour les six groupes de scénarios qui constituent les quatre familles (les trois familles A2, B1 et B2 plus trois groupes de la famille A1: A1F1, A1T et A1B).

Il apparaît de très grandes disparités entre les différentes familles de scénarios avec, cependant, d'importants chevauchements dus principalement aux incertitudes sur l'évolution future des forces motrices.

Pour 2100, seuls les scénarios A1T et B1 permettent de revenir, après une légère augmentation en milieu de siècle, à des valeurs d'émissions inférieures à celles que nous connaissons aujourd'hui** (environ 8 GtC/an). En revanche, dans les scénarios A1F1 et A2, les émissions seraient, en 2100, trois fois plus importantes qu'aujourd'hui. Intermédiaires, les scénarios A1B et B2 prévoient une augmentation relative de l'ordre de 50 % par rapport aux valeurs actuelles.

Globalement, si aucun contrôle n'était appliqué sur les émissions de CO₂, les émissions annuelles dans un siècle varieraient, tous types de modèle sociétal confondus, entre environ 3 et 36 GtC. Bien qu'il existe de nombreuses incertitudes sur ces résultats, il est clair que les choix de développement des décennies prochaines auront une importance primordiale pour l'avenir climatique de la planète.

** Les valeurs considérées ici sont celles des scénarios marqueurs. Des fourchettes importantes apparaissent si l'on considère l'ensemble des scénarios de chaque groupe.

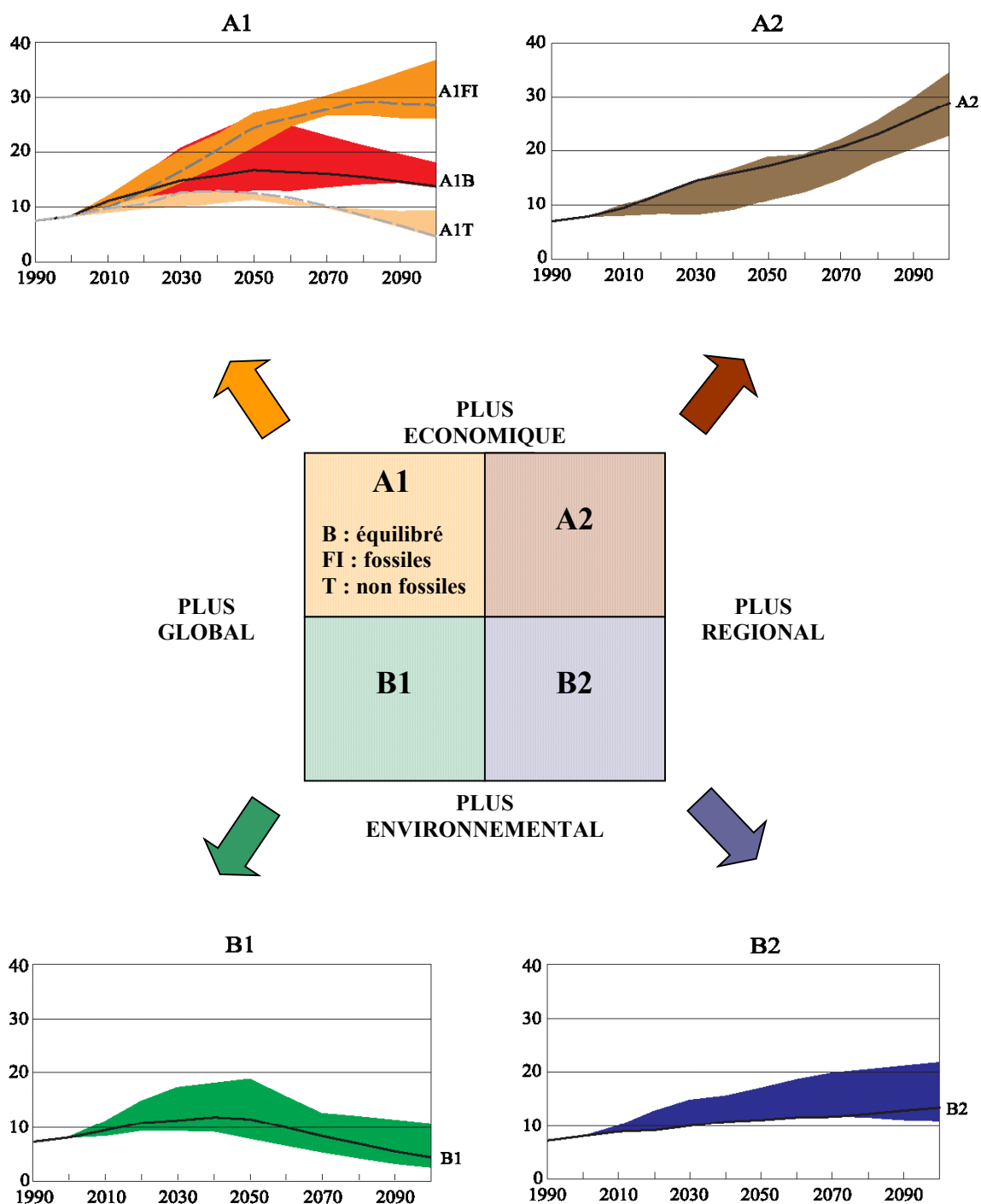


Fig. 29 - Émissions mondiales annuelles totales de CO₂ de toutes les sources (énergie, industrie et modification de l'utilisation des sols) entre 1990 et 2100, en gigatonnes de carbone (GtC/an) pour les quatre familles et les six groupes de scénarios. Les scénarios marqueurs sont représentés par les traits noirs ou les traits pointillés (GIEC, 2000b).

Pour ce qui concernent les émissions totales cumulées de carbone de toutes les sources (combustibles fossiles et utilisation des terres) dans la période 1990-2100 (tabl. 5), les valeurs varient entre 980 et 2 200 GtC (scénarios marqueurs).

Famille	A1			A2		B1	B2
Groupes de scénarios	1990	A1F1	A1B	A1T	A2	B1	B2
Dioxyde de carbone, combustibles fossiles (GtC/an)	6,0						
2020	112 (10,7-14,3)	121 (8,7-14,7)	10,0 (8,4-10,0)	11,8 (7,9-11,3)	10,0 (7,8-13,2)	9,8 (8,5-11,5)	
2050	23,1 (20,6-26,8)	16,0 (12,7-25,7)	12,3 (10,8-12,3)	16,5 (10,5-18,2)	11,7 (8,5-17,5)	11,2 (11,2-16,4)	
2100	30,3 (27,7-36,8)	13,1 (12,9-18,4)	4,3 (4,3-9,1)	28,9 (17,6-33,4)	5,2 (3,3-13,2)	13,8 (9,3-23,1)	
Dioxyde de carbone, utilisation des sols (GtC/an)	1,1						
2020	1,5 (0,3-1,8)	0,5 (0,3-1,6)	0,3 (0,3-1,7)	1,2 (0,1-3,0)	0,6 (0,0-1,3)	0,0 (0,0-1,9)	
2050	1,8 (0,0-0,9)	0,4 (0,0-1,0)	0,0 (-0,2-0,5)	0,9 (0,6-0,9)	-0,4 (-0,7-0,8)	-0,2 (-0,2-1,2)	
2100	-2,1 (-2,1-0,0)	0,4 (-2,4-2,2)	0,0 (0,0-0,1)	0,2 (-0,1-2,0)	-1,0 (-2,8-0,1)	-0,5 (-1,7-1,5)	
Dioxyde de carbone cumulé, combustibles fossiles (GtC)							
1990-2100		2128 (2079-2478)	1437 (1220-1989)	1038 (989-1051)	1773 (1303-1860)	989 (794-1305)	1160 (1033-1627)
Dioxyde de carbone cumulé, utilisation des sols (GtC)							
1990-2100		61 (31-69)	62 (31-84)	31 (31-62)	89 (49-181)	-6 (-22-84)	4 (4-153)
Dioxyde de carbone cumulé, total (GtC)							
1990-2100		2189 (2127-2538)	1499 (1301-2073)	1068 (1049-1113)	1862 (1352-1938)	983 (772-1390)	1164 (1164-1686)

Tabl. 5 - Émissions de CO₂ (en GtC) en 1990, 2020, 2050 et 2100 et émissions cumulées jusqu'en 2100. Les chiffres en gras indiquent les valeurs dans les scénarios d'illustration et les chiffres entre parenthèses les valeurs des fourchettes sur les 40 scénarios SRES dans les 6 groupes des 4 familles (GIEC, 2000b).

S'il existe une tendance très marquée à l'augmentation des émissions d'origine fossile pour le milieu du XXI^e qui se poursuit jusqu'en 2100 (à l'exception des scénarios A1T et B1), les émissions ayant pour origine l'utilisation des terres diminuent, pour l'ensemble des scénarios, par rapport à la situation actuelle (tabl. 5). En valeur cumulée sur un peu plus d'un siècle, le scénario B1 prévoit même un renversement de la tendance actuelle avec une absorption totale de 6 GtC. Pour tous les autres, en revanche, l'utilisation des terres continue à être une source d'émission de carbone (au cumul, entre 4 et 89 GtC de cette source pour les scénarios d'illustration). Cela ne signifie pour autant que la biomasse constituera alors une source nette puisque, aujourd'hui, malgré des émissions de l'ordre de 1,6 GtC/an, elle continue à absorber une partie du carbone d'origine anthropique. Comme nous l'avons vu, il est très hasardeux de se risquer à un quelconque pronostic sur cette question.

Les estimations effectuées par le GIEC indiquent que, sans mesures d'intervention spécifiques, les concentrations en CO₂ pourraient, en 2100 et selon les scénarios, s'élever à 970 ppmv dans le pire des cas et à 540 ppmv pour le scénario le plus optimiste. En considérant, les incertitudes des modèles (voir encadré), la fourchette totale de concentration de CO₂ en 2100 est de 490-1 250 ppmv, soit une augmentation de 75 à 350 % par rapport à la concentration atmosphérique préindustrielle de 1750.

De telles concentrations devraient entraîner une cascade de processus dont le premier est l'augmentation des températures. Elles devraient, selon les scénarios SRES, augmenter de 1,4 à 5,8 °C entre 1990 et 2100, (augmentation de 0,4 à 1,1 °C pour 2025 et de 0,8 à 2,6 °C pour 2050). Cependant, ces valeurs sont des valeurs moyennes et les augmentations devraient être réparties de façons très inégales à la

surface du globe. En particulier, le réchauffement devrait être plus prononcé encore en hiver dans les latitudes nord.

Des émissions aux concentrations... et des concentrations aux émissions

Traduire les émissions de CO₂ d'une période considérée en concentration atmosphérique à un horizon temporel donné est un exercice très complexe. Il est nécessaire d'avoir recours à des modèles mathématiques de représentation du cycle du carbone. Ces modèles doivent intégrer de nombreux facteurs relevant de la chimie atmosphérique (temps de résidence du CO₂ dans l'atmosphère) mais doivent également tenir compte des réponses des systèmes naturels aux modifications des concentrations atmosphériques. Comme nous l'avons vu, de grandes incertitudes pèsent sur la future capacité d'absorption du carbone anthropique par les océans et la biosphère. Ces incertitudes introduisent des marges d'erreur estimées à - 10 % / + 30 % dans les valeurs de concentration obtenues dans chaque scénario.

Une fois ces valeurs de concentration obtenues, il est possible de les introduire dans les modèles climatiques et ainsi obtenir des évaluations de températures moyennes et, au-delà, des modifications de niveaux marins. Cependant, ce sont encore de nouvelles incertitudes qui sont ajoutées à chaque traitement des données.

Les profils de stabilisation WRE

Pour donner une meilleure lisibilité aux scénarios de référence, il était utile de disposer d'un abaque constitué de plusieurs profils-types d'émissions correspondant à des valeurs ciblées de stabilisation des concentrations atmosphériques à un horizon donné. Pour cela, il a fallu faire appel, cette fois, à des modèles inverses de représentation du cycle du carbone. Ces modèles ont été étudiés notamment par le Groupe I de travail des experts du GIEC et ont permis d'obtenir des profils de stabilisation appelés WRE dans les publications du GIEC (le nom est WRE suivi du niveau de concentration visé, par exemple, WRE350 est le scénario de stabilisation du CO₂ à 350 ppmv). Les incertitudes quant aux comportements des systèmes naturels sont, là aussi, des facteurs contraignants pour l'établissement de ces profils de stabilisation des concentrations.

Conséquence directe de ce réchauffement, la dilatation thermique des océans et la fonte des glaciers qui entraîneraient une montée du niveau des mers de 0,09 à 0,88 m en 2100 (gamme complète des scénarios SRES), mais toujours avec des variations régionales significatives. Le réchauffement devrait s'accompagner de perturbations des cycles hydriques avec une pluviométrie accrue dans certaines zones et des processus de désertification dans d'autres. L'hétérogénéité devrait être la règle des changements qui nous attendent.

Pour cette raison, de nombreux pays mènent actuellement des études visant à évaluer les impacts possibles sur leur territoire. En France, un rapport intitulé « L'évaluation de l'ampleur des changements climatiques et leur impact prévisible sur la géographie de la France à l'horizon 2025, 2050 et 2100 » a été rendu public en juillet 2002 (Deneux M., 2002). Effectué pour le compte de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, il examine les différents secteurs d'activité (dont le premier est l'agriculture) et les espaces naturels qui devraient être touchés. Le rapport montre également que le réchauffement climatique pourrait avoir de sérieuses répercussions sanitaires sur la population.

Toutefois, si les scénarios développés par le GIEC permettent de mieux appréhender la nature des changements climatiques et de définir ainsi les mesures d'adaptation appropriées, ils donnent en priorité les moyens de mieux cerner les objectifs quant aux efforts à fournir. Dans ce contexte, les profils WRE sont aussi d'une grande utilité.

- Mieux cerner les objectifs sur les efforts à fournir

Une stabilisation à 450 ppm

Les profils WRE montrent que la stabilisation des concentrations atmosphériques de CO₂ à 450 ppmv exigerait que les émissions anthropiques, après avoir atteint un maximum vers 2010, tombent, dans trois décennies au plus (vers 2030), en dessous des niveaux de l'année 1990 pour poursuivre ensuite leur diminution et atteindre, par exemple en 2050, des valeurs d'environ 5 GtC (fig. 30).

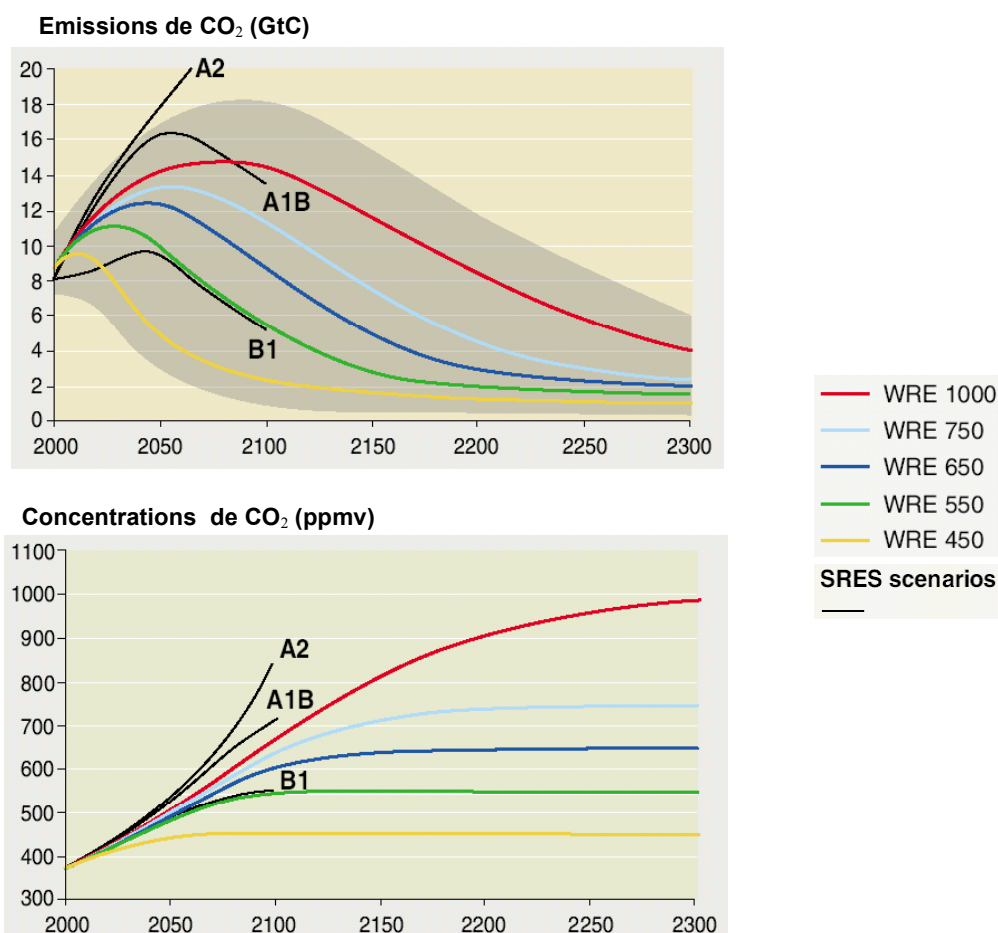


Fig. 30 - Profils d'émissions et concentrations de CO₂ pour différents niveaux de stabilisation (GIEC, 2001).

Les variations temporelles des émissions de CO₂ qui conduiraient à stabiliser les concentrations à différents niveaux sont estimées pour les différents profils de stabilisation WRE en utilisant des modèles de cycle du carbone. La partie ombrée représente la marge d'incertitude.

Une stabilisation à 450 ppmv correspondrait à une élévation de température de l'ordre de 1,5 °C entre 1990 et 2100. Cependant, il existe une grande marge d'incertitude sur le réchauffement correspondant à une stabilisation de concentration donnée. Aussi, il est plus juste de dire que le réchauffement devrait être compris entre 1,2 et 2,2 °C.

Encore faut-il ajouter que, à cause de la forte inertie de ces processus (la température de l'air au niveau du sol continuera d'augmenter pendant plusieurs décennies, jusqu'à ce que l'océan et l'atmosphère aient atteint un état d'équilibre thermique), la

température devrait continuer à augmenter après 2100 (fig. 31). Ainsi, avec une stabilisation à 450 ppmv, le réchauffement, une fois atteint l'état d'équilibre, devrait se situer entre 1,5 et 4°C.

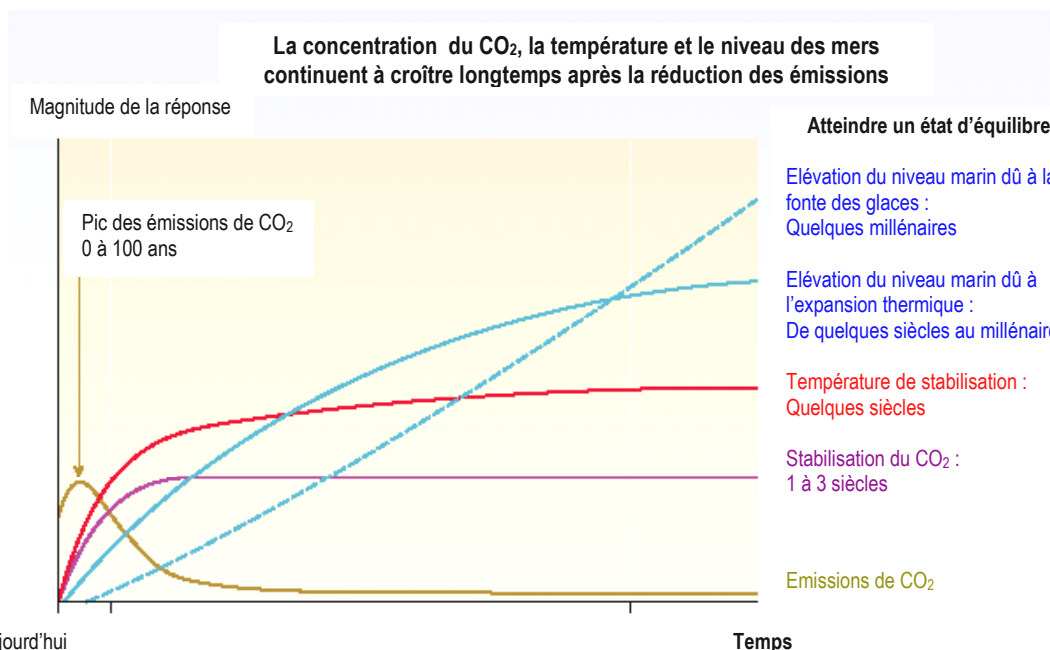


Fig. 31 - Profils de stabilisation de concentration de CO₂, de température de l'air et de niveau marin après une réduction des émissions (GIEC, 2001).

Cette figure générale illustre une stabilisation à n'importe quel niveau entre 450 et 1000 ppm, c'est pourquoi il n'y a pas d'unité sur l'axe de magnitude de réponse (les profils sont relativement similaires mais les impacts augmentent pour des concentrations croissantes).

Une stabilisation à 650 ppm

Dans ce cas, les profils WRE indiquent qu'il faudrait que les émissions aient atteint leur maximum en 2050 puisqu'il serait nécessaire d'avoir, à l'horizon 2120 environ, ramener les émissions en dessous de leur niveau de 1990 (fig. 30). Si l'on y parvient, le réchauffement serait alors, à l'équilibre, compris entre 2,2 et 6 °C.

Une stabilisation à 1000 ppm

Cette fois, l'on disposerait de beaucoup plus de temps (environ 2 siècles) pour parvenir à inverser la tendance et ramener nos émissions en dessous du niveau de 1990. Le pic des émissions se situerait, cette fois, aux environs de l'année 2080 (fig. 30). Mais le réchauffement devrait alors dépasser 3,5 °C, pourrait atteindre jusqu'à 8,5 °C, et les dommages seraient considérables.

En effet, des modèles glaciologiques montrent que, s'il se maintenait pendant un millénaire, un réchauffement de 5,5 °C, provoquerait la fonte de la moitié de la calotte glaciaire du Groenland et une montée du niveau de la mer de 5 m (Duplessy, 2001). Les bouleversements seraient alors d'ampleur géologique.

Compte tenu des fortes incertitudes qui marquent ces résultats, il faut rester prudent dans l'interprétation qui peut en être faite. Quoiqu'il en soit, il est urgent de trouver les

moyens qui permettront de contrôler nos émissions afin de stabiliser, à courte échéance et à une valeur la plus basse possible, les concentrations atmosphériques de CO₂. Pour cela, des outils spécifiques ont été développés, les scénarios d'atténuation.

2.3.4. Les scénarios d'atténuation ou scénarios d'intervention

Les scénarios d'atténuation (mitigation scenarios ou climate policies scenarios) permettent d'appréhender la façon dont les émissions de gaz à effet de serre peuvent être réduites relativement à une situation de base.

Ainsi, ce sont, soit des scénarios qui intègrent l'application de mesures spécifiques dont l'objectif premier est de réduire les émissions, soit des scénarios qui ne mentionnent pas de mesures climatiques particulières mais qui supposent des changements temporels nécessaires dans les sources d'émission pour parvenir à un objectif ciblé en terme climatique (concentration, température...). Certains les apparentent, à tort, avec les scénarios de référence à émissions modérées, parfois qualifiés de « scénarios verts ». La plupart du temps, ces scénarios d'intervention sont construits à partir de scénarios de référence auxquels on ajoute des mesures visant à contrôler les émissions. Ils permettent donc de quantifier les progrès potentiels qui peuvent être réalisés relativement à un référentiel de départ.

Les options d'intervention possibles sont de natures très variées. La seconde partie de ce rapport s'appliquera à décrire leur nature et la façon dont elles peuvent être mises en œuvre.

La plupart des scénarios d'atténuation ont été établis après 1990. Il en existe différents types en fonction de l'objectif visé. La cible peut être l'atteinte d'une certaine concentration atmosphérique ou la stabilisation des émissions à un certain niveau. Il existe donc des scénarios de stabilisation des concentrations, des scénarios de stabilisation des émissions, des scénarios de « fourchette tolérable d'émission » (« window/safe emissions corridor scenarios ») ou d'autres types encore.

Lorsqu'ils sont construits à partir de scénarios de référence, les scénarios d'intervention mettent en exergue les liens très étroits qui les lient à ces premiers scénarios. Il est assez logique, en effet, que des « mondes » différents auront des capacités et des moyens d'agir différents pour réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. Fournir une très large variété de scénarios de référence pour pouvoir tester de façon plus rigoureuse les mesures d'intervention était d'ailleurs l'un des objectifs poursuivis par les experts du GIEC lorsqu'ils ont établi les scénarios SRES.

Un panel de scénarios d'intervention, dits « post-SRES », ont donc été construits en prenant comme bases les différents scénarios du SRES et en tenant ainsi compte des caractéristiques de chaque « monde » possible décrit à travers les différents groupes A1B, A1T, A1F1, A2, B1 et B2 (fig. 32). Ils donnent des indications pertinentes sur la nature des mesures applicables et la façon dont elles peuvent être mises en œuvre. Au-delà, ils permettent d'évaluer les coûts potentiels des moyens de lutte contre le changement climatique. Les principales informations qui ont pu être obtenues via l'élaboration de ces scénarios sont présentés dans la seconde partie du présent rapport.

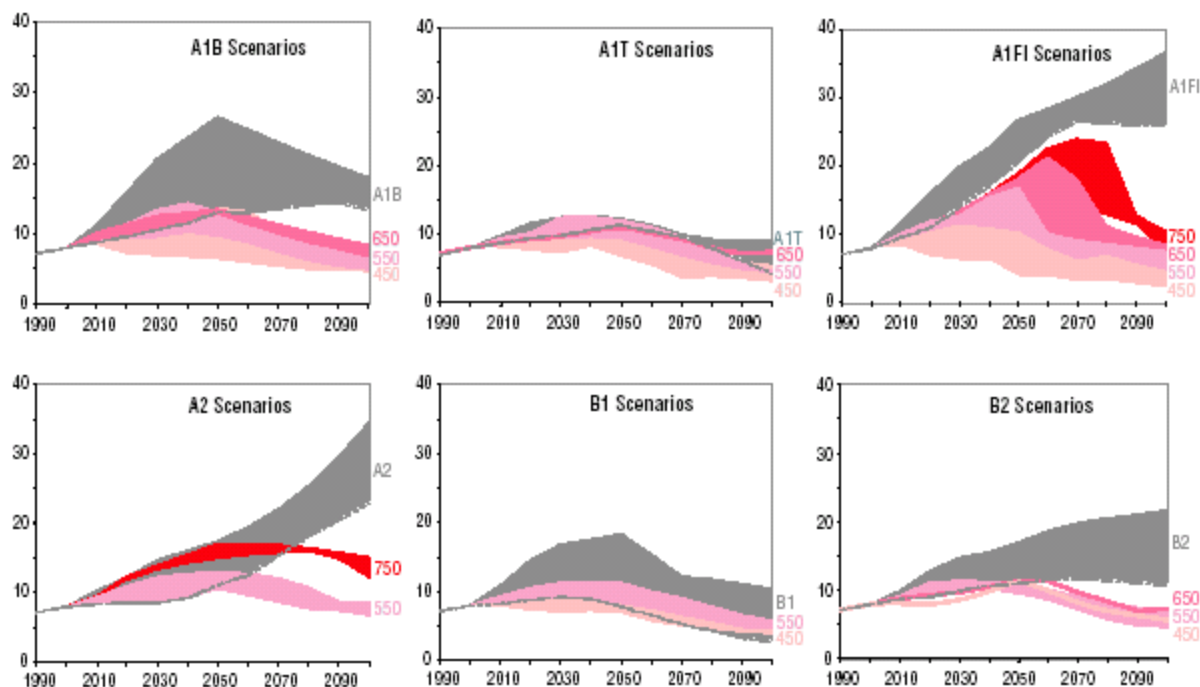


Fig. 32 - Comparaison des scénarios de référence et de stabilisation (GIEC, 2000b).

Chaque diagramme présente un groupe de scénarios de référence du Rapport Spécial sur les scénarios d'émissions (SRES). Il montre la gamme des émissions totales de CO₂ (en GtC) de toutes les sources anthropiques pour le groupe de scénario de référence SRES (en gris) et les gammes pour les divers scénarios d'atténuation évalués dans le TAR menant à la stabilisation des concentrations en CO₂ à différents niveaux (différents tons de rose).

Profils de stabilisation et scénarios de stabilisation... Attention aux confusions !

Les scénarios « post-SRES » sont souvent exprimés en terme d'objectif de stabilisation de concentration (fig. 29). Cela peut être la source d'une confusion entre ces scénarios et les profils WRE.

Comme nous l'avons vu, les profils WRE servent à définir quels sont les profils d'émissions qui permettraient de parvenir à un niveau donné de concentration atmosphérique et ce, à un horizon temporel donné. Bien qu'ils sous-tendent une forme quelconque de maîtrise des émissions, leur rôle n'est pas de simuler les bénéfices de telle ou telle mesure spécifique. Ils relèvent plus du modèle que du véritable scénario.

En revanche, les scénarios « post-SRES » ont été construits à partir des scénarios SRES de référence auxquels ont été appliqués des panels de mesures cohérents avec le type de société mondiale considérée (les familles). Lorsqu'ils sont présentés en objectif de concentration, il a aussi été nécessaire, comme pour les profils WRE, d'avoir recours aux modèles inverses (« inverse carbon cycle model »).

Les scénarios d'émission de CO₂ pour les décennies prochaines, même pour les plus optimistes d'entre eux, sont très préoccupants. Renverser la tendance en diminuant nos émissions, ou au moins leur progression, ne sera pas une tâche aisée. Sur ce point, le protocole de Kyoto a le mérite de fixer des objectifs contraignants qui, s'ils sont modestes d'un point de vue environnemental et encore insuffisants, doivent permettre d'impulser des changements dans nos façons de produire et de consommer. Quelle est la nature de ces changements et comment doivent-ils s'opérer ?

Deuxième partie - Moyens d'action

Le nouveau management du carbone

1. Changer nos façons de produire et de consommer

La fabrication d'un produit ou la fourniture d'un service s'inscrit toujours dans une longue chaîne dont on ne mesure pas toujours les frontières. Ces activités de production, entendues au sens large, commencent par l'utilisation de matières premières et se soldent, de façon systématique, par la production d'une certaine quantité de « produits indésirables », les effluents. Dans toute bonne politique de gestion des effluents, le traitement final de l'effluent n'intervient qu'après avoir soigneusement examiné toutes les actions susceptibles de réduire ses quantités en fin de chaîne. Cependant, tout dépend de la facilité technique et économique à traiter l'effluent ou à prévenir la source du problème. Il n'existe donc pas de véritable règle dans la chronologie des actions à mettre en œuvre et elles doivent se porter, de façon cohérente, en amont, en aval, et tout au long de la chaîne pour assurer un optimum de résultat.

Cela est d'autant plus vrai dans le cas du CO₂ qui, s'il peut être considéré comme un effluent, a cependant un caractère exceptionnel. Ce n'est plus une activité de production ciblée qui constitue un problème ponctuel donc plus facile à gérer, mais tout le modèle sociétal qui doit être réadapté et redéfini si l'on souhaite véritablement lutter de façon efficace contre le changement climatique.

Cette politique de gestion du CO₂, que l'on appelle aussi le « management du carbone », est une véritable gageure, un pari pour demain où le concept de développement durable trouve tout son sens. Elle s'appuie sur un grand nombre d'actions possibles qui relèvent à la fois de la prévention et du traitement. Décrire ces actions et dresser le panorama dans lequel elles s'inscrivent, c'est rendre compte d'aspects aussi divers que les choix politiques, le développement socio-économique ou les dernières avancées technologiques. C'est ce que nous avons tenté de faire, dans la suite, en nous intéressant aussi, dans chaque cas, à la marge de manœuvre dont dispose, au jour d'aujourd'hui, la société mondiale.

1.1. CIBLER LES ACTIONS DÉTERMINANTES

La définition des actions déterminantes dans la lutte contre le changement climatique passe par une première étape triviale reposant sur le simple constat que les émissions de CO₂ ont deux origines bien distinctes : l'utilisation des terres et l'utilisation des énergies fossiles. Il convient donc d'œuvrer conjointement dans ces deux domaines.

1.1.1. La gestion des terres

Les changements dans l'utilisation des terres, qui s'opèrent de façon sensible ces dernières décennies, contribuent aujourd'hui pour une part non négligeable - estimée à environ 20 %, (cf. première partie, § 1.3.) - aux émissions de CO₂ d'origine anthropique.

Comme nous l'avons vu, les écosystèmes terrestres ont la spécificité de constituer, à la fois un réservoir de carbone, une source de CO₂ (notamment par les pressions qui leur sont appliquées comme la déforestation) et un puits de carbone puisque l'on a pu montrer qu'ils étaient susceptibles d'absorber une partie du carbone d'origine anthropique. De ce fait, les activités envisageables sur les écosystèmes pour contribuer à stabiliser la concentration atmosphérique en CO₂ sont d'ordre multiple. Le tableau 6 détaille les différentes activités qui peuvent être entreprises dans le cadre de la gestion des écosystèmes terrestres pour lutter contre le changement climatique.

Ces activités correspondent en fait à trois grands types de stratégies* de gestion du carbone terrestre :

- **conservation du carbone** : il s'agit de prévenir ou de réduire le taux de libération du carbone déjà fixé dans les puits existants ce qui revient à limiter les émissions issues des écosystèmes terrestres en adoptant des modes de gestion différentes :
 - conservation de la biomasse et du carbone du sol dans les forêts existantes,
 - pratiques d'exploitation améliorées (par exemple exploitation à impact limité),
 - amélioration de l'efficacité de transformation du bois,
 - protection contre les incendies et utilisation plus efficace du brûlis dans les systèmes forestiers et agricoles ;
- **substitution du carbone** : l'objectif est de réduire la demande en combustibles fossiles (donc de limiter les émissions provenant de leur utilisation) et peut se faire de deux façons :
 - substitution des matériaux : promotion du bois d'œuvre en remplacement des matériaux tels que le ciment ou l'acier dont les modes de production génèrent de grandes émissions de gaz à effet de serre,
 - substitution énergétique : développer l'utilisation des bioénergies renouvelables (bois, éthanol) ;
- **fixation du carbone** qui consiste à augmenter la quantité ou le taux d'accumulation du carbone par la création ou le renforcement de puits de carbone :
 - dans la biomasse, grâce à des reboisements, des plantations industrielles et villageoises, le développement de l'agroforesterie,
 - dans les produits ligneux en allongeant leur durée de vie,
 - dans le sol, par le recours à des pratiques culturales aidant à l'accumulation de matière organique dans le sol : techniques culturales simplifiées, semis direct.

Puisque les deux premières options visent à limiter les émissions de CO₂ (en provenance soit des écosystèmes eux-même soit des combustibles fossiles), elles correspondent plutôt à des mesures préventives. Leur importance est considérable en terme de CO₂ potentiellement évité. En revanche, la dernière option relève davantage du « traitement » et correspond aux opérations dites de séquestration. Nous lui consacrons, dans la suite, un chapitre à part entière.

* Ces stratégies sont largement développées dans Bass *et al.*, 2000.

Limitation des émissions de CO₂ dans les stratégies de gestion des terres

Conservation du carbone

En termes de modification d'usage des terres et forêts, la conservation des stocks de carbone forestier existant a techniquement le potentiel le plus élevé pour une atténuation des changements climatiques. Étant donné que la majorité des émissions de carbone dérivant de la déforestation se produisent dans les années qui suivent le défrichage, une réduction du taux de déboisement a un effet plus immédiat sur les niveaux globaux de CO₂ atmosphérique que les mesures de boisement/reboisement, grâce auxquelles il est possible d'absorber des volumes similaires de carbone atmosphérique, mais sur une période beaucoup plus longue.

Les possibilités de conserver le carbone grâce au maintien du couvert forestier dépendent du niveau de référence supposé pour les opérations de déboisement non liées à des projets (« opérations de routine »). En principe, **on pourrait conserver entre 1,2 et 2,2 Gt de carbone chaque année, si le déboisement cessait complètement** (Dixon *et al.*, 1993). Cependant, les recettes provenant du carbone pourraient certes améliorer la rentabilité économique des terres forestières, mais les projets devront aussi s'attaquer aux causes profondes du déboisement et de l'utilisation insoutenable des forêts pour parvenir à conserver le carbone. Brown *et al.* (1996) estiment qu'**une réduction du déboisement dans les régions tropicales devrait permettre de conserver entre 10 et 20 Gt de carbone d'ici 2050** (0,2 à 0,4 Gt par an).

Il est possible de conserver le carbone stocké dans les forêts en utilisant des pratiques de gestion améliorées. La plus prometteuse est la technique d'exploitation à impact limité dans les zones tropicales. Les pratiques d'exploitation forestière traditionnelles peuvent endommager gravement le peuplement résiduel, puisque jusqu'à 50 pour cent des arbres laissés en place sont abîmés ou meurent (Kurpick, Kurpick et Huth, 1997). Les techniques d'exploitation à impact limité permettent de réduire de 50 % ces dégâts (Sist *et al.*, 1998) et, partant, de diminuer le niveau des émissions de carbone associées à l'abattage des arbres. Nabuurs et Mohren (1993) ont calculé que la masse de carbone pouvant être conservée à long terme, grâce aux techniques d'exploitation à impact limité dans la forêt ombrophile tropicale, se situe entre 73 et 97 tonnes par hectare. Étant donné que, d'après les estimations, on exploite chaque année 15 millions d'hectares de forêts tropicales (Singh, 1993), généralement considérées comme non durables (Poore, 1989), les possibilités d'accroître les stocks de carbone sont importantes. Les quantités supplémentaires de carbone conservées grâce aux techniques d'exploitation à impact limité sont calculées en partant du principe que les méthodes d'exploitation conventionnelle seraient poursuivies en l'absence d'intervention, et il est difficile de quantifier les variations des stocks de carbone associées aux modifications des pratiques d'exploitation (GIEC, 2000a - chap. 4).

Les feux incontrôlés provoquent chaque année d'importantes pertes de carbone dans les forêts. Certaines conditions météorologiques dérivant du changement climatique, comme le renforcement du phénomène El Niño, augmentent les risques d'incendie. Les pratiques de gestion des feux offrent la possibilité de conserver les stocks de carbone des forêts. Toutefois, la gestion des feux ne sera efficace que si les efforts de prévention et de lutte contre les incendies sont combinés avec des remaniements des politiques d'utilisation des sols et des mesures visant à répondre aux besoins des populations rurales. Il peut aussi se révéler difficile d'évaluer les données de départ pour les projets de prévention des feux, qui dépendront des interactions entre des facteurs humains et des facteurs stochastiques, comme les conditions météorologiques.

Substitution du carbone

Les biocombustibles fournissent actuellement 14 % des approvisionnements mondiaux en énergie primaire. Dans les pays en développement, les biocombustibles représentent un tiers des approvisionnements énergétiques totaux. **Si les biocombustibles que l'on utilise aujourd'hui étaient remplacés par de l'énergie dérivée de combustibles fossiles, 1,1 Gt de carbone supplémentaire par an serait rejetée dans l'atmosphère** (GIEC, 2000a - chap. 5). À la différence de la combustion des combustibles fossiles, l'utilisation de biocombustibles produits selon des méthodes durables n'aboutit pas à rejet net de CO₂ dans l'atmosphère, car le CO₂ libéré grâce à la combustion des biocarburants est absorbé par la biomasse qui repousse. La substitution de combustibles fossiles par des biocombustibles durables entraînera donc une réduction des émissions de CO₂ directement proportionnelle au volume de combustibles fossiles qui est remplacé. **Les prévisions relatives au rôle que joueront à l'avenir les biocarburants pour satisfaire les besoins en énergie s'échelonnent entre 59-145 x 1 018 J pour 2025 et 94-280 x 1 018 J pour 2050** (Bass *et al.*, 2000). L'utilisation future dépendra dans une large mesure du développement de technologies permettant une utilisation efficace des biocarburants, comme la gazéification des produits ligneux.

Les nouvelles plantations à biocombustible auront aussi un effet positif à long terme du point de vue de la fixation, car elles remplacent une utilisation des sols pour laquelle le taux de fixation est plus bas. Dans une forêt aménagée pour l'obtention de biocombustibles (en particulier taillis à courte rotation), la densité moyenne de carbone à long terme est inférieure à celle d'une forêt non exploitée ou d'une plantation à longue rotation, mais cette forêt retient plus de carbone que la majorité des utilisations des terres non liées à la foresterie. Inversement, si les forêts naturelles sont remplacées par des taillis à courte rotation pour la production de biocombustibles, l'effet bénéfique de la substitution des combustibles fossiles sera annulé par les émissions dérivant de la conversion de la forêt.

En remplaçant des matériaux qui libèrent d'importants volumes de dioxyde de carbone - que ce soit durant la transformation (ciment), ou par la consommation d'énergie (acier) - on pourrait aussi réduire considérablement les émissions nettes de CO₂.

Extraits du rapport « Situation des forêts du monde », FAO, 2001

CONSTITUTION DE PUIXS ET GESTION DES RÉSERVOIRS DE CARBONE		RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GES	
Réservoirs biomasse et matière organique du sol.		Émissions provenant de l'utilisation des terres et de la foresterie.	
<p>Accroissement des stocks par introduction d'arbres sur terrains non ou peu boisés : plantations industrielles et villageoises, plantation de protection de bassins versants, agroforesterie.</p> <p>Amélioration de la gestion des forêts : enrichissement de forêts naturelles dégradées, amélioration des techniques sylvicoles, accroissement de la durée de la rotation.</p> <p>Gestion des stocks en sous-sol : techniques culturales ou zéro-labour (semis direct).</p>	<p>Conservation des stocks existants (éviter les émissions du changement d'affectation des terres).</p> <p>Établissement de réserves pour les forêts menacées de déboisement, lutte contre les incendies, ravageurs, etc.</p>	<p>Émissions de CO₂ liées aux déchets forestiers et agricoles : exploitation forestière à faible impact et valorisation des déchets par agglomérés...</p> <p>Émissions énergétiques de CO₂ : efficacité énergétique lors du transport, de la transformation...</p> <p>Émissions de NO₂ (rizières) et CH₄ (bétail) : alimentation du bétail, pratiques culturales.</p>	
<p>Réservoirs produits (bois d'œuvre et papier, fibres naturelles pour le textile, cellulose pour la plasturgie, etc.).</p> <p>Orientation de la production vers des produits à longue durée de vie.</p> <p>Allongement de la durée de vie des produits par recyclage ou traitement.</p>		<p>Émissions provenant d'autres secteurs grâce aux produits agricoles et forestiers.</p> <p>« Substitution énergétique » de biocombustibles issus de sources durables (bois, éthanol...) aux combustibles fossiles ou issus de ressources forestières surexploitées.</p> <p>« Substitution matériau » de bois d'œuvre aux matériaux dont la production émet beaucoup de GES (ciment, acier...).</p>	

Tabl. 6 - Différentes activités qui peuvent être entreprises dans le cadre de la gestion des écosystèmes terrestres pour lutter contre le changement climatique.

En vert, les activités de fixation du carbone. (D'après Karsenty *et al.*, 2001).

1.1.2. La problématique de l'énergie

Les émissions de CO₂ provenant de l'utilisation des combustibles fossiles prédominent largement et constituent les 4/5^e des émissions totales de CO₂ (80 %). En effet, ces derniers constituent aujourd'hui 85 % de notre système d'approvisionnement énergétique. Toute la problématique repose sur ces deux chiffres clefs (fig. 33).

Ventilation sectorielle des émissions de CO ₂ dues à l'énergie (utilisation de combustibles fossiles)			
Industrie : 43 %	Bâtiment : 31 %	Transport : 22 %	Agriculture : 4 %.

Par ailleurs, on estime à environ 40 % les émissions de CO₂ dues à la production d'électricité dans le monde (ces émissions sont réparties dans les secteurs ci-dessus).

Statistiques de 1995 (source : GIEC, 2001 – Climate Change, Mitigation)

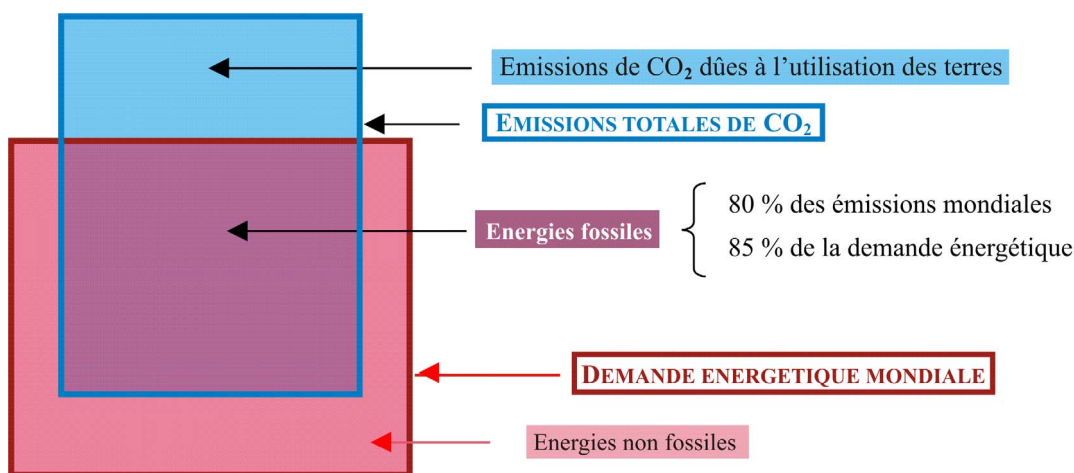


Fig. 33 - Émissions de CO₂ et demande énergétique : des systèmes largement chevauchant.

Si l'on parvient à **diminuer la demande énergétique globale**, la diminution se reportera sur la quantité de combustibles fossiles utilisés et les émissions qui en découlent. L'objectif est donc de minimiser les besoins d'énergie primaire. On peut porter un effort particulier aux économies d'énergies en privilégiant une utilisation rationnelle. Il s'agit de modifier le comportement des consommateurs finaux d'énergie, et cela principalement par des actions de sensibilisation. On peut également rechercher un meilleur rendement du système énergétique pour une production ou un service identique. À la différence de la première option, l'effort se porte en amont, à la production et est surtout lié aux développements technologiques (importance des actions de R&D). Dans les deux cas, c'est l'amélioration de l'efficacité énergétique qui est recherchée.

En second lieu, **en augmentant la part des énergies non fossiles** qui représentent environ 15 % de l'approvisionnement énergétique, on diminue d'autant les émissions liées à l'énergie. Il s'agit de développer l'utilisation de ces énergies exemptes de carbone : nucléaire et énergies renouvelables : éolien, solaire, géothermie... Cette option permet d'apporter une double réponse aux problèmes du changement climatique et de l'épuisement des réserves fossiles.

Ce sont les pays développés qui sont les principaux et premiers concernés par ce type de mesures. Ils disposent, en effet, d'une énergie abondante et facile, ce qui occasionne de nombreux « gaspillages ». Leur marge de manœuvre est également plus importante du fait des moyens dont ils disposent, tant financiers que technologiques. Or, les énergies renouvelables sont souvent moins accessibles et/ou plus onéreuses que ne le sont les combustibles fossiles. Non seulement les pays industrialisés sont en mesure de faire les efforts nécessaires, mais ils en ont aussi le devoir moral parce qu'ils portent l'entière responsabilité du problème climatique actuel. Les pays pauvres, aux infrastructures fragiles ou inexistantes, seront aussi les principales victimes des changements climatiques. Nous devons donc nous engager les premiers dans la maîtrise des émissions et cela de manière suffisamment crédible pour rallier les pays en développement.

Si les mesures que nous avons mentionnées constituent une première étape indispensable pour nos pays, elles ne pourront, à elles seules résoudre le problème climatique. Aujourd'hui, trois milliards et demi d'habitants de notre planète, vivant en milieu rural pour la plupart, n'ont pas accès, ou de façon très précaire, à l'électricité et aux services qu'elle fournit. En Afrique, la consommation d'électricité par habitant stagne depuis 1970 et elle se situe toujours à moins de 5 % de la consommation par habitant de l'Amérique du Nord. La consommation d'énergie commerciale par habitant du Brésil, de la Chine et de l'Égypte est d'un septième de celle de l'Allemagne.

Tous les scénarios énergétiques prévoient que ces pays défavorisés verront, dans les prochaines décennies, leur demande en énergie primaire croître considérablement. À titre d'illustration, les scénarios énergétiques du Conseil Mondial de l'Énergie que nous avons présentés précédemment prévoient que la consommation en énergie primaire dans les pays en développement devrait être, entre 1990 et 2050, multipliée par un facteur 3 à 4, alors qu'elle ne devrait que légèrement augmenter, voir diminuer dans les pays de l'OCDE (tabl. 7).

	1990	2050		
		A	B	C
Pays de l'OCDE	4,2	6,7	5,6	3,0
Pays aux économies en transition	1,7	3,7	2,4	1,7
Pays en développement	3,1	14,4	11,8	9,5
Total mondial	9,0	24,8	19,8	14,2

Tabl. 7 - Projections pour 2050 de la consommation en énergie primaire (en Gtoe) selon les trois familles de scénarios A, B et C du Conseil Mondial de l'Énergie (voir première partie, § 2.3.2. pour un aperçu des caractéristiques principales de chaque famille).

Les changements sont en marche et d'ores et déjà perceptibles, notamment en Asie. Le 15 juillet 2002, le premier ministre indien annonçait que le PIB de son pays pourrait augmenter de 8 % par an dans les cinq prochaines années. En Chine, le PIB de 2002 devrait dépasser celui de 2001 de + 7,3 %. En Afrique, malgré de fortes disparités, le PIB moyen a augmenté de 4 % en 2001. Le nombre de pays africains dont la croissance du PIB dépasse les 3 % est passé de 26 à 37 entre les années 2000 et 2001.

Les projections démographiques, bien que récemment revues à la baisse, ne font que mettre en exergue ce problème. En l'espace de 40 ans, entre 1980 et 2020, la population mondiale devrait être presque multipliée par deux pour atteindre 8 milliards d'individus. Cette croissance démographique sera très inégalement répartie. Seulement deux continents, l'Asie et l'Afrique, devraient accueillir plus de 80 % de ces 4 milliards de nouveaux habitants en 2020. Le centre de gravité de la planète en terme de démographie sera ainsi totalement déplacé vers les continents du sud et de l'est.

Pour toutes ces raisons, la question de l'énergie sera l'un des enjeux majeurs du Sommet mondial pour le développement durable qui aura lieu à Johannesburg en août 2002. Il faut en effet trouver rapidement une solution à ce problème à triple composantes : énergie, développement socio-économique et lutte contre le réchauffement climatique. Si l'on n'agit pas, le développement des pays pauvres se soldera comme s'est soldé le nôtre, par une augmentation massive de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Là aussi, la tendance est déjà perceptible : bien que les émissions de CO₂ d'origine fossile des pays de l'OCDE aient largement augmenté entre 1973 et 1998, elles sont proportionnellement en baisse au niveau mondial du fait d'une augmentation plus forte dans les pays en voie de développement notamment en Chine et en Inde (voir fig. 28 - première partie, § 2.2.2.).

Il est clair, au vu de ces données, qu'il serait peu raisonnable d'envisager une maîtrise de la demande énergétique pour ces populations qui aspirent à un meilleur niveau de vie. Les énergies renouvelables peuvent apporter une certaine contribution mais elles ne pourront, en l'état actuel, résoudre le problème à elles seules.

Il apparaît donc de plus en plus probable que **les énergies fossiles qui sont les plus accessibles, constitueront l'énergie du développement de quelques milliards d'individus dans les décennies prochaines**. Certaines solutions permettant d'utiliser les combustibles fossiles tout en réduisant leur impact sur le climat existent d'ores et déjà mais leur degré de maturité reste encore inégal.

Tout d'abord, des **progrès technologiques** sont encore possibles pour réduire les émissions de certains combustibles, notamment du charbon. Nous y reviendrons dans la suite.

Partant ensuite du constat que, en terme d'émissions de CO₂, il existe une certaine disparité entre les différents types de combustibles fossiles, on peut opérer **un transfert de nature à remplacer les sources d'énergies fossiles les plus riches en carbone, telles que le charbon ou le pétrole, par des énergies moins riches comme le gaz naturel** (concept du « fuel switching »). Le remplacement du charbon par du gaz naturel s'accompagne par exemple d'une réduction de 40 % des émissions de CO₂. Il faut savoir que le gaz naturel est une ressource fossile plus difficile à exploiter et à transporter que le pétrole brut. Pour cette raison, le marché du gaz est resté longtemps limité et l'industrie pétrolière avait souvent recours au brûlage en torche (flaring) dans les opérations d'exploitation. Aujourd'hui, dans une conjoncture économique plus favorable et grâce à une meilleure intégration de la dimension environnementale, le gaz naturel est de plus en plus valorisé commercialement.

Enfin, un concept consistant à découpler, dans l'utilisation des combustibles fossiles, la fonction énergétique des émissions atmosphériques de CO₂ est actuellement en train d'émerger. Ce découplage peut se faire en amont, dans le combustible fossile ou en

aval en empêchant le CO₂ de se disperser dans l'atmosphère. Nous reviendrons très largement sur ce concept ainsi que sur le stockage du CO₂ qui fait partie des conditions de sa mise en application. L'intérêt de cette option est particulièrement marqué pour le charbon dont les réserves mondiales sont plus importantes et mieux réparties que ne le sont celles du pétrole.

Si les premières mesures que nous avons mentionnées pouvaient avoir d'autres motivations telles que l'indépendance énergétique ou des bénéfices économiques pour ce qui concerne plus particulièrement les actions de maîtrise de l'énergie, cette dernière option s'applique uniquement à la lutte contre le changement climatique. C'est pourquoi c'est aussi la plus nouvelle. S'il est encore trop tôt pour juger de l'essor qu'elle prendra dans les décennies prochaines, elle apparaît cependant comme une solution prometteuse.

Nous reprenons, ci-dessous, les principaux axes dont relèvent les mesures relatives au domaine de l'énergie et susceptibles d'avoir un effet bénéfique dans la lutte contre le changement climatique :

- la **minimisation des besoins d'énergie primaire** qui s'appuie donc sur une maîtrise de la demande énergétique et peut se décliner en deux options :
 - porter un effort particulier aux économies d'énergies en privilégiant une utilisation rationnelle,
 - rechercher un meilleur rendement du système énergétique pour une production ou un service identique ;
- un **transfert sur la nature de l'énergie utilisée** pouvant également s'opérer de deux façons :
 - développer l'utilisation d'énergies non-fossiles et exemptes de carbone (nucléaire et énergies renouvelables : éolien, solaire, géothermie...),
 - remplacer les sources d'énergies fossiles les plus riches en carbone, telles que le charbon ou le pétrole, par des énergies moins riches comme le gaz naturel (concept du « fuel switching ») ;
- des **progrès dans les technologies utilisant les combustibles fossiles**, notamment le charbon ;
- un **nouveau concept énergétique pour les ressources fossiles** visant à découpler émissions de CO₂ et fonction énergétique.

Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire de s'appuyer sur des politiques volontaires. Ces politiques sont indispensables pour les mesures concernant les choix énergétiques et la maîtrise de la demande. Mais elles peuvent également s'avérer décisives pour les développements technologiques en apportant les conditions favorables à leur mise en place, en soutenant, par exemple, les actions de R&D ou en offrant une fiscalité avantageuse.

Le troisième rapport d'évaluation du GIEC (TAR) qui reprend et évalue l'ensemble des options possibles pour lutter contre le changement climatique consacre un chapitre aux instruments et mesures politiques nationales et internationales. Il est incontournable pour qui souhaiterait approfondir ce sujet. Ici, nous avons souhaité illustrer comment, dans la pratique, sont mises en place les politiques en France et en Europe*. Nous

* L'évaluation des politiques française et européenne en terme de « CO₂ évité » est abordée dans la partie *Bilan et perspectives* (Deuxième Partie, § 3.2.2.).

abordons également succinctement le cas des États-Unis, premier émetteur mondial de CO₂. Dans un second temps, nous nous intéressons plus particulièrement aux avancées technologiques permettant de limiter, voir d'éliminer, les émissions de CO₂ dans l'utilisation des combustibles fossiles.

1.2. METTRE EN PLACE DES POLITIQUES ADAPTÉES

Dans le contexte de la lutte contre l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, la définition et le mode de mise en œuvre de mesures selon un plan propre à chaque pays fait partie des engagements pris vis-à-vis de la Convention climat de l'ONU par l'ensemble des parties signataires. Les parties ont également l'obligation d'en rendre compte à la Convention à travers l'établissement de communications nationales périodiques suivant un plan bien défini.

Spécialement conçus pour répondre au problème du changement climatique, ces plans utilisent des instruments déjà expérimentés dans le contexte plus large des politiques de lutte contre la pollution.

Traditionnellement, ces politiques s'appuient sur un ensemble d'instruments qui sont destinés à limiter, au moindre coût, l'impact des activités générant des pollutions. Ces instruments peuvent être de nature réglementaire et correspondent alors à la définition de normes à respecter sous peine de pénalités. Ils peuvent également être incitatifs et se baser sur la fiscalité (taxes, redevances ou subventions) ou sur l'établissement de droits de propriété sur les biens environnementaux. Dans ce dernier cas, on définit un objectif collectif global qui doit être atteint par une répartition de la charge entre les différents agents responsables. Cette répartition est coordonnée par le marché à travers l'échange de permis. D'autres instruments valorisent l'auto-organisation des secteurs économiques et la négociation avec les pouvoirs publics. Ces accords, volontaires ou négociés, sont des engagements qui revêtent une forme contractuelle. Par ailleurs, les pouvoirs publics peuvent également mettre en place des systèmes informationnels dont l'objet est de promouvoir l'adoption de comportements moins polluants.

Les politiques définies dans le cadre de la lutte contre le changement climatique relèvent d'un panachage de ces diverses catégories d'instruments.

1.2.1. En France

a) La spécificité française en matière énergétique

Concernant un indicateur important, l'efficacité énergétique, la France se caractérisait au début des années 1990 par un niveau d'intensité énergétique** bas relativement à d'autres pays développés. En revanche, la tendance actuelle marque un taux de diminution plus important pour ces pays que pour la France qui perd ainsi peu à peu de son avance.

** L'intensité énergétique est le rapport de la consommation totale d'énergie sur le PIB à parité de pouvoir d'achat et prix constants.

Bien qu'elle compte parmi les gros consommateurs d'énergie (4^e place sur les 29 pays de l'OCDE), la France est l'un des pays les moins émetteurs de gaz carbonique dû à l'énergie (23^e place des pays de l'OCDE les plus émetteurs de CO₂). Ainsi, la quantité émise par habitant en France (environ 5,7 tonnes de CO₂ par habitant et par an) est inférieure à la moyenne de l'Union européenne (8,6 tonnes de CO₂ par habitant et par an) (tabl. 4 - première partie, § 2.2.2.). Cette bonne position de la France parmi les pays membres de la Communauté est due à la place importante du nucléaire et, dans une moindre mesure, de l'hydraulique. Ces choix énergétiques spécifiquement français n'ont pas été conçus dans un objectif environnemental mais en réponse à la conjoncture du moment. En effet, dans les années 80 soit au moment des chocs pétroliers, le souci était surtout de limiter au mieux la dépendance énergétique du pays. Le recours aux énergies fossiles reste donc limité (56 % de sa consommation d'énergie primaire) notamment dans la production d'électricité qui n'est ainsi à l'origine que de 10 % des émissions nationales de gaz à effet de serre*, contre 40 % au niveau mondial. Mais cet atout connaît une contre partie : les possibilités de réduction des émissions de CO₂ par la substitution de combustibles sont limitées. Même faiblement, les émissions de CO₂ en France continuent à augmenter (environ + 2 % entre 1990 et 2000)**. Dans l'objectif de stabiliser les émissions d'ici 2010, l'industrie semble en bonne position mais les risques d'augmentation sont réels dans le résidentiel et le tertiaire et très importants dans le transport, un secteur pour lequel il semble difficile de freiner cette tendance.

b) Les plans nationaux de lutte contre le changement climatique

Afin de répondre à ses obligations vis-à-vis de la Convention Climat, la France a établi, en 1995, un « premier programme national de prévention du changement de climat » (PNLCC) qui a été présenté dans la « première communication nationale à la Convention-cadre sur le climat ». Un second plan a suivi en 1997 puis les engagements pris à Kyoto par l'Union européenne d'une part, et la répartition de la charge au sein de l'Union européenne d'autre part, ont nécessité la mise en œuvre d'un nouveau programme national. Ainsi, la Mission Interministérielle de lutte contre l'Effet de Serre (MIES), qui pilote les actions des pouvoirs publics français sur cette question, a constitué des groupes de travail pour identifier les mesures susceptibles de renforcer et d'élargir celles des précédents programmes. C'est à la suite de ces travaux que le nouveau PNLCC a été approuvé en janvier 2000.

Sur la base du dernier PNLCC, a été établie, en 2001, la « troisième communication nationale à la Convention-cadre des Nations Unies sur le changement climatique » (MIES, 2001). Une centaine de mesures y sont répertoriées, toutes visant à aider la France à respecter ses engagements pris à Kyoto, qui exigent de stabiliser, à l'horizon 2008-2012, ses émissions de gaz à effet de serre à leur niveau de 1990.

La communication s'appuie notamment sur une répartition sectorielle - production d'énergie ; habitat, résidentiel et tertiaire ; transport ; industrie et gaz frigorigènes ; agriculture et forêts ; déchets - pour rendre compte des mesures prises par le gouvernement français. Certaines ont d'ores et déjà été décidées et mises en œuvre avant le nouveau PNLCC et sont ainsi dites « mesures existantes » pour les

* L'électricité, en France est produite à 75 % par l'énergie nucléaire. Au niveau mondial, elle est produite à 60 % par les énergies fossiles et à 17 % par le nucléaire.

** Si l'on considère l'ensemble des gaz à effet de serre, les émissions ont diminuées de 2 % entre 1990 et 2000 et ce sans considérer les changements dans l'utilisation des terres. En les prenant en compte, la diminution est alors de 3,4 %.

différencier des « mesures supplémentaires » (mesures décidées avant 2000 mais pas encore appliquées, mesures nouvelles incluses dans le PNLCC et mesures décidées entre 2000 et 2001). Au-delà de ces spécifications qui sont importantes, notamment dans l'évaluation qui doit être faite, par la suite, de leurs efficacités relatives, les mesures relèvent de trois grandes catégories :

- des mesures dites « sans regrets » non spécifiquement motivées par la lutte contre le changement climatique. Ces actions à bénéfices certains concernent par exemple les actions de maîtrise de l'énergie dans le bâtiment ou les progrès dans l'exploitation du système de transport. Elles ne permettent pas de donner aux émissions évitées une valeur économique ;
- des mesures de nature économique visant à inciter les utilisateurs de combustibles fossiles, notamment les industriels, à prendre en compte l'impact de cette utilisation sur la quantité de gaz à effet de serre émise. Le projet de l'écotaxe sur l'énergie relève de cette catégorie. Prévues par le PNLCC de janvier 2000 dont elle constituait un axe fort, elle a été rejetée par le Conseil Constitutionnel à la fin de l'année 2000. Depuis, le gouvernement est en négociation avec les industriels pour trouver un accord dont les termes ne sont pas encore complètement déterminés. La tendance est à un accord négocié ;
- des actions structurelles sur l'offre notamment dans les domaines sensibles du bâtiment-tertiaire, de la production d'énergie et du transport.

Mission Interministérielle de lutte contre l'Effet de Serre

Créée en 1992, la Mission Interministérielle de l'Effet de Serre (MIES) a fait l'objet d'une réforme en juin 1998 : renforcée dans ses moyens, elle a été rattachée au premier ministre tout en étant placée à la disposition du ministre de l'aménagement du territoire et de l'environnement qui conduit les délégations françaises dans les négociations européennes et internationales sur le sujet.

Ses actions portent essentiellement sur la préparation des positions que la France doit défendre au niveau international auprès des instances concernées, sur la présentation de ses positions dans les réunions d'experts gouvernementaux, sur l'identification des mesures propres à permettre à notre pays d'atteindre ses objectifs et sur le suivi de leur mise en œuvre.

La MIES est une équipe constituée d'une dizaine de personnes entre lesquelles sont réparties des tâches à la fois nationales et internationales. Pour assurer ses missions, elle s'appuie sur plusieurs réseaux : correspondants dans les principales directions des ministères concernés, spécialistes des questions de coopération est-ouest ou nord-sud, experts scientifiques et économistes mobilisables en France, centres de recherche internationaux ou étrangers sur les aspects socio-économiques de politiques de prévention des changements climatiques.

La MIES entretient des relations régulières avec les industries concernées par les questions énergétiques et d'émissions de gaz et élargit actuellement son champ d'activité vis-à-vis du secteur bancaire et des assurances ; elle entretient également des relations avec les organisations non gouvernementales qui interviennent dans le domaine de lutte contre l'effet de serre, et souhaite élargir à d'autres son champ de contacts (syndicats, associations de consommateurs, etc...). Dans le cadre du travail actuel sur le nouveau programme national, elle développe des relations avec les collectivités territoriales (régions, agglomérations).

Enfin, vis-à-vis de la Commission, de la Présidence européenne et des équipes correspondantes dans les États membres, la MIES constitue le « point focal » français (origine et destination des flux d'information qu'elle collecte et distribue auprès des autres acteurs nationaux, notamment les départements ministériels).

La MIES doit rendre compte de ses travaux à la Commission Interministérielle de l'Effet de Serre, dont elle prépare les réunions et assure le secrétariat. Cette commission est présidée par le premier ministre ou en son absence par le ministre chargé de l'environnement et comprend les représentants d'une dizaine de ministres et en tant que besoin, d'autres membres du gouvernement.

Source : MIES (<http://www.effet-de-serre.gouv.fr/>)

Dans la mise en œuvre de ces différentes mesures, le gouvernement s'appuie notamment sur l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME). Signe d'une volonté affirmée, ses crédits d'intervention ont été décuplés entre 1998 et 2000. L'agence agit à plusieurs niveaux, depuis les décideurs jusqu'aux consommateurs finaux, spécialement dans le domaine de la maîtrise de l'énergie, son principal cheval de bataille. L'ADEME aide les entreprises et les collectivités locales à choisir les techniques et les solutions les plus efficaces et à les mettre en œuvre. Elle joue également un rôle déterminant dans la sensibilisation et l'information du public.

Dispositif d'engagements volontaires proposé par les entreprises visant à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre

Les entreprises représentées par le MEDEF et l'AFEP ont présenté au Gouvernement un dispositif d'engagements volontaires visant à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre, dont les modalités ont fait l'objet d'une concertation avec le ministère de l'Écologie et du Développement durable et le ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie.

Le dispositif proposé vise à mobiliser le plus largement possible dans le cadre actuel les entreprises françaises pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Il repose sur douze principes fondamentaux et un engagement-cadre. Il sera géré par une entité associative constituée par les entreprises volontaires, chacune prenant un engagement individuel, vérifié de façon indépendante et sanctionnable. Ces engagements feront l'objet d'un avis d'un comité consultatif créé auprès de l'entité associative, qui réunira des personnalités qualifiées, dont certaines seront désignées par les pouvoirs publics à titre d'experts et d'observateurs. Les réductions d'émissions proviendront prioritairement d'investissements ou d'améliorations des processus de production. Un marché expérimental d'échanges liés aux gaz concernés sera également mis en place. Des réductions d'émissions pourront également être opérées dans les domaines du transport et du tertiaire.

Le Gouvernement approuve ces propositions qui doivent permettre aux entreprises de contribuer aux engagements pris par la France [...]. Le Gouvernement fera un point régulier sur les résultats que ce dispositif produira. Il poursuivra la concertation avec les entreprises et les associations sur l'ensemble de ces sujets.

Communiqué du ministère de l'Environnement, 19 juillet 2002

Afin de faciliter la mise en place et également d'accompagner les mesures définies dans le PNLCC, un programme « Gestion et impact du changement climatique » est en outre piloté par le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE), en étroite relation avec la Mission Interministérielle de l'Effet de serre (MIES).

Ce programme est destiné à orienter les actions de R&D dans le domaine de la lutte contre l'augmentation de l'effet de serre. En 2002, l'accent est mis sur les volets géopolitiques et politiques - dans le cadre des négociations internationales et des stratégies de réduction des émissions de GES - ainsi que sur les aspects concernant l'évaluation, les impacts et les mesures d'adaptation au changement climatique. Un nouveau thème émergent est consacré à la séquestration du carbone.

Dans la panoplie de mesures destinées à lutter contre le changement climatique, beaucoup de questions, notamment celles qui ont une incidence directe sur la politique énergétique, sont maintenant traitées dans le cadre de l'Union européenne. Les choix sont ainsi de plus en plus élaborés en concertation avec les pays partenaires.

1.2.2. Dans l'Union européenne

a) Europe, énergie et CO₂ : quelques chiffres

La consommation énergétique actuelle dans l'Union européenne est couverte pour 41 % de pétrole, 22 % de gaz naturel, 16 % de combustibles solides (charbon, lignite, tourbe), 15 % de nucléaire et 6 % de renouvelables. Cependant, le paysage européen en matière énergétique est marqué par de fortes disparités d'un pays à l'autre (tabl. 8).

Types de source d'énergie	Moyenne UE (%)	Variations dans les états membres (%)
Combustibles solides	16	4 -35
Pétrole et produits pétroliers	41	11 - 67
Gaz naturel	22	0 - 59
Nucléaire	15	0 - 37
Renouvelables	6	1 - 28

Tabl. 8 - Parts des différentes sources d'énergies dans la consommation intérieure brute de l'Union européenne et fourchettes des parts dans les différents États membres en 1998 (CE, 2001a).

La politique menée par l'Union européenne dans le domaine de l'énergie poursuit trois objectifs principaux : la sécurité d'approvisionnement énergétique, la compétitivité économique et la protection de l'environnement.

Le domaine de l'énergie* est caractérisé par un désordre fiscal qui va à l'encontre des objectifs des politiques des transports et de l'environnement. La règle de l'unanimité fait souvent obstacle à un véritable rapprochement des niveaux de taxation.

L'Union européenne est responsable d'environ 14 % des émissions mondiales de CO₂. Les combustibles fossiles sont les premiers accusés. En valeur absolue, la consommation de pétrole représente à elle seule 50 % des émissions de CO₂ dans l'Union européenne, le gaz naturel 22 % et le charbon 28 %. Par secteur de consommation, la production d'électricité et de vapeur est responsable de 30 % des émissions de CO₂, les transports 28 %, le domestique 14 %, l'industrie 16 % et le tertiaire 5 %. Depuis 1990, l'Europe a réussi à stabiliser ses émissions de CO₂ en 2000 au niveau de 1990. Cependant, c'est en grande partie grâce à des facteurs conjoncturels tels que le ralentissement économique résultant de la crise du Golfe en 1991, la restructuration industrielle en Grande-Bretagne et dans les nouveaux Länder.

Selon les projections de l'Agence Européenne de l'Environnement** (« Environment at the turn of the century », EEA, 1999), les émissions totales de gaz à effet de serre des Quinze, si rien n'est entrepris, devraient augmenter d'au moins 5,2 % entre 1990 et 2010.

b) Politiques et mesures de l'Union européenne

En 1997, peu avant la conférence de Kyoto, l'Union européenne avait estimé qu'une réduction de 15 % des émissions de CO₂ serait techniquement possible et que la charge des coûts était tolérable. Cependant, c'est sur une réduction de 8 % des émissions de gaz à effet de serre entre 2008 et 2012 (par rapport aux taux enregistrés en 1990) que l'UE s'engage finalement dans le protocole de Kyoto.

Bien que l'effort ait été nettement renforcé à partir de l'année 2000, certaines politiques et mesures, ayant pour objectif la réduction des émissions de gaz à effet de serre ou

* Une analyse détaillée du domaine énergétique en Europe est présentée dans le Livre vert « Vers une stratégie européenne de sécurité d'approvisionnement énergétique » (2000).

** Le rôle de l'agence européenne pour l'environnement est de collecter et de diffuser des informations comparables dans le secteur de l'environnement à l'usage des décideurs et du public dans le but d'améliorer la situation environnementale en Europe et de favoriser le développement durable. La décision de sa création remonte à 1990, mais ce n'est qu'en 1993 que l'Agence s'installe officiellement à Copenhague, la capitale danoise. (<http://www.eea.eu.int/>).

l'augmentation des puits de carbone, avaient déjà été mises en place au cours des années 1990.

La Commission européenne avait ainsi proposé l'introduction d'une taxe obligatoire sur l'énergie et le CO₂ à l'échelle européenne. Si aucun accord n'a finalement pu être obtenu au niveau de l'Union, plusieurs États membres - l'Autriche, le Danemark, la Finlande, la Suède et les Pays-Bas - avaient déjà, en 1999, mis en place une taxe sur l'énergie et le CO₂ (tabl. 9).

La volonté d'accroître la part d'énergies renouvelables dans la consommation énergétique européenne se traduit, en novembre 1996, par la présentation d'un Livre vert consacré à ce sujet : « Énergie pour l'Avenir : les sources d'énergie renouvelables, Livre vert pour une stratégie communautaire » (CCE, 1996). Ce document fait le point sur la situation européenne en matière d'énergies renouvelables et décrit les avantages d'accroître leur utilisation. Il fixe pour objectif le doublement de l'apport des sources d'énergie renouvelable au bilan énergétique de l'Union européenne d'ici 2010. L'année suivante, en 1997, paraît le Livre blanc sur le même thème. Il confirme l'objectif de faire passer les sources d'énergie renouvelables dans la consommation d'énergie en Europe, de 6 % à 12 % en 2010^{*}.

Livres verts et Livres blancs

Les livres verts sont des communications publiées par la Commission sur un domaine politique spécifique. Ce sont avant tout des documents destinés aux parties concernées - organismes et particuliers - qui sont invitées à participer au processus de consultation et de débat. Dans certains cas, ils sont à l'origine de développements législatifs ultérieurs.

Les livres blancs sont des documents qui contiennent des propositions d'action communautaire dans un domaine spécifique. Ils font souvent suite à un livre vert publié en vue d'engager un processus de consultation au niveau européen. Tandis que les livres verts exposent un éventail d'idées à des fins de débat public, les livres blancs contiennent un ensemble officiel de propositions dans des domaines politiques spécifiques et constituent l'instrument de leur mise au point.

Source : Union européenne (http://europa.eu.int/comm/off/info_fr.htm)

En 1996, entre également en vigueur la directive relative à la prévention et la réduction intégrées de la pollution. Elle vise à éviter ou minimiser, dans l'atmosphère, les eaux et les sols, les émissions provenant d'installations industrielles et n'est donc pas spécifique à la réduction des émissions de CO₂. Cependant, elle marque une étape dans ce sens en reconnaissant le rendement comme critère de détermination de la meilleure technologie disponible.

Le rendement énergétique est d'ailleurs un axe d'effort important au niveau de la politique européenne. Des améliorations potentielles ont été identifiées et, en ce qui concerne la production et la distribution d'énergie dans l'UE, différents programmes jouant un rôle prédominant dans la réponse politique au changement climatique (ALTENER, SAVE et JOULE-THERMIE) ont été mis en œuvre au cours des années 1990.

Un autre domaine mis en exergue depuis plusieurs années est celui des transports. En juillet 1998, la Commission européenne a conclu avec l'industrie automobile un accord visant à réduire les émissions de CO₂ de 25 % (à 140 g/km) pour les nouvelles voitures particulières entre 1995 et 2008. La Commission a pour objectif d'améliorer le

^{*} Le cadre législatif de cette mesure sera défini 4 ans plus tard dans la *directive relative à la promotion de l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables sur le marché intérieur de l'électricité* (27 septembre 2001).

	Énergie en général	Génération d'électricité	Industrie	Transports	Résidentielle	Autres
Allemagne		Engagement volontaire à améliorer le rendement énergétique, législation sur la vente d'électricité produite à partir d'énergies renouvelables au réseau de distribution	Mesures volontaires, amélioration du rendement énergétique	Politique des transports à faible taux énergétique		Nouveaux Länder: réductions des émissions par le remplacement de la lignite par d'autres combustibles, modernisation d'installations industrielles, amélioration du rendement énergétique (industrie, secteur résidentiel)
Autriche	Mise en œuvre d'une taxe sur l'énergie/CO ₂	Promotion de la production combinée chaleur-électricité (PCCE) et de l'énergie renouvelable			Renforcement de la réglementation en matière énergétique pour les constructions	
Belgique		Promotion de la PCCE et de l'énergie renouvelable		Amélioration des transports publics, promotion des transports combinés chemin de fer / route	Rendement énergétique amélioré	
Danemark	Taxe sur l'énergie/CO ₂ mise en œuvre pour les ménages, taxe similaire pour le secteur industriel	Promotion de la PCCE et de la production électrique à partir de la biomasse ; construction de nouvelles usines alimentées au gaz (au lieu du charbon) après l'an 2000. Utilisation à large échelle de l'énergie éolienne pour l'électricité		Promotion des transports publics, aide financière à l'achat de véhicules propres		
Espagne			Conservation de l'énergie, conversion des combustibles, promotion du gaz naturel et de la PCCE	Subventions accordées aux transports publics, Investissements dans les infrastructures ferroviaires	Conservation de l'énergie, conversion des combustibles, promotion du gaz naturel et de la PCCE	
Finlande	Mise en œuvre d'une taxe sur l'énergie/CO ₂	Amélioration du rendement, promotion de la PCCE, production électrique à partir de la biomasse	Promotion des économies d'énergie par des accords volontaires			Sylviculture : mesures visant à augmenter le piégeage du carbone
France		Gestion de la demande		Amélioration du rendement énergétique des transports	Augmentation du rendement énergétique dans les constructions	Sylviculture ; augmentation du piégeage du charbon forestier

Tabl. 9 - Exemples de mesures prises par les États membres de l'UE pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (source : EEA, 1999).

	Énergie en général	Génération d'électricité	Industrie	Transports	Résidentielle	Autres
Grèce		Introduction du gaz naturel, développement de la PCCE, exploitation à large échelle de l'énergie solaire	Introduction du gaz naturel	Méto à Athènes et à Thessalonique	Introduction du gaz naturel	Sylviculture : contrôle des ressources forestières, programme de reboisement
Irlande		Amélioration du rendement énergétique, passage au gaz naturel, promotion de la PCCE, utilisation accrue des énergies renouvelables	Amélioration du rendement énergétique	Programme d'investissement pour les réseaux routiers et ferroviaires	Amélioration du rendement énergétique	Sylviculture : programme de boisement
Italie		Amélioration du rendement, utilisation accrue des énergies renouvelables	Utilisation accrue du gaz naturel	Contrôle du trafic et rationalisation de la mobilité urbaine	Utilisation accrue du gaz naturel, augmentation du Rendement énergétique dans les constructions	
Luxembourg				Promotion des transports publics, des transports ferroviaires et des voies fluviales	Promotion de la PCCE	
Pays-Bas	Mise en œuvre d'une taxe sur l'énergie/CO ₂	Augmentation de la PCCE, augmentation des énergies renouvelables et passage partiel des combustibles au bois; rétributions adéquates pour l'énergie générée à partir de sources renouvelables	Accords volontaires sur le rendement énergétique	Passage à des véhicules ayant un rendement supérieur, amélioration des transports publics	Normes de performance énergétique, promotion de produits, appareils et isolation thermique à haut rendement énergétique	Traitement des déchets : 5 millions de tonnes de déchets à des fins énergétiques d'ici à l'an 2000
Portugal		Introduction du gaz naturel, utilisation accrue d'énergies renouvelables, améliorations technologiques		Combustibles alternatifs et améliorations des infrastructures		
Royaume-Uni		Poursuite du passage du charbon au gaz naturel, améliorations dans la productivité des usines nucléaires, augmentation de la PCCE, promotion des sources renouvelables d'énergie	Accords volontaires concernant les économies d'énergie, promotion du rendement énergétique	Augmentation des taxes sur les carburants routiers, amélioration de l'utilisation des carburants par les véhicules	Réglementation plus stricte en matière de rendement énergétique dans les nouvelles constructions	
Suède	Mise en œuvre d'une taxe sur l'énergie/CO ₂	Promotion de l'énergie renouvelable (biocombustibles, énergie éolienne et énergie solaire), augmentation du rendement		Taxe sur l'essence		Sylviculture : passage à des pratiques soutenables

Tabl. 9 - Exemples de mesures prises par les États membres de l'UE pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (source : EEA, 1999) (suite).

rendement du carburant des voitures particulières, pour réduire les émissions à 120 g/km et, à cette fin, elle a proposé un plan d'indication de la consommation d'énergie pour les nouvelles voitures particulières.

Pour ce qui concerne enfin la consommation des ménages, plusieurs directives ont été adoptées concernant les exigences de rendement énergétique pour les appareils ménagers et plusieurs accords ont été conclus avec des fabricants et des importateurs en matière de normes énergétiques minimales.

Mais c'est surtout à partir de l'année 2000 que se met en place une politique européenne plus volontaire pour lutter contre le changement climatique. Il est en effet apparu que, sans la mise en place rapide de nouvelles mesures, l'Union européenne ne serait pas en mesure d'atteindre l'objectif de réduction fixée dans le protocole de Kyoto.

Le changement climatique fait ainsi partie des quatre domaines mis en exergue dans le **sixième programme d'action pour l'environnement** (avec la nature et la biodiversité, l'environnement et la santé, la gestion des ressources naturelles et des déchets). Ce programme, présenté en 2001, définit les priorités et les objectifs de la politique environnementale de la Communauté jusqu'en 2010. Il détaille les mesures à prendre pour contribuer à la mise en œuvre de la stratégie de l'Union européenne en matière de développement durable.

En mars 2000, la Communauté lance également son **programme sur le changement climatique (PECC)** suivi, le 23 octobre 2001, par une communication sur sa mise en œuvre (CCE, 2000a ; CCE, 2001b). En effet, la Communauté européenne ayant ratifié, en tant que Partie, la Convention-cadre sur les Changements Climatiques le 21 décembre 1993, elle s'est engagée à adopter des politiques et à prendre des mesures correspondantes en vue de stabiliser les émissions de gaz à effet de serre en l'an 2000 au niveau de 1990. C'est donc dans ce cadre et au-delà pour avancer vers l'objectif fixé dans le cadre du Protocole de Kyoto (engagement à réduire de 8 %* ses émissions de gaz à effet de serre, entre 2008 et 2012 par rapport aux taux enregistrés en 1990), que s'inscrit le PECC.

La communication d'octobre 2001 présente le panel de mesures que la Commission proposera au cours des deux années à venir. Elles sont divisées en quatre catégories : mesures horizontales, mesures relatives à l'énergie, mesures relatives au transport et mesures concernant l'industrie.

Le domaine de l'énergie est particulièrement mis en exergue. De nombreuses directives sont prévues : directive-cadre relative aux exigences minimales d'efficacité pour les équipements de consommation, directive sur la gestion de la demande énergétique en vertu de laquelle les États membres devront fixer des objectifs de promotion et de gestion de la demande d'énergie, ainsi qu'assurer un niveau minimal d'investissement dans les activités relatives à l'efficacité énergétique, directive sur la production conjointe de chaleur et d'électricité, etc.

* En pratique, cet objectif nécessitera une réduction estimée à 14 % par rapport aux prévisions économiques « habituelles » (Communication de la Commission au Conseil et au Parlement européen – « Préparation de la mise en œuvre du Protocole de Kyoto », 1999) (CCE, 1999).

Pour ce qui concerne le secteur des transports, qui représente 28 % des émissions totales de CO₂, les mesures sont extraites du Livre blanc de 2001 sur la politique commune des transports (« La politique européenne des transports à l'horizon 2010 : l'heure des choix ») (CCE, 2001c) qui propose un train de 60 mesures au total, dont certaines devraient aussi permettre de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Le livre blanc comprend, par exemple une proposition visant à modifier la répartition entre les différents moyens de transport en promouvant les transports ferroviaires et par voie maritime ainsi qu'une directive pour promouvoir l'utilisation des biocarburants dans les transports.

D'autre part, le PECC souligne la nécessité de poursuivre les recherches dans les domaines de la climatologie, du développement technologique et de l'innovation : « La recherche constituera également un instrument essentiel pour identifier de nouvelles technologies rentables et socialement acceptables dans le domaine de l'énergie et du transport ainsi que d'autres mesures et méthodologies apparentées susceptibles d'atténuer le changement climatique ». Cette nécessité a d'ailleurs été prise en considération par l'initiative de la Commission sur la réalisation de l'« Espace européen de la recherche » et par le nouveau programme cadre (6^e PCRD).

Cependant, il est probable que toutes ces mesures ne s'avèreront pas suffisantes pour atteindre l'objectif de Kyoto. Aussi, 42 mesures complémentaires ont été prévues et listées dans le PECC. Une initiative sur la production de chaleur à partir des sources d'énergie renouvelables, un système de management et d'audit dans le domaine de l'énergie, ou un accord environnemental avec l'industrie automobile sont quelques-unes de ces mesures qui devraient être mises en œuvre prochainement. À ce propos, un rapport de suivi devrait être préparé pour la fin de l'année 2002.

En marge de ces mesures mais faisant également parti du programme européen sur le changement climatique, **un système d'échange des droits d'émission**^{*} de gaz à effet de serre interne à l'Union européenne est en cours d'étude.

La Commission a adopté un Livre vert pour mieux faire comprendre le rôle de l'échange de droits d'émission en tant qu'instrument potentiel de la politique à l'égard du changement climatique au sein de l'UE (CCE, 2000b). Ce Livre vert joue à la fois un rôle « informatif » en expliquant un instrument souvent mal compris et un rôle « analytique » en présentant des arguments convaincants en faveur d'une participation de la Communauté aux développements futurs dans ce domaine.

Une proposition de mise en œuvre d'un cadre législatif pour ce plan d'échange des droits d'émission est d'ores et déjà prévue (directive européenne pour l'échange de droits d'émission de gaz à effet de serre).

Ce mécanisme d'échange, qui devrait entrer en vigueur en 2005, préfigure le mécanisme global qui se mettra en place pour la période d'engagement 2008-2012 dans le cadre du Protocole de Kyoto.

Durant sa première phase (2005-2007), il ne s'appliquerait qu'au CO₂ seulement. Le plafond et le plan d'échange couvriraient au départ les émissions provenant des grandes activités industrielles et énergétiques qui sont plus propices à la surveillance. Dans un second temps, la Communauté pourrait procéder à la surveillance de petits

* Un tel système de permis est déjà actuellement testé au Royaume-Uni et au Danemark.

émetteurs mobiles (véhicules) qui soulèvent des questions techniques et administratives plus complexes. Les États membres seraient chacun responsables d'allouer des permis aux entreprises régies par la directive mais les lignes directrices pour la surveillance, l'établissement de rapport et la vérification n'ont, à ce jour, pas été définies. La Communauté peut encore opter pour un rôle de supervision ou un rôle d'autorité réglementaire.

Cette approche communautaire devrait permettre d'éviter des distorsions de la concurrence sur le marché intérieur.

En vue de compléter la directive-cadre sur les échanges des droits d'émission, une proposition de directive européenne sur les mécanismes de projet devrait être adoptée avant la fin du premier semestre 2003.

1.2.3. Aux États-Unis

a) Rejet du protocole de Kyoto et annonce d'un « plan de rechange »

En mars 2001, les États-Unis, en la voix de leur président George W. Bush, ont rejeté le protocole de Kyoto qui pourrait, selon les termes employés, « dévaster l'économie américaine et supprimer des millions d'emplois ».

Le principal grief concernait la disproportion entre les contraintes imposées aux pays en développement et les pays industrialisés, étant entendu que ces derniers devaient supporter seuls les efforts requis. Ainsi, en présentant, en février 2002, son « plan de rechange », G.W. Bush a déclaré qu'il serait « irresponsable » de ne pas demander à l'Inde et à la Chine de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre : « Des pays en développement comme la Chine et l'Inde émettent déjà la majeure partie des gaz à effet de serre dans le monde et il serait irresponsable de les absoudre du partage de certaines des obligations ».

Le nouveau plan destiné à ralentir le réchauffement climatique de rechange et intitulé « **Global Warming Plan** » s'appuie sur des mesures volontaires et marque ainsi une forte distanciation avec le protocole de Kyoto et ses modalités contraignantes.

La principale caractéristique de ce plan est de se baser sur la croissance économique américaine pour définir les objectifs de réduction des émissions. L'objectif visé n'est donc pas une réduction nette des émissions, mais une réduction relative liée à la croissance économique. Son argumentation tient en quelques mots : « La croissance économique est la solution, et non le problème » et « c'est le développement économique qui permet les investissements en technologies propres ». Ainsi, bien que la Maison Blanche estime que le « Global Warming Plan » devrait permettre de réduire de 18 % au cours des dix prochaines années les émissions générées par l'économie américaine, les émissions continueront à augmenter dans ce pays. L'objectif chiffré est, en effet, une diminution de 31 tonnes de GES par million de dollars de produit intérieur brut. Pour y parvenir, G. W. Bush propose notamment des incitations fiscales de 4,6 milliards de dollars pour favoriser la pénétration des sources d'énergie renouvelables. De gros crédits de recherche et les prémices d'un marché de permis d'émission sont également prévus par le plan.

Le président américain souhaite rallier à son plan les pays en voie de développement et affirme que l'approche américaine leur donnerait « un étalon pour le progrès sur les changements climatiques qui reconnaîtra leur droit au développement économique ». Le plan est cependant jugé très sévèrement par les ONG internationales. Steve Sawyer, l'un des experts climat de Greenpeace International, estime ainsi que le plan « aura très peu d'effets sur les émissions, à supposer qu'il en ait » et que « les États-Unis s'engagent dans la voie exactement inverse de celle poursuivie par le reste de la communauté internationale avec le protocole de Kyoto ».

Il est clair que l'on est loin de l'objectif assigné aux États-Unis par le protocole de Kyoto qui était une réduction nette de 7 % des émissions en 2010 par rapport à leur niveau de 1990 (le niveau actuel est de + 14 %). Le président Bush a toutefois annoncé que son plan n'était qu'un premier pas et qu'il pourrait être renforcé après 2012 pour stabiliser ou même diminuer les émissions si les recherches en cours levaient les incertitudes scientifiques actuelles sur les risques climatiques liés à l'effet de serre.

b) La troisième communication nationale à la Convention-cadre des Nations Unies sur le changement climatique

Répondant à leurs engagements vis-à-vis de la convention climat, les États-Unis ont présenté, en mai 2002, leur troisième communication nationale à la Convention-cadre des Nations Unies sur le changement climatique intitulée « **U.S. Climate Action Report – 2002** » (US dept of State, 2002).

U.S. Strategies in Key Sectors to Reduce Net Emissions of Greenhouse Gases

The U.S. government is currently pursuing a broad range of strategies to reduce net emissions of greenhouse gases.

Electricity
Federal programs promote greenhouse gas reductions through the development of cleaner, more efficient technologies for electricity generation and transmission. The government also supports the development of renewable resources, such as solar energy, wind power, geothermal energy, hydropower, bioenergy, and hydrogen fuels.

Transportation
Federal programs promote development of fuel-efficient motor vehicles and trucks, research and development options for producing cleaner fuels, and implementation of programs to reduce the number of vehicle miles traveled.

Industry
Federal programs implement partnership programs with industry to reduce emissions of carbon dioxide (CO₂) and other greenhouse gases, promote source reduction and recycling, and increase the use of combined heat and power.

Buildings
Federal voluntary partnership programs promote energy efficiency in the nation's commercial, residential, and government buildings (including schools) by offering technical assistance as well as the labeling of efficient products, new homes, and office buildings.

Agriculture and Forestry
The U.S. government implements conservation programs that have the benefit of reducing agricultural emissions, sequestering carbon in soils, and offsetting overall greenhouse gas emissions.

Federal Government
The U.S. government has taken steps to reduce greenhouse gas emissions from energy use in federal buildings and in the federal transportation fleet.

« U.S. Climate Action Report – 2002 »

Préparé par l'Agence américaine de Protection de l'Environnement (EPA) et soumis aux Nations Unies, le rapport passe en revue les politiques déjà en place et les propositions de l'administration Bush pour traiter le changement climatique, y compris ceux de la politique énergétique nationale.

Le rapport souligne également les spécificités nationales en terme de climat, géographie et population. Il présente les tendances dans des émissions de gaz de serre et les projections des émissions futures. Enfin, il examine les conséquences potentielles du changement climatique et les moyens possibles de s'y adapter.

Les publications de l'Agence Internationale de l'Energie

L'Agence Internationale de l'Energie collecte et publie des données sur les politiques énergétiques susceptibles d'atténuer le changement climatique. Elle identifie et analyse les options économiques et technologiques que ses pays membres pourraient mettre en oeuvre.

« Dealing with Climate Change : Policies and Measures in IEA Member Countries » est un rapport établi par l'IEA et l'OCDE en 2001 (IEA, 2001a).

Il détaille plus de 200 nouvelles mesures relatives au domaine de l'énergie qui ont été prises en 2000 dans les pays membres de l'IEA pour lutter contre le changement climatique. Les actions sont énumérées pour chacun des 26 pays selon 5 catégories : politique fiscale, permis négociables, instruments réglementaires et approches volontaires, politiques de R&D, et processus politiques. En outre, les politiques sont présentées selon la source d'énergie et l'utilisation finale. Le rapport conclue sur l'insuffisance des moyens mis en oeuvre.

Par ailleurs, l'IEA a consacré un rapport spécial au domaine du transport : « The Road from Kyoto: Current CO₂ and Transport Policies in the IEA » (IEA, 2000).

Le rapport se présente en trois volets : il passe en revue les politiques existantes ou émergentes pour réduire des émissions de CO₂ dues au transport dans les pays suivants (plus l'Union européenne) : le Danemark, l'Allemagne, la Hollande, la Suède, le Royaume-Uni et les États-Unis ; il décrit l'histoire et le contexte dans lesquels ces politiques ont été développées ; il s'intéresse enfin aux leçons apprises dans chaque pays et comment elles pourraient s'appliquer à d'autres pays.

Le rapport fournit donc une description complète des principaux éléments clefs de ces politiques du transport.

1.3. DE NOUVEAUX CONCEPTS ÉNERGÉTIQUES POUR LES COMBUSTIBLES FOSSILES

Dans le domaine de la production d'énergie, les critères de choix d'une technologie sont nombreux et variés. Tout en prenant en compte les limites intrinsèques imposées par la thermodynamique (rendement, puissance...), ces choix peuvent être liés, par exemple, au combustible (disponibilité, facilité de manutention, de transport, stockage...), aux contraintes économiques (coût, main d'œuvre, prix de revient et de vente du kWh, taxes diverses...), aux conditions imposées par le réseau de distribution de l'énergie électrique ou à des critères environnementaux (effluents de toute nature, impacts visuels et sonores...). Les activités de R&D prennent en compte ces différents aspects pour explorer de nouvelles voies d'approvisionnement énergétique et optimiser les technologies existantes.

Pour ce qui concerne spécifiquement l'objectif de réduction des émissions de CO₂, les recherches menées dans le domaine du nucléaire et des énergies renouvelables (solaire, hydraulique, géothermie, biocombustibles...) constituent un pôle essentiel. Cependant, nous avons choisi de nous intéresser ici uniquement aux technologies développées dans les grandes unités centralisées de production d'énergie à partir de combustibles fossiles et, plus particulièrement, au concept dit de « zéro émission ».

Sans nous étendre sur des notions très techniques, nous présentons quelques-uns des éléments qui montrent comment ce concept pourrait être mis en pratique dans les décennies prochaines.

1.3.1. Les filières actuelles de production centralisée d'énergie

Les centrales électriques contribuent aujourd'hui dans le monde pour environ 40 % aux émissions anthropogéniques de CO₂ (GIEC, 2001). Parmi les types de combustibles utilisés dans la production centralisée d'énergie, charbon et gaz naturel arrivent en tête.

Dans un objectif de réduction des émissions, des efforts sont réalisés pour augmenter le rendement des centrales et mettre en place, là où c'est possible et justifiable, la cogénération, c'est-à-dire la production combinée de chaleur et d'électricité.

Le remplacement des sources d'énergies fossiles les plus riches en carbone (par exemple, le charbon) par des énergies moins riches (comme le gaz naturel) peut également être une source d'économie en terme d'émissions de CO₂ (concept du « fuel switching »). Ainsi, on estime que la production de 1 MWh d'électricité, génère en moyenne de 900 à 1000 kg de CO₂ avec le charbon utilisé comme combustible, 620 à 850 kg avec le pétrole et 440 à 610 kg avec le gaz naturel (sources : Vignes J.L. *et al.*, 1997-1998).

a) La tendance actuelle favorise de plus en plus l'utilisation du gaz naturel

Considéré longtemps comme un produit de seconde catégorie, le gaz naturel, est devenu aujourd'hui un vecteur énergétique à large spectre. Il pénètre tous les secteurs de consommation énergétique que ce soit l'électricité, la production de chaleur ou, plus récemment, les transports. Toutefois, le secteur d'expansion le plus significatif est la production d'électricité où il participe aujourd'hui pour 15 % de la production (CCE, 2001a).

Ainsi, pour les nouvelles centrales, il domine les autres combustibles et représente, pour l'année 2000, deux tiers des projets réalisés* (IEA, 2001b). À l'horizon 2020-2030, on s'attend par extrapolation des tendances du marché, à ce que l'électricité soit produite pour près de la moitié à partir du gaz naturel (40 %) soit 45 % du gaz naturel consommé (CCE, 2001a).

Dans ce secteur, la technique la plus couramment utilisée jusque là pour la production d'énergie centralisée est la **centrale à cycle combiné au gaz naturel (NGCC : natural gas combined cycle)**.

b) Malgré un certain désintérêt depuis quelques années, le charbon reste un vecteur énergétique important

Le charbon, qui regroupe en fait quatre familles, l'antracite, la houille, le lignite et la tourbe, est porteur de contraintes propres qui le placent dans une position défavorable

* Le charbon et le fuel lourd représentent pour leur part un peu plus de 10 % des projets de nouvelles centrales, le reste étant constitué par l'énergie hydraulique (7 %), le diesel (7 %), l'énergie éolienne et les autres énergies renouvelables non hydrauliques (5 %) et le nucléaire (2 %) (IEA, 2001a).

par rapport aux autres combustibles. Outre un pouvoir calorifique et des commodités d'usage (transport, manutention) moins performants, le charbon est potentiellement très polluant et ce, à tous les stades du cycle de production. Cependant, son coût, modéré et relativement stable et sa grande disponibilité tendent à amortir ses handicaps en terme d'impacts environnementaux.

Si, dans certains pays, le charbon est éliminé progressivement de certains secteurs principalement à cause des émissions nocives qu'il génère, il reste, parfois, un vecteur énergétique dominant dans le secteur de la production électrique (Danemark, Allemagne, Grèce, Irlande ou Royaume-Uni : plus de 45 % de l'électricité est produite dans ces pays à partir du charbon). Ailleurs, comme en France, il sert souvent de combustible d'appoint.

En terme de production d'énergie centralisée, la technique utilisée depuis plus de 50 ans et qui reste la plus employée est celle des **centrales à charbon pulvérisé** (pulverised coal-fired steam cycle). Mais d'autres techniques à plus faible pénétration existent et seront peut-être un jour employées à grande échelle : centrales à combustion en lit fluidisé (FBC) et **centrales à cycle combiné avec gazéification intégrée du charbon (IGCC)**. Cette dernière, bien qu'encore faiblement rentable, est très prometteuse. Il existe de nombreuses variantes dans les procédés dont nous ne pouvons pas faire état ici (type de lit, mode d'introduction des réactifs, nature du comburant et de l'agent gazéifiant, mode d'extraction des cendres, etc.), mais l'essentiel tient au principe de combustion : l'IGCC est une centrale qui brûle, à la place du gaz naturel, un gaz de synthèse composé de monoxyde carbone et d'hydrogène (CO + H₂) obtenu par la gazéification du charbon.

En moyenne, la teneur en CO₂ de ces centrales fonctionnant au charbon ou au gaz naturel varie entre 4 et 15 % en volume (tabl. 10).

Principaux types de centrales	Concentration en CO ₂ dans l'effluent gazeux (vol. %)
Centrales à charbon pulvérisé	14
Centrales à cycle combiné avec gazéification intégrée du charbon (IGCC)	9
Centrales à cycle combiné au gaz naturel (NGCC)	4

Tabl. 10 - Concentrations moyennes en CO₂ du flux gazeux à la sortie des principaux types de centrales (IEA, 2001c).

1.3.2. Technologies de contrôle des émissions de CO₂

Les technologies telles que le « fuel switching » ou les « clean coal technologies » permettent une réduction de l'intensité carbone du combustible ou de la chaîne de production énergétique mais pas sa totale élimination. Pour atteindre spécifiquement cet objectif du « zéro émission », il existe globalement trois options possibles qui correspondent ainsi à la mise en application du principe de « décarbonisation » du combustible fossile et dont le dénominateur commun est d'obtenir un flux de CO₂ le plus pur possible :

- récupérer, à la cheminée, le flux gazeux puis isoler le CO₂ : opération dite de « capture post-combustion » ou encore « downstream decarbonisation » ;

- retirer le carbone en amont, avant la combustion pour prévenir la formation d'effluent contenant du CO₂ : c'est la « capture pré-combustion » ou « upstream decarbonisation » ;
- modifier les procédés et notamment la nature du comburant pour obtenir, en sortie, un flux concentré de CO₂ : c'est le principe des cycles O₂/CO₂.

a) « Capture post-combustion » ou « downstream decarbonisation »

Les mesures sont curatives en ce sens que l'on essaie de capturer le maximum de CO₂ dans les effluents gazeux* une fois qu'il a été formé dans le processus de combustion. Il existe, à l'heure actuelle, quatre principales techniques à degrés divers de maturité. En effet, certaines sont actuellement disponibles sur le marché alors que d'autres demandent encore des développements. La séparation du dioxyde de carbone peut être réalisée par absorption en présence de solvants aminés (méthode la plus fréquemment utilisée), par adsorption sur charbon activé ou d'autres matériaux, par passage du flux gazeux à travers des membranes spéciales ou par séparation à basse température. Toutefois, ces procédés sont coûteux et de nombreux problèmes techniques demandent encore à être résolus.

• Séparation du CO₂ par absorption

On utilise des solvants qui vont absorber, par voie physique ou chimique, le CO₂ du mélange gazeux. L'absorption chimique est la technique la plus utilisée car elle présente les meilleures performances.

Toute substance présentant une réactivité importante avec le CO₂ peut servir pour l'extraction mais le solvant le plus courant est une solution aqueuse de monoéthanolamine (MEA) (on appelle alors le dispositif « CO₂ MEA Scrubbers »). Le CO₂ se lie chimiquement à la fonction amine. Le solvant doit être régénéré thermiquement par rupture de cette liaison, relâchant dans le même temps le CO₂ de manière contrôlée. C'est pourquoi le procédé consomme une grande quantité de chaleur et représente un coût énergétique élevé.

La présence d'un tel système de capture du CO₂ modifie donc les performances de la centrale. De plus, le CO₂ sortant du régénérateur doit être comprimé pour faciliter son transport ultérieur.

À l'heure actuelle, on estime que, pour une centrale de 40 % de rendement, le coût de la capture s'étale entre 35 et 40 US \$/tonne de CO₂ et l'augmentation du coût de l'électricité est de 60 %. Le coût de capture atteint 70 US \$/tonne de CO₂ lorsque le rendement de la centrale est de 33 %. Il est possible, par cette méthode, d'obtenir un flux de CO₂ pur à 90 % (commission AMPERE, 2000).

Des développements sont actuellement en cours afin d'augmenter les performances de la capture par absorption chimique avec une consommation d'énergie et un coût d'investissement moindre.

* Typiquement, le mélange gazeux en sortie de centrale est constitué majoritairement : d'azote (autour de 70 %), de CO₂ (5 à 15 %), d'eau (autour de 10 %) et d'oxygène (quelques %).

- **Séparation du CO₂ par adsorption**

La séparation CO₂ depuis un mélange gazeux peut-être réalisé par l'adsorption du gaz à la surface de matériaux tels que les zéolites. Ces minéraux ont la caractéristique de posséder de grandes surfaces spécifiques et une fine porosité de surface qui permet l'adsorption efficace de certains gaz. La capacité d'adsorption et les cinétiques dépendent de nombreux facteurs : la dimension des pores de l'adsorbant, le volume des pores, la surface spécifique et l'affinité du gaz pour l'adsorbant.

Deux types d'expériences ont été réalisés pour évaluer le système d'adsorption basé sur les zéolites : 1) en faisant varier la pression (PSA = *pressure swing adsorption*) ; les gaz sont d'abord adsorbés à haute pression, isolés, et ensuite désorbés (régénérés) en réduisant la pression, et 2) en faisant varier la température (TSA = *temperature swing adsorption*) ; les gaz sont adsorbés à basse température, isolés, et puis régénérés à haute température.

Ces méthodes sont utilisées dans certains cas dans la production de l'hydrogène et la séparation du CO₂ du gaz naturel mais les coûts énergétiques sont importants.

En général, l'adsorption n'est pas une méthode très performante pour la séparation du CO₂ (la capacité et la sélectivité du CO₂ pour les adsorbants est faible), mais elle peut être utilisée avec succès en combinaison avec d'autres technologies de piégeage.

- **Séparation du CO₂ par membranes**

Les membranes les mieux adaptées à la récupération de CO₂ dans les effluents gazeux sont de type organiques non poreuses. Divers polymères peuvent être utilisés (polyimide PI, polydiméthylphénylèneoxyde PPO, polysulfone PS). Le mélange gazeux issu de la centrale doit être comprimé avant d'entrer dans l'unité de membranes.

Le principe est le suivant : le CO₂ migre sélectivement à travers les membranes, alors que le mélange gazeux épuré est toujours sous pression. Il est alors détendu dans un turbogénérateur avant d'être relâché à l'atmosphère. Le flux de CO₂ récupéré contient encore une importante fraction d'azote et la pureté du CO₂ n'est pas suffisante. Aussi, il doit être comprimé puis condensé dans un séparateur, tandis que l'azote restant à l'état gazeux est détendu et renvoyé à l'entrée de l'unité de membrane.

Cette technique de séparation de gaz par membranes est principalement utilisée pour la production d'oxygène et d'azote (séparation de l'air), pour la purification du gaz naturel (séparation CO₂/CH₄) et pour la récupération d'hydrogène dans les effluents gazeux des usines d'ammoniac (séparation H₂/N₂).

Par rapport à l'unité de séparation du CO₂ des fumées par absorption chimique MEA, l'utilisation de membranes avec obtention des mêmes performances (soit 80 à 90 %) coûte deux fois plus cher. L'augmentation des coûts est principalement due aux consommations énergétiques des compresseurs, nécessaires pour vaincre la perte de charge dans les membranes. Cette technologie est donc moins bien adaptée à l'extraction du CO₂ des effluents de centrales que l'absorption chimique par MEA.

- **Séparation du CO₂ par distillation cryogénique**

Ce procédé est basé sur la condensation ou la solidification du CO₂ à très basse température. En effet, le diagramme de phase (P,T) du CO₂ montre que si l'on refroidit du CO₂ gazeux, il se liquéfie ou se solidifie selon que la pression est au-dessus ou en dessous du point triple (fig. 34).

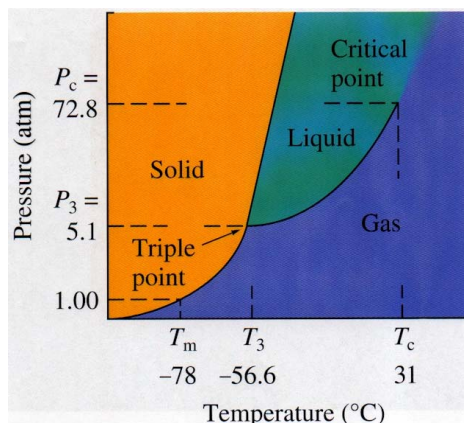


Fig. 34 - Diagramme de phase du CO₂.

On peut donc récupérer le CO₂ liquide ou solide en refroidissant le mélange gazeux à une pression déterminée. Ce système requiert une forte consommation énergétique et divers systèmes ont été étudiés visant à la minimiser, comme, par exemple, l'utilisation de plusieurs colonnes en série, ou l'ajout d'additifs de manière à modifier le diagramme de phase, mais les pressions requises sont toujours très élevées. Même lorsque la récupération du CO₂ se fait sous forme solide, ce qui limite relativement la pression requise comme on peut le voir sur la figure 34, ce procédé est très gourmand en énergie d'énergie et contribue ainsi à diminuer le rendement de la centrale.

Jusqu'à présent, ce procédé a été surtout étudié dans le but de séparer le CO₂ du gaz naturel, de manière à obtenir une spécification adéquate du gaz naturel ou encore de séparer le CO₂ en vue de l'utiliser pour la récupération de pétrole (voir deuxième partie, § 2.2.2.). Mais peu d'efforts ont été faits en ce qui concerne l'extraction du CO₂ des effluents de centrales, c'est-à-dire principalement la séparation CO₂/N₂.

À performances égales, la séparation du CO₂ des effluents gazeux par distillation à très basse température permet d'atteindre un coût de récupération du CO₂ semblable à celui obtenu à l'aide d'une unité d'absorption par MEA, c'est-à-dire environ 40 US \$/tonne de CO₂ séparé. Il est difficile de prévoir avec précision le surcoût d'investissement vu le manque de maturité de cette technologie. On peut donc considérer que cette technique n'est pas encore actuellement en réelle compétition avec l'absorption chimique.

b) « Capture pré-combustion » ou « upstream decarbonisation »

Cette option est préventive dans le sens où l'on empêche le CO₂ de se former lors de la combustion. Une des voies actuellement étudiées pour mettre en œuvre ce principe est l'utilisation, après adaptation, d'une installation de gazéification intégrée du charbon à cycle combiné (IGCC).

En effet, l'IGCC est une technologie très bien adaptée pour brûler du charbon sans émission de CO₂. Il faut seulement convertir le gaz de synthèse CO+H₂, lors d'une réaction « shift » à la vapeur d'eau, en CO₂ + H₂ (en présence de vapeur d'eau, le CO est pratiquement totalement transformé en CO₂ et H₂). Le CO₂ est alors extrait de ce flux dans une unité de capture par absorption physique, et le flux gazeux débarrassé du CO₂, assimilé à de l'hydrogène, entre dans la chambre de combustion de la turbine à gaz. Cependant, les turbines actuelles fonctionnent au gaz naturel et au gaz de synthèse. Elles doivent donc encore subir des adaptations pour pouvoir fonctionner à l'hydrogène.

Séparation du CO₂

Lorsque le flux gazeux entre dans l'unité de séparation, il est riche en CO₂ et déjà sous pression. Dans ces conditions, l'absorption physique se révèle être la plus performante des méthodes de séparation. Le CO₂ est désorbé par simple diminution de pression et non par régénération thermique. La récupération de CO₂ dans l'unité de séparation atteint 98 à 99 %. Si, dans le meilleur des cas, la conversion du CO en CO₂ par la réaction shift atteint 98 %, la récupération du carbone est efficace à environ 95 % (commission AMPERE, 2000).

Perte de rendement de la centrale et estimation des coûts de la décarbonisation avant combustion

Suite à l'introduction du système de capture du CO₂ avant la combustion, les performances de la centrale se dégradent. La puissance fournie par la centrale diminue, ce qui a un impact direct sur le coût de l'électricité. De plus, le CO₂ issu de l'unité de séparation CO₂/H₂, même s'il est déjà sous pression doit encore être comprimé.

D'autre part, le coût de récupération de CO₂ s'étalerait entre 18 et 35 US \$ par tonne de CO₂ récupérée, si la réaction shift et la capture du CO₂ sont intégrées dans une centrale IGCC. Cela correspond à une augmentation d'un tiers du prix de l'électricité générée dans la centrale IGCC de référence.

L'adaptation de la centrale IGCC n'est que l'une des voies d'investigation dans ce concept de « décarbonisation upstream ». Il est également possible de « décarboniser » du gaz naturel avant sa combustion à partir de son **reformage à la vapeur d'eau**. Les produits de la réaction sont également CO₂ et H₂. Le CO₂ est isolé et le H₂ utilisé comme vecteur énergétique (energy carrier). Les piles à combustibles sont l'une des voies possibles d'utilisation de l'hydrogène.

Les piles à combustibles

Les piles à combustible sont régulièrement citées comme technologie prometteuse pour l'approvisionnement énergétique de demain.

Leur principal intérêt tient dans les rendements réalisables qui peuvent être beaucoup plus élevés que dans les systèmes énergétiques classiques. Alors que, dans une centrale thermique, l'énergie est d'abord convertie en chaleur (combustion) qui est transformée par un cycle thermique en puissance mécanique (turbine) puis en électricité (générateur), les étapes intermédiaires, à savoir la conversion en chaleur et en puissance mécanique n'existent pas dans le cas d'une pile à combustible. L'énergie chimique d'un combustible y est transformée directement en électricité au moyen d'une réaction électrochimique.

En général, la réaction requiert de l'hydrogène en tant que combustible. L'hydrogène n'étant pas une énergie primaire, il faut d'abord la produire. Il existe différents moyens d'obtenir de l'hydrogène : par steam reforming (le reformage à la vapeur) d'un combustible fossile (méthane, propane, butane, méthanol, etc.), par reformage à oxydation partielle (essences, pentane...), par gazéification de charbon ou de biomasse ou par hydrolyse d'eau. Bien que la production d'hydrogène à partir des énergies renouvelables soit concevable à plus long terme, combiner une pile à combustible avec une énergie renouvelable est aujourd'hui extrêmement onéreux. Dans la majorité des cas, des piles à combustible utilisent ainsi de l'hydrogène en provenance des sources fossiles.

À l'heure actuelle, il n'existe pas d'infrastructure pour distribuer l'hydrogène, telle qu'elle existe pour les combustibles classiques comme le gaz naturel ou le mazout. L'hydrogène est un gaz extrêmement inflammable et explosif et requiert des mesures de sécurité adéquates.

Aujourd'hui, l'offre commerciale des piles à combustible est très limitée et le prix de revient reste élevé. Leur application commerciale requiert un développement plus avancé, aussi bien sur le plan technique que sur le plan économique. Les piles à combustible constituent une technologie fort prometteuse offrant des avantages en ce qui concerne ses performances et son impact sur l'environnement : elles produisent très peu d'émissions nocives (surtout NOx) et fonctionnent sans aucun bruit. Reste que si l'hydrogène est produit à partir d'une source fossile, le système de pile à combustible émettra du CO₂, même si cela est tempéré par des rendements de conversion élevés. Sauf si, précisément, la décarbonisation du combustible fossile en amont s'accompagne de la capture du CO₂.

En France, l'ADEME a lancé le réseau technologique « Piles à combustible » en juin 1999, avec pour mission de mettre en place une technologie piles à combustible commercialement viable. Le réseau s'organise autour d'équipes de recherche et de développement issues du monde industriel et de leurs directions scientifiques et techniques (grands groupes, PME/PMI, ingénieries) ou du secteur public (universités, organismes de recherche, écoles d'ingénieurs).

c) Les cycles de combustion O₂/CO₂

Le problème principal de la récupération downstream tient dans les faibles teneurs en CO₂ des effluents gazeux des centrales. D'où l'idée de les augmenter en réalisant la combustion de l'hydrocarbure avec de l'O₂ pur et en utilisant le CO₂ comme fluide de travail (au lieu de l'azote de l'air). Cette dernière technique, connue sous le nom de combustion O₂/CO₂, fait actuellement l'objet de nombreux travaux de R&D.

Les produits de la combustion sont essentiellement CO₂ et H₂O. L'eau est retirée par simple refroidissement et condensation et le CO₂, circulant en boucle fermée, peut être extrait avec une simple vanne. Cela évite donc les dispositifs de capture du CO₂, par exemple par absorption chimique, qui sont pénalisants pour les performances et coûteux. Un autre avantage de cette technique est que les autres polluants éventuellement présents au départ dans le combustible se retrouvent sous forme d'oxydes (NOx, SO₂) dans les flux de CO₂ et de H₂O et ne sont alors plus relâchés dans l'atmosphère.

En revanche, dans ce type de centrale, il faut toujours une unité de séparation d'air. La consommation d'énergie est donc déplacée d'aval (par exemple, absorbeurs chimiques dans les effluents gazeux de sortie), en amont. Des études d'optimisation technico-économiques doivent encore être faites pour évaluer les avantages et inconvénients des diverses options.

d) Synthèse et comparaison des différentes méthodes

Dans le cas de la capture du CO₂ downstream (effluents de centrales), le taux atteignable de capture du CO₂ est de 90 % et sa pureté est de 99 % et ce, quelle que soit la méthode de capture utilisée. Mais le coût et la pénalité sur les performances sont différents.

L'absorption chimique MEA est techniquement disponible et est le moins pénalisant des systèmes de capture du CO₂ dans l'effluent gazeux. Le coût de capture du CO₂ varie entre 35 et 70 US \$/tonne de CO₂ suivant le rendement de la centrale (une perte de rendement de la centrale de 7 % entraîne un quasi doublement du coût de la capture du CO₂) (tabl. 11).

Centrale	Rendement net de la centrale	Technologie de capture	Coût de capture (USD/tonne CO ₂)	Augmentation du coût de l'électricité (en % du cas de base)
Charbon	40 %	Abs. Chim. MEA	34-39	+ 60 %
	40 %	Membranes	65-80	+ 120 %
	40 %	Distillation cryog.	30-45	+ 60 %
	33 %	Abs. Chim. MEA	60-70	+ 120 %
IGCC	43 %	Abs. physique	18-32	+ 30 %
NGCC	55 %	Absorption chimique	33-60	+ 50 %

Tabl. 11 - Implication des procédés de capture du CO₂ sur les technologies charbon, IGCC et NGCC (d'après commission AMPERE, 2000).

Les membranes sont moins bien adaptées à la séparation CO₂/N₂. La capture du CO₂ par membranes est de l'ordre de deux fois plus coûteux que par absorption chimique MEA (65-80 US \$/tonne de CO₂).

La séparation du CO₂ par distillation cryogénique est prometteuse du point de vue des performances, mais demande encore d'importants développements, notamment dans la manipulation du CO₂ solide pendant le procédé.

L'adsorption sur support solide n'est pas adaptée à la récupération du CO₂ des effluents gazeux de centrales et n'est applicable qu'à petite échelle.

La capture avant la combustion dans une centrale IGCC en utilisant l'absorption physique permet d'atteindre un taux d'extraction plus élevé. Cette technique de séparation est ici bien adaptée car la pression partielle et la concentration du CO₂ dans le flux entrant dans l'unité de capture sont élevées. Le coût de la capture du CO₂ (entre 18 et 32 US\$/tonne de CO₂) et l'augmentation du coût de l'électricité sont environ deux fois moindres que dans le cas de la capture par MEA et la perte de rendement de la centrale est également limitée. Cependant, ce procédé, qui demande le développement d'une turbine à hydrogène, n'a pas encore atteint le stade commercial.

Dans le cas des cycles O₂/CO₂, le principe est différent : le CO₂ est le fluide de travail et l'oxygène est le comburant. Les produits de combustion sont l'eau et le CO₂. Après condensation de l'eau, le CO₂ est alors séparé par simple purge à la sortie du compresseur. Le rendement de ce cycle est moins élevé que celui d'une centrale de référence sans capture. Cependant, pour extraire le CO₂ du cycle, à l'état liquide ou

supercritique, il n'est plus nécessaire d'avoir recours à des systèmes de capture impliquant de fortes pénalités de rendement ni de comprimer le CO₂ extrait.

Le tableau 11 synthétise les coûts de capture du CO₂ pour les différentes technologies et les coûts supplémentaires induits pour l'électricité.

CO₂ capture project

The CO₂ Capture Project (CCP) is an international initiative by eight of the world's leading energy companies to develop new technologies to capture and store CO₂ that is currently emitted by large, fixed sources such as turbines, heaters and boilers. Working with governments, non-government organisations (NGOs) and other stakeholders, the CCP plans to deliver bridging technologies, which (in the medium-term) will enable society to access fossil fuel based energy with reduced GHG emissions. Technologies developed by the CCP will provide a new suite of opportunities to reduce CO₂ emissions, complementing other efforts in this arena (such as improved energy efficiency and non-fossil energy resources).

CCP industry participants are BP, ChevronTexaco, Eni, Norsk Hydro, PanCanadian, the Royal Dutch/Shell Group of Companies, Statoil and Suncor Energy. Co-funding governments are USA (Department of Energy) European Union (DGTREN and DGRES) and Norway (Klimatek program).

« Greenhouse Issues » - Number 59, March 2002.

1.3.3. Enjeux et perspectives

Les solutions existent aujourd'hui pour mettre en œuvre le concept de décarbonisation dans les grandes unités centralisées de production d'énergie à partir de combustibles fossiles et réduire ainsi drastiquement les émissions mondiales de CO₂. Les coûts restent certes importants mais, grâce à des efforts de R&D intensifs et de grands programmes comme le « CO₂ Capture project » de l'IEA, on devrait parvenir à rendre ces technologies économiquement rentables dans les décennies prochaines.

L'enjeu est considérable puisque, aujourd'hui encore, le principal frein à l'utilisation du charbon réside dans son potentiel de nuisance sur l'environnement, notamment en terme de changement climatique. En parvenant à diminuer, voire à supprimer, les émissions de CO₂ liées à ce combustible, il pourrait retrouver ses lettres de noblesse et faciliter considérablement l'accession au développement des pays les plus pauvres.

On doit aussi considérer les énergies non conventionnelles (huiles lourdes et extra-lourdes, bitumes, schistes bitumineux, hydrates de gaz) qui ont un potentiel énorme en terme de quantités disponibles et qui présentent l'avantage d'une répartition mondiale plus équilibrée que ne le font les ressources conventionnelles. Grâce à ce concept de décarbonisation, elles pourraient également accéder à une place de choix et répondre au problème de l'épuisement des réserves de pétrole et de gaz naturel auquel nous serons confrontés à plus ou moins brèves échéances*.

Par ailleurs, la décarbonisation de combustibles fossiles par reformage à la vapeur et production associée d'hydrogène ouvre également la voie à des économies d'émissions considérables. Nouveau vecteur énergétique, l'hydrogène pourrait en effet alimenter des unités de tailles plus réduites, voire être utilisé à l'échelle domestique, où la récupération des effluents n'est pour le moment pas envisageable (quantité et concentrations trop limitées en CO₂). La décarbonisation upstream couplée à

* On pourra, à ce sujet, se référer à une récente étude conduite par l'IFP dans le cadre du Club « énergie, prospective et débats » du Commissariat général du Plan, qui analyse, en terme d'émissions de CO₂ et de consommations énergétiques, les filières conventionnelles et non-conventionnelles de production de carburants à partir de ressources fossiles (Plouchart G., 2001).

l'utilisation de piles à hydrogène constitue donc peut-être, aux côtés des énergies renouvelables, l'une des solutions énergétiques des prochaines décennies.

Cependant, même si l'on parvient à amener à maturité les technologies que nous avons décrites, le problème reste entier s'il n'existe pas de moyen d'empêcher, ensuite, le retour à l'atmosphère du CO₂ extrait. Ainsi, la question d'une capture « upstream » ou « downstream » devient dérisoire ainsi que toutes les technologies développées autour de ces procédés si l'on ne sait stocker durablement et en toute sécurité des quantités aussi importantes de CO₂. C'est pourquoi, d'énormes moyens de R&D sont parallèlement mis en oeuvre pour démontrer la faisabilité de cet autre concept : la séquestration du CO₂.

2. Séquestrer le CO₂

2.1. SÉQUESTRATION : DÉFINITION ET OBJECTIFS

Dans le cadre de la lutte contre l'augmentation de l'effet de serre, séquestrer, piéger ou encore stocker du CO₂ c'est faire en sorte de l'isoler durablement de l'atmosphère afin qu'il ne concourt pas à perturber l'équilibre thermique de la Terre.

Pour décrire les sites potentiels qui permettent ainsi de mettre le carbone « à l'abri » de l'atmosphère, l'approche classiquement utilisée consiste à considérer les différents milieux naturels d'intervention : écosystèmes terrestres, sous-sol, océan ; puis à déterminer les modes de séquestration possibles dans chacun d'eux. Cependant, nous avons vu que ces milieux renferment eux-mêmes plusieurs réservoirs impliquant des formes chimiques spécifiques du carbone. Les mécanismes d'échange avec l'atmosphère et donc les processus de séquestration pourront donc être très différents à l'intérieur même de chacun de ces milieux naturels.

Ici, nous avons choisi de développer une autre approche qui s'applique à considérer les remèdes en fonction des maux : quelle séquestration pour quel type d'émission ?

Les sources importantes et concentrées ne peuvent, en effet, pas être traitées comme les petites sources diffuses de gaz carbonique. Seules les premières se prêtent à une capture du CO₂ avant sa diffusion dans l'atmosphère. Une fois le flux gazeux récupéré et éventuellement traité, il est possible d'injecter le CO₂ dans un milieu où il sera durablement retenu. Dans le sens où l'étape de capture fait intervenir la main de l'homme, ce mode de séquestration peut être qualifié d'industriel. Il n'est envisageable que lorsque la quantité d'effluent, d'une part, et sa teneur en CO₂, d'autre part, sont suffisamment importantes. Les technologies actuellement disponibles imposent en effet que la concentration en CO₂ du gaz soit, au minimum, quelques centaines de fois supérieures à celle de l'atmosphère. Les deux milieux de confinement possibles sont le sous-sol, qui correspond à l'option géologique, et l'océan par voie d'injection dans les eaux profondes.

En revanche, il reste encore aujourd'hui techniquement impossible d'empêcher la diffusion dans l'atmosphère du CO₂ des multiples points d'émissions de taille réduite que sont les sources diffuses. Le chauffage des habitations ou les gaz d'émission des véhicules* sont deux exemples, parmi les plus significatifs, de ce type de sources. En valeur cumulée, ces sources représentent cependant des quantités de CO₂ considérables. Puisqu'il n'existe pas de moyens pour empêcher qu'elles contribuent à augmenter le stock de CO₂ atmosphérique, on peut au moins limiter leur temps de résidence dans l'atmosphère. Pour cela, il faut agir sur les flux de carbone échangés en « dopant » les réservoirs autres qu'atmosphériques c'est-à-dire en augmentant leur capacité de stockage. La séquestration consiste alors à piéger du carbone dans la matière organique terrestre (biomasse et sols) et océanique. Dans ce contexte, les termes de fixation ou d'absorption sont généralement préférés pour désigner le mécanisme selon lequel le carbone est séquestré.

* À titre d'illustration, une voiture moyenne produit chaque année 2 à 3 fois sa masse de CO₂.

Dans le premier cas, le CO₂ est capturé, transporté et physiquement stocké dans un système clôt (option que nous avons désignée sous le terme de séquestration industrielle). Alors que, dans le deuxième, l'intervention est indirecte : on agit sur le réservoir de carbone organique en s'appuyant sur le processus naturel de fixation du carbone qu'est la photosynthèse.

a) Objectifs qualitatifs

Au sein de ces deux grandes catégories de séquestration, les solutions envisageables sont nombreuses et la communauté scientifique internationale s'active à repousser les limites du possible. Les énormes moyens financiers alloués ces dernières années constituent une manne très attractive et l'on pourrait voir naître des concepts plus ou moins contestables que ce soit d'un point de vue scientifique, éthique ou simplement économique.

Au-delà de la faisabilité technique (mise en oeuvre des procédés), la définition d'un cadre d'acceptabilité des options de séquestration passe donc par de grandes questions incontournables :

- la mise en œuvre du procédé est-elle économiquement concurrentielle ? Son coût est-il acceptable ?
- jusqu'à quel point le procédé est-il bénéfique pour l'environnement ? En particulier, lorsque les techniques utilisées pour la capture, le transport et le confinement sont consommatrices d'énergie, encore fossiles le plus souvent, quel est le gain réel en CO₂ ? Au-delà, si les bénéfices en terme d'impact sur le climat sont évalués et confirmés, qu'en est-il des autres impacts environnementaux ? Sont-ils bien évalués ? Notamment, il convient de considérer les impacts potentiels sur les écosystèmes à court, moyen et long termes.
- le procédé permet-il d'assurer la pérennité de l'amélioration obtenue ? Quel est le temps de résidence du CO₂ dans son nouveau milieu ? Quels sont les risques d'un relargage, même lent, dans l'atmosphère ? Il est nécessaire d'assurer une stabilité sur 100 ans au minimum et jusqu'à 1 000 ans idéalement ;
- quelle est la probabilité que survienne un accident de type catastrophique ? Quelles pourraient en être les conséquences ? Sont-elles acceptables ?
- le système est-il socialement accepté ? L'assertion des populations est capitale. Elle conditionnera la mise en place effective des procédés de séquestration. *A priori*, si les questions du risque accidentel et des impacts environnementaux sont résolues sans ambiguïté, ce dernier point doit pouvoir être obtenu par le biais d'une bonne communication auprès du public.

b) Objectifs quantitatifs

Quelle est la quantité de CO₂ que l'on doit séquestrer pour avoir un véritable contrôle sur le climat de notre planète ?

Se basant sur les travaux du GIEC, le Département américain à l'Énergie considère qu'il serait nécessaire de stocker 1 GtC par an d'ici 2025 et jusqu'à 4 GtC par la suite (DOE, 1999a). Or, pour donner une échelle de grandeur, 1 GtC correspond à un cube de carbonate de magnésium de 1,3 km de côté ou encore à 4.10⁹ m³ de CO₂ liquide soit 45 fois le volume du lac Léman.

Il est évident qu'en l'état actuel, cet objectif est démesuré. S'il est essentiel de considérer le potentiel de chaque option de séquestration, définir, *a priori*, un objectif quantifié de carbone à séquestrer est aujourd'hui prématuré. Ce serait également oublier que la séquestration n'est que l'une des options d'un panel de mesures à mettre en œuvre pour endiguer l'augmentation exponentielle du CO₂ dans l'atmosphère. Toutefois, il est clair que, pour une participation efficace, ce sont de très importants volumes de CO₂ qu'il faudrait parvenir à stocker dans un proche avenir.

2.2. SÉQUESTRATION INDUSTRIELLE DES SOURCES CONCENTRÉES

2.2.1. Cadre d'application de la séquestration industrielle

a) Où capturer le CO₂ ?

Les sources concentrées de CO₂ correspondent à des centrales de production d'énergie à partir de combustibles fossiles ainsi qu'à certaines industries (tabl. 12).

	Émissions de CO ₂
Production de fer et d'acier ⁽¹⁾	0,393
Production de ciment ⁽¹⁾	0,308
Raffinage du pétrole ⁽¹⁾	0,188
Pétrochimie ⁽¹⁾	0,142
Autres industries ⁽²⁾	0,360
Total industries (sauf centrales)	1,391
Centrales de production d'énergie⁽³⁾	2,091
Total sources industrielles	3,482

Tabl. 12 - Émissions de CO₂ annuelles en GtC pour les principales sources industrielles (données de 1994-1996 ; sources : (1) : IEA GHG, (2) : OCDE Données Environnementales de 1997, (3) : IAE World Energy Outlook de 1998).

Les centrales représentent environ 2 GtC/an soit un tiers des émissions totales de CO₂ anthropiques, hors utilisation des terres. Les teneurs souvent élevées en CO₂ des effluents de ces grandes unités permettent d'envisager leur récupération avant diffusion dans l'atmosphère (voir tabl. 10). Nous avons vu précédemment (deuxième partie - § 1.3.) qu'il existait également d'autres techniques permettant de s'affranchir, si ce n'est de la totalité, d'une grande partie des émissions de CO₂ (« upstream decarbonisation » ou cycle de combustion O₂/CO₂).

Pour ce qui concerne **les autres industries**, quatre secteurs d'activité constituent les trois quarts de leurs émissions : production de fer et d'acier^{**}, production de ciment, raffinage de produits pétroliers et pétrochimie. Ensemble, ces quatre secteurs représentent des émissions de plus de 1 Gt de carbone chaque année. Dans certaines industries comme la production d'azote ou le traitement du gaz naturel, les procédés impliqués nécessitent déjà une séparation du CO₂. La plupart de ce CO₂ est, pour le moment, renvoyé dans l'atmosphère et pourrait donc être facilement récupéré à des fins de stockage.

* Pour les centrales : entre 4 et 14 % (IEA, 2001b).

** La production d'un kilo d'acier engendre en moyenne 1,8 kg de CO₂ (source : Vignes J.L. et al., 1997-1998).

Lorsque le CO₂ reste minoritaire dans l'effluent gazeux, l'isoler des autres constituants semble pour beaucoup indispensable. En effet, alors que le CO₂ est relativement facile à compresser, la compression de l'effluent d'une centrale, par exemple, demande une quantité d'énergie qui est en disproportion avec l'énergie totale fournie par la centrale (Herzog H., 2001a ; Holloway, 2002). D'autre part, bien qu'il reste, comme nous le verrons, de grandes incertitudes sur les capacités de stockage des sites candidats potentiels, on estime que le volume disponible n'est pas assez important au regard des quantités énormes de gaz émis par les centrales thermiques (Holloway, 2002).

Si la place disponible est un élément clef du problème, la composition de l'effluent gazeux peut s'avérer également importante. Ainsi, bien que la séparation du CO₂ apparaisse souvent comme la meilleure solution, il n'est pas inutile d'opérer des distinctions entre les types de sources et, de façon concomitante, les sites de stockage et d'examiner la nature des interactions géochimiques entre le site hôte et le produit injecté en fonction de sa composition.

b) Où injecter le CO₂ ?

Les sites potentiels de stockage de CO₂ sont limités aux zones proches de la surface : couches superficielles de la croûte terrestre et étendues océaniques. Il n'est pas en effet possible, pour des raisons techniques et économiques, d'injecter des produits au-delà de quelques kilomètres de profondeur.

Où trouver, dans le sous-sol, l'espace nécessaire pour recevoir les importants volumes injectés ?

Bien que très accessibles, les anciennes mines ou cavernes naturelles ne peuvent cependant être considérées comme des candidats sérieux dans une politique de lutte contre le changement climatique, les volumes disponibles étant trop limités. De plus, elles peuvent poser des problèmes d'étanchéité. Lorsque ce n'est pas le cas, il est plus rentable de les utiliser pour stocker du gaz naturel ou éventuellement des déchets de faible volume.

En revanche, le CO₂ injecté peut venir occuper l'espace intergranulaire des roches poreuses et perméables de certaines structures géologiques. Ces roches réservoirs peuvent, sous certaines conditions, servir de piège pour le CO₂. L'espace disponible est immense : ces roches peuvent former de grandes accumulations, les bassins sédimentaires, dont la dimension peut excéder quelques kilomètres d'épaisseur et s'étendre sur des centaines, voire des milliers de km². Le plus souvent, les pores des roches réservoirs ainsi que les fissures et fractures sont occupées par un ou plusieurs fluides dont le plus courant est l'eau. C'est, bien sûr, le cas des aquifères mais également des gisements de pétrole et de gaz.

Il est nécessaire que le CO₂ soit injecté à une profondeur suffisante afin d'atteindre les conditions de pression et de température qui déterminent le passage à l'état supercritique. Cela dépend du gradient géothermique local mais on estime que des profondeurs de 700 à 900 m sont nécessaires. Dans ces conditions, le CO₂ est moins dense que l'eau. La présence d'une couche écran imperméable empêchant la diffusion du CO₂ vers la surface représente alors une situation très favorable. Ces conditions sont en général réunies dans les gisements d'hydrocarbures et dans certains aquifères. Cependant, ces zones écrans ne sont pas forcément déterminantes :

certaines configurations favorisent un déplacement horizontal du CO₂ qui peut alors localement s'accumuler dans de petites structures pièges. Par ailleurs, au cours du déplacement du CO₂, des interactions se produisent avec les fluides interstitiels : dissolution du CO₂ et réactions géochimiques faisant notamment intervenir les minéraux de la roche. Ces processus, bien que lents, peuvent faciliter la séquestration du CO₂.

Sur le long terme, on peut donc considérer que le devenir du CO₂ injecté dépend de quatre facteurs : l'existence de pièges physiques, la dissolution du CO₂ dans les eaux de la formation, les réactions géochimiques avec l'eau de la formation ou les minéraux de la roche réservoir et, si l'étanchéité n'est pas parfaite, la migration du CO₂ hors du réservoir de stockage géologique.

Les recherches actuelles sont ciblées sur deux types de réservoirs : les gisements de gaz et pétrole en fin de production et les aquifères profonds (fig. 35).

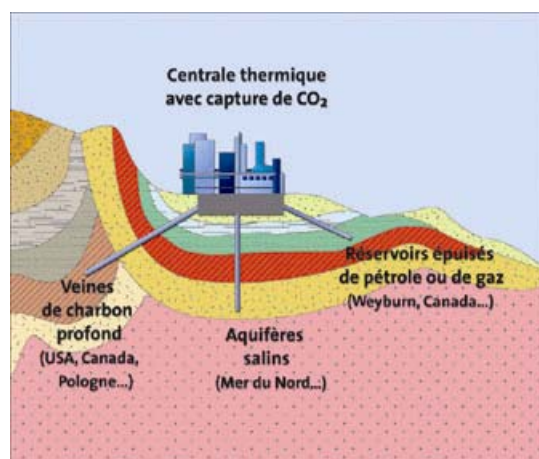


Fig. 35 - Les sites potentiels de séquestration industrielle par injection dans le sous-sol : les réservoirs de gaz et pétrole en fin de production, les veines de charbon dont le charbon n'est pas exploitable et les aquifères profonds.

Les veines de charbon profonds, difficilement ou non exploitables, représentent aussi des candidats intéressants. Bien que ces structures soient également, la plupart du temps, chargées d'eau, le principal processus de piégeage est très différent, le CO₂ étant ici adsorbé dans la matrice charbonneuse.

Outre le sous-sol, le second milieu dans lequel l'injection de CO₂ peut être pratiquée est l'océan profond, mais le choix d'un site particulier répond davantage à des contraintes économiques (distance à la côte).

2.2.2. Séquestration dans le sous-sol

Récemment encore, la séquestration géologique était méconnue du grand public. Mais alors que le changement climatique est en passe de devenir l'un des sujets de

préoccupation environnementale parmi les plus importants^{*}, de plus en plus d'articles traitant de cette question et se faisant l'écho des recherches en cours sont diffusés dans la presse généraliste. Les différentes options de séquestration dans le sous-sol y sont présentées selon le type de milieu identifié comme candidat potentiel pour le stockage massif de CO₂, lequel relève de trois grandes familles : les réservoirs de gaz et de pétrole qu'ils soient ou non encore productifs, les aquifères profonds et les veines de charbon profond et difficilement exploitable.

Partant de cette distinction comme d'un postulat établi, on omet parfois de rappeler le contexte dans laquelle les techniques mises en œuvre ont pris naissance et se sont développées pour parvenir à ce qu'elles sont aujourd'hui. Ainsi présentées de but en blanc comme réponses au problème du réchauffement climatique, on pourrait ainsi oublier qu'elles existaient, au moins sous une certaine forme, bien avant que ce problème ne soit sérieusement pris en considération et ait atteint le niveau actuel de médiatisation. La connaissance de certains éléments du contexte est pourtant un élément déterminant, tout spécialement pour les néophytes.

a) Le contexte des techniques de séquestration géologique : acquis, opportunités et lacunes

L'injection de gaz dans le sous-sol, qu'elle soit ou non pratiquée dans une optique de stockage, est une pratique ancienne et déjà largement expérimentée dans l'industrie pétrolière. Cela tient à différentes contraintes rencontrées au cours de l'exploitation des réserves fossiles et des pratiques mises en œuvre pour les contourner.

Une première contrainte est liée à la difficulté de récupérer le pétrole piégé dans les réservoirs. La quantité est variable et dépend à la fois des caractéristiques du site hôte et de la nature de l'huile. On utilise depuis longtemps l'injection de fluides divers pour doper la récupération selon une méthode appelée EOR (Enhanced Oil Recovery ou récupération assistée de pétrole). Nous reviendrons largement sur ce procédé qui a joué un rôle majeur dans l'amarce du concept de séquestration géologique comme réponse à la gestion des émissions de CO₂. Il reste encore aujourd'hui un élément décisif.

Une autre contrainte tient à la nature polyphasique des produits extraits pendant l'exploitation. De façon inhérente, le pétrole en sortie de puits contient toujours une certaine quantité de produits annexes (eau et gaz divers). Le gaz naturel qui s'y trouve mélangé en proportions variables est, dans la mesure du possible, valorisé commercialement. Cependant, contrairement au pétrole, il pose certaines difficultés au niveau du transport, ce qui implique des coûts importants. À moins de trouver preneur dans un périmètre raisonnable, les gaz extraits en cours de production peuvent être, suivant leur nature, brûlés en torches (flaring) ou simplement libérés dans l'atmosphère où ils vont se disperser (venting). Si les facteurs géographiques comptent pour beaucoup dans le recourt à ces deux procédés, c'est souvent la sécurité qui les motive en premier lieu. La nature explosive des produits manipulés exige que l'on puisse disposer de ces techniques afin d'éviter que ne s'accumule une quantité trop

^{*} Un sondage CSA sur la demande des français en matière d'information sur l'environnement a été réalisé en mars 2002, afin d'évaluer l'évolution par rapport aux résultats d'une même enquête réalisée 5 ans plus tôt. À la question sur ce qui a constitué l'événement le plus marquant de ces derniers mois, « le refus des États-Unis de participer à la lutte contre le réchauffement climatique » arrive en tête des réponses (pour plus de détails, voir le site Internet des Journalistes-écrivains pour la nature et l'écologie : www.JNE-asso.org).

importante de gaz. Le « flaring » et le « venting » ne pourront donc jamais être complètement éliminés de l'industrie pétrolière.

Après avoir culminées au milieu des années 1970, les émissions mondiales de CO₂ liées au flaring et au venting (Marland *et al.*, 1998) sont aujourd'hui en nette diminution. Comme le montre l'exemple de l'industrie pétrolière indonésienne qui avait recours au brûlage en torche pour 95 % du gaz produit dans les années 1950 pour passer à seulement à 28 % en 1985 (Barns & Edmonds, 1990), le flaring est une technique qui tend à se marginaliser. En 1994, il ne représentait plus que 1 % des émissions mondiales de CO₂ (environ 250 Mt) soit une diminution de l'ordre de 37 % par rapport aux chiffres de 1975 (environ 400 Mt) (OGP, 2000).

Dans son rapport « Environnement sécurité » de 2001, le groupe Totalfinaelf envisage même le « torchage zéro » comme « règle de base en opération normale » pour les nouveaux projets qui devraient entrer en production dans les années 2003-2007. En effet, le groupe s'est engagé à réduire de 20 %, entre 1990 et 2005, les émissions de GES par tonne d'huile produite. Pour parvenir à cet objectif, l'une des solutions envisagées est de réinjecter, dans le gisement, les gaz associés à la production d'huile. En Angola par exemple, sur le champ de Girassol, il est prévu de réinjecter quotidiennement de 4 à 6 Mm³ de gaz et d'éviter ainsi la mise à l'atmosphère de 3 à 5 Mteq CO₂ chaque année. Des solutions alternatives, telles que le stockage dans des gisements épuisés voisins, sont également étudiés dans le cas où la réinjection du gaz dans le réservoir d'origine risquerait d'endommager le gisement et d'en compromettre la productivité (Totalfinaelf, 2001). Bien que la pression environnementale sur les activités fortement émettrices de GES soit aujourd'hui très forte et encourage ce type de procédés, ces techniques ne sont pas nouvelles pour autant. En 1978, la Shell Petroleum Development Compagny l'avait un temps expérimentée sur le champ d'Oguta au Nigéria (OGP, 2000). Elle fut cependant abandonnée, les réservoirs ne se prêtant pas à la réinjection à grande échelle.

Enfin, l'industrie pétrolière a depuis longtemps recours à des opérations de stockage de gaz dans la gestion de sa chaîne de production. Ce sont des opérations ponctuelles et de durées limitées mais qui, elles aussi, ont des liens de parenté avec les options géologiques de séquestration. Au cours de l'année 1998, plus de 500 sites de stockage souterrain de gaz étaient en activité à travers le monde, représentant au total un volume de 164 Gm³ (IEA, 1999). Ces sites sont principalement situés aux États-Unis, en Allemagne, en France, en Italie et au Canada (Stevens *et al.*, 2001).

La plupart étaient à l'origine des réservoirs de pétrole ou de gaz devenus improductifs. Par exemple, aux États-Unis, 336 des 406 sites répertoriés sont d'anciens réservoirs de pétrole ou de gaz contre 51 qui étaient à l'origine de purs aquifères (AGA, 1999). Majoritairement, le stockage est réalisé dans des formations de grès ou de carbonates, l'utilisation de cavernes de sel et de mines de charbon abandonnées étant beaucoup moins fréquente (Stevens *et al.*, 2001).

Ces données mettent en lumière deux éléments complémentaires qui font de l'industrie pétrolière un acteur clef dans la séquestration géologique :

- l'industrie pétrolière possède un retour d'expérience et un savoir-faire déterminants dans ces procédés de séquestration.
La récupération assistée de pétrole à laquelle elle a recours dans ses activités courantes représente la plus grande expérience d'injection de gaz dans les

formations géologiques à l'échelle industrielle. Des investissements lourds sont opérés dans les techniques de forage, les reconnaissances géophysiques et les expériences de laboratoire. Optimiser la récupération du pétrole nécessite en effet de bien appréhender les mécanismes impliqués et d'avoir une vision tridimensionnelle de la progression des fluides en profondeur. Ces données sont particulièrement utiles lorsqu'il est question de convertir un réservoir pétrolier en fin d'activité en un site de séquestration du CO₂.

De plus, le stockage de gaz et l'utilisation de CO₂ naturel (voir encadré) dans les opérations EOR est une activité commerciale qui fait appel à des technologies directement transférables à la capture, au transport, à l'injection et au monitoring du CO₂, toutes étant des étapes cruciales des opérations de séquestration (Gunter *et al.*, 1998a ; Stevens & Fox, 2001) ;

- les bénéfices économiques potentiels des opérations de séquestration constituent un moteur de développement important pour les techniques mises en oeuvre. En effet, avec 8 %* des émissions mondiales de gaz à effet de serre d'origine anthropique (Sapre, 1999), les compagnies pétrolières se trouvent en première ligne des industriels qui doivent s'engager la lutte contre le changement climatique. Pour le moment, la pression environnementale croissante a conduit de nombreuses compagnies, comme BP ou TFE, à s'engager dans des actions volontaires quand il n'existe pas de mesures réglementaires comme la taxe sur le CO₂ de certains pays européens. La mise en place imminente d'un marché de permis d'émission, parfois déjà amorcé comme au Royaume Uni, constitue également un enjeu considérable pour l'industrie pétrolière (Totalfinaelf, 2001). Parmi les solutions de réduction des émissions de gaz à effet de serre, figure, comme nous l'avons vu, l'injection de gaz** dans le sous-sol. Au-delà, si les options de séquestration ont une place déterminante dans les actions menées au sein du secteur pétrolier lui-même, elles ont également toutes les chances de constituer, dans l'avenir, une offre de service pour d'autres industries émettrices.

Cependant, malgré ce contexte favorable, les options de séquestration géologiques n'ont pas atteint leur complet degré de maturité. Elles doivent encore faire leurs preuves et remplir, comme on l'a vu, certaines conditions indispensables avant de pouvoir être utilisées en routine.

Le premier saut d'échelle réside dans le facteur temporel. Les visions à court-terme (10 à 30 ans) des opérations de production pétrolière doivent être étendues aux centaines ou milliers d'années nécessaires à la séquestration. Le second saut d'échelle concerne les volumes de CO₂ à stocker qui sont sans aucune mesure avec les volumes traités à l'heure actuelle.

Pour convenir de l'efficacité, sur le long terme, de ces méthodes de séquestration géologique et de leur innocuité, une meilleure compréhension du comportement de ces systèmes complexes est nécessaire.

* Chiffre global impliquant tous les secteurs d'activité de l'industrie pétrolière (exploration-production, raffinage et pétrochimie). La contribution du secteur exploration-production représente 3% des émissions mondiales de gaz à effet de serre (Hatamian H., 1997 ; Richardson, 1997).

** Le CO₂, éventuellement le CH₄ quand il ne peut être valorisé commercialement. L'injection du H₂S qui, s'il n'est pas un gaz à effet de serre, pose également d'importants problèmes environnementaux, fait l'objet de recherches importantes (projet français FSH « Stockage de gaz acides dans les aquifères et les réservoirs pétroliers : les effets à long terme »).

Si les propriétés des réservoirs exploités pour les hydrocarbures sont relativement bien étudiées, ce n'est pas le cas des roches couvertures et plus généralement des structures environnantes. Leur intégrité physique et chimique doit être examinée avec beaucoup plus de rigueur pour vérifier la possibilité d'un stockage sur le long terme.

Pour cela, d'importantes recherches doivent être menées à la fois sur les aspects hydrogéologiques, géochimiques, géomécaniques et géophysiques : les modélisations doivent être développées pour mieux adapter les procédés d'injection de gaz ; les traceurs isotopiques doivent aider à identifier les différents compartiments des réservoirs afin de trouver, au sein du réservoir, le meilleur emplacement de stockage, des méthodes sismiques de pointe (« 4-D ») peuvent également être utilisées pour visualiser le mouvement du CO₂ dans les réservoirs pétroliers, définir les faciès géologiques, les hétérogénéités et les frontières des différents fluides (Benson and Davis, 1999).

Par ailleurs, il faut souligner que le niveau de connaissance des réservoirs aquifères présente un grand retard sur les réservoirs d'hydrocarbures. Ces sites de stockage potentiels, dont les capacités sont beaucoup plus importantes que ne le sont les réservoirs pétroliers, sont encore peu caractérisés et d'importants efforts de R&D restent à faire en ce domaine.

Il est évident, que, bien qu'acteur clef dans le domaine de la séquestration géologique, l'industrie pétrolière ne peut se suffire à elle-même : tous les projets de recherche actuels intègrent de larges collaborations entre industries et organismes de recherche publique. L'interdisciplinarité est la règle en ce domaine.

Séquestration : quelques dates

- 1977 – Marchetti est le premier à proposer le concept de séquestration industrielle du CO₂ (Marchetti, 1977).
- 1984 – Premiers travaux de l'américain Steinberg du laboratoire national de Brookhaven (Steinberg, 1984).
- 1990 – Fondation du RITE au Japon (Institute of Innovative Technology for the Earth).
- 1991 – Mise en place du programme R&D de l'IEA relatif à l'effet de serre.
- 1992 – First International Conference on Carbon Dioxide Removal à Amsterdam (ICCDR-1) : cette conférence est la grande référence internationale pour la communauté de chercheurs oeuvrant dans le domaine de la séquestration. D'abord appelée ICCDR, elle devient GHGT (Greenhouse Gas Control Technologies) en 1998 (Interlaken, Suisse). Elle a lieu tous les deux ans.
- 1993-1995 – Projet Joule II « The underground disposal of carbon dioxide ». Projet européen pionnier qui a conclu à la faisabilité du concept de stockage géologique du CO₂.
- 1996 – Lancement du projet Sleipner : injection de CO₂ dans un aquifère en Mer du Nord.
- 1998 – Lancement du programme de recherche du DOE (Department of Energy) américain qui est particulièrement actif dans le domaine de la R&D dans la séquestration.
- 2000 – Début de l'opération EOR/séquestration à Weyburn, Canada.
- 2001 – First National Conference on Carbon Sequestration. Organisée par le DOE et le NETL (National Energy Technology Laboratory), c'est avec la GHGT un événement majeur pour la communauté scientifique.
- 2002 – La France intègre le programme de R&D de l'IEA sur les gaz à effet de serre (IEA Grenhouse Gaz R&D Programme).

R&D à l'Agence Internationale de l'Énergie : le Greenhouse Gas R&D Programme

Pour ce qui est de la recherche et développement en matière énergétique, les pays membres de l'IEA (voir encadré première Partie - § 2.2.2.) s'engagent à mettre sur pied des programmes nationaux et à promouvoir des programmes de coopération entre pays membres, en incluant le partage des moyens et des efforts, et en se concertant pour établir les politiques nationales de recherche énergétique.

Les moyens financiers nécessaires à la concrétisation des projets de R&D dans le domaine de l'énergie, réalisés dans le cadre des Programmes de l'AIE et réglés par des **Accords d'exécution** (Implementing Agreements), sont répartis entre les pays participants effectivement aux divers Programmes de coopération.

La coopération générale en matière d'énergie entre pays membres est supervisée par le SLT (Standing Group on Long Term Co-operation) ; quant aux activités de R&D de l'AIE, elles sont sous la supervision du **CERT** (Committee for Energy Research and Technology). Ce sont là deux des cinq comités permanents qui dépendent directement du Governing Board ministériel et auxquels chaque pays membre de l'AIE délègue un représentant officiel.

Cinq Working Parties sont subordonnés au CERT : **Information Centres and Modelling, Fossil Fuels, Renewable Energy, Energy End-Use, Fusion Power**. Ces cinq groupes contrôlent les 40 programmes ou accords d'exécution actuellement en cours, Accords que peuvent rejoindre tout ou partie des pays membres de l'Agence. Il est possible d'y faire participer des pays associés qui ne sont membres ni de l'AIE, ni même de l'OCDE. Ainsi, outre l'Islande, le Mexique et la Pologne, autres pays membres seulement de l'OCDE, participent aussi, par exemple, le Brésil, la Chine ou la Russie à l'un ou l'autre des Accords d'exécution.

Les projets individuels (Tasks, décrits dans des annexes aux Accords d'exécution) en cours à l'intérieur de chaque Programme sont réalisés par les pays ayant signé tel ou tel Accord d'exécution ainsi que l'une ou l'autre de ses annexes particulières. Le déroulement d'un Programme se fait sous la direction d'un Comité exécutif (Executive Committee), composé d'un délégué par pays participant à l'Accord d'exécution. Les travaux de R&D sont ainsi soumis à une expertise internationale et les progrès réalisés le sont au profit de tous les pays participants.

Le **Greenhouse Gas R&D Programme** (IEA GHG Programme) est l'un de ces accords d'exécution et relève du Working Party « Fossil Fuels » (voir la fiche de présentation, ann. 2). C'est un réseau de collaboration internationale dont les objectifs principaux sont d'évaluer les technologies permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre, de favoriser une large communication des résultats des études et d'identifier de nouvelles pistes de R&D.

Le programme a démarré en novembre 1991 et est entré dans sa quatrième phase en novembre 2000. Ces principales activités concernent les moyens de réduction des émissions de gaz à effet de serre et plus particulièrement celles issues de l'utilisation des combustibles fossiles. Le programme concentre ses efforts sur le CO₂ mais les sources d'autres gaz, comme le méthane, sont aussi concernées. À côté des sources d'énergie renouvelables, l'étude des **options de capture, de stockage ou d'utilisation du CO₂** constituent un axe de travail fort du Programme.

Le programme est potentiellement ouvert à tous les pays, qu'ils fassent ou non partie de l'IEA et un certain nombre de groupes industriels ont rejoint le Programme. Chaque pays ou sponsor est représenté dans le comité exécutif qui est l'organe décisionnel. Les membres cofinancent ensemble les actions et les fonds sont gérés par l'agent opérateur, IMC Group Holdings Ltd, qui est responsable du programme de travail et qui a constitué une société, IEA Environmental Projects Ltd., à des fins administratives. L'agent opérateur a mis en place une petite équipe de projet pour le contrôle des études et des activités de diffusion selon les exigences des membres.

Les études techniques sont menées par des contracteurs qualifiés et les rapports sont examinés par des experts du domaine concerné avant d'être finalisés et rapportés aux membres et sponsors. Une série de rapports publics sont également publiés par l'équipe de projet ainsi qu'une lettre d'information, "Greenhouse Issues", disponible sur le site Web du Programme (<http://www.ieagreen.org.uk/>). Des workshops et des conférences internationales sont organisés dans différents domaines d'intérêt.

Sources: Office Fédéral de l'Énergie (Suisse) et Programme GHG de l'IEA

b) Stockage dans les réservoirs de gaz et de pétrole

• Réservoirs pétroliers

Certaines structures géologiques associant roches sédimentaires poreuses et couches imperméables constituent des pièges potentiels pour les hydrocarbures que sont le

pétrole et le gaz naturel. Grâce à des techniques d'exploration de plus en plus perfectionnées, la plupart de ces gisements ont pu être identifiés et largement exploités. Bien que les réserves estimées soient encore importantes, de nombreux réservoirs d'huile et de gaz entrent maintenant, au niveau productif, dans une phase de déclin. Certains de ces gisements « en fin de vie » ont été reconnus comme des candidats potentiellement intéressants pour le stockage de CO₂.

La production de pétrole se déroule en général en trois étapes successives : phase primaire, phase secondaire et phase de récupération assistée (DOE, 1999b).

Dans la première, le pétrole est facilement récupéré soit qu'il monte naturellement à la surface, via le puits de production, du fait d'un différentiel de pression soit à l'aide d'un système de pompage. On estime cependant qu'à l'issue de cette première phase dite de récupération primaire, 90 %, en moyenne, des réserves se trouvent encore piégées en profondeur.

Peu après la seconde guerre mondiale, les compagnies pétrolières ont commencé à mettre en œuvre des techniques de récupération secondaire permettant de doubler les quantités produites (taux de récupération de l'ordre de 20 %). L'injection de gaz ou d'eau permettait ainsi de maintenir la pression du réservoir et faciliter le déplacement de l'huile jusqu'au puits d'extraction.

Ces dernières décennies, grâce au développement et aux progrès réalisés dans les techniques de récupération assistée (EOR), on parvient à extraire maintenant entre 30 et 60 % du gisement originel. Les techniques EOR actuelles sont de trois types : thermique, chimique et gazeuse. Le comportement du gaz injecté dans ce dernier cas est variable : soit il reste en phase gazeuse (immiscibilité) et il agit physiquement sur l'huile en créant une poussée, soit il se mélange intimement au pétrole modifiant ainsi sa viscosité*. Dans les deux cas, les procédés présentent l'avantage de maintenir ou d'augmenter la pression dans le réservoir et d'éviter ainsi sa fracturation. Le CO₂ est souvent utilisé dans ce procédé car, mélangé au pétrole, il lui confère une plus grande fluidité permettant d'optimiser les taux de récupération. Un autre avantage à utiliser du CO₂ est qu'il mobilise en priorité les huiles plus légères ce qui améliore également la qualité de l'huile produite. Cette méthode n'est cependant pas adaptée à tous les réservoirs. Jusqu'à présent, les projets ayant recours à l'injection de CO₂ se sont focalisés sur des huiles de densités comprises entre 29 et 48°API (855 à 711 kg/m³, respectivement) et des réservoirs de profondeur variant entre 760 et 3 700 m (Taber *et al.*, 1997a).

Quelque soit la technique utilisée dans l'exploitation pétrolière, le pétrole n'arrive jamais pur au puits d'extraction : il se trouve toujours mélangé à une certaine quantité de gaz et d'eau.

Lorsque l'on injecte du CO₂ pour doper la récupération de pétrole, une partie de ce CO₂ finit toujours, après une période qui varie en fonction des réservoirs, par être ramenée à la surface dans ce mélange huile/eau/gaz alors qu'une autre partie reste piégée dans le réservoir.

* La pression minimum de miscibilité (MMP) dépend de la température et de la composition de l'huile. La première considération est de savoir si le réservoir est assez profond pour que la pression de l'huile dépasse la MMP à la température du réservoir. Si la pression a baissé suite à l'extraction de pétrole, on peut également repressuriser le réservoir en injectant de l'eau.

En sortie de puits, après une séparation des phases visant à purifier le pétrole produit, on peut choisir de laisser le flux gazeux s'échapper à l'air libre (procédé linéaire) ou le récupérer afin de réutiliser à nouveau le CO₂ (procédé en boucle) (fig. 36). Dans ce dernier cas, le « recyclage » du CO₂ nécessite des techniques plus élaborées puisqu'il est nécessaire de traiter le flux gazeux afin d'obtenir un CO₂ relativement pur (fig. 37). Le choix de l'une ou l'autre des techniques, linéaire ou en boucle, est d'abord économique et dépend directement du prix du CO₂^{*}.

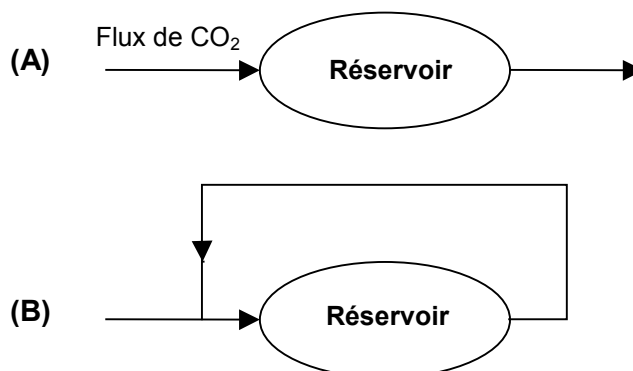


Fig. 36 - Les procédés de récupération assistée de pétrole par injection de CO₂. (A) : procédé linéaire ; (B) : procédé en boucle avec recyclage du CO₂ (d'après Aycaguer A.Ch. et al., 2001).

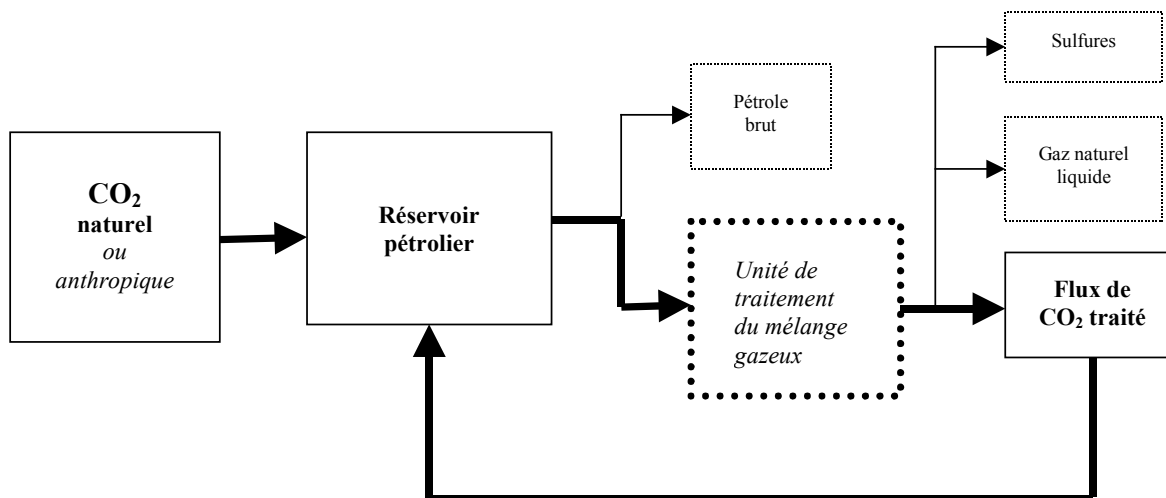


Fig. 37 - Schéma du procédé EOR avec recyclage du CO₂ (adapté de Aycaguer A.Ch. et al., 2001).

Dans la pratique courante, le CO₂ utilisé est très majoritairement d'origine naturelle car il présente souvent un moindre coût. Lorsque c'est le cas, le procédé en boucle ne fait que déplacer le CO₂ de son réservoir initial au réservoir pétrolier où il est piégé au fil des réinjections. En revanche, le procédé linéaire participe directement à l'augmentation des émissions dans l'atmosphère en amenant à l'air libre du CO₂ initialement séquestré. Il est d'ailleurs doublement dommageable car il contribue également à l'épuisement des réserves de CO₂ naturel.

^{*} Bien que le procédé linéaire soit parfois pratiqué, il n'existe aucune statistique disponible sur cette question. Il semblerait que le procédé en boucle lui soit souvent préféré car il permet de maintenir l'indépendance de l'opérateur pour son approvisionnement et notamment, de s'affranchir de la fluctuation des prix du CO₂. Le prix payé pour le CO₂ dans les opérations EOR aux États-Unis varie de 10 à 17 dollars la tonne (Chiffre de 1997 : Soclow, 1997).

Du CO₂ naturellement séquestré dans les formations géologiques

On trouve de grands gisements de CO₂ à l'état naturel dans de nombreux bassins sédimentaires. Les principaux sont situés aux États-Unis (Colorado et Mississippi), au Canada (Alberta), en Australie (South Australia), en Chine et en Hongrie. Certains gisements de tailles plus modestes sont également exploités en Italie (Arezzo), en Allemagne et en Grèce (Florina). Le plus grand gisement identifié à ce jour, **McElmo Dome**, est situé dans le Colorado, et contient 283 millions m³ de CO₂ pur à 98 % (Stevens and Fox, 2001).

En France, les plus importants sont ceux de **Montmiral** (26) et de **Vacquières** (34). Le premier est exploité par la société Carboxyque qui a mis en service, en 1991, une unité de production de 300 t/jour. Les réserves sont situées à 2 500 m de profondeur et sont estimées à 25 millions de m³. À Vacquières, la société allemande Messer dispose de la concession d'exploitation d'un gisement de CO₂, sous 80 bar, situé à 2 800 m de profondeur. Ce gisement a été découvert lors d'un forage.

Outre du CO₂, ces gisements contiennent parfois, en faibles quantités du méthane, de l'azote, de l'hélium et des hydrocarbures. Trois origines principales ont été avancées pour expliquer leur formation : magmatisme (dégazage du manteau), métamorphisme des roches carbonatées, altérations des composés organiques.

Bien qu'il existe d'autres débouchés pour le CO₂ naturel (voir chapitre IV), ces gisements sont majoritairement exploités par l'industrie pétrolière qui a donc acquis une expérience dans la manipulation et le transport du CO₂ directement valorisable pour les opérations de séquestration industrielle de CO₂.

De plus, les gisements de CO₂ naturels sont des analogues riches d'enseignements en termes d'interactions physiques et chimiques entre les roches du réservoir et les fluides (CO₂, eau, huile, gaz), aspects décisifs de l'efficacité des procédés de séquestration industrielle sur le long terme.

Le projet européen **NASCENT**, lancé en 2001 et prévu pour trois ans, vise à évaluer, à partir des accumulations naturelles de CO₂ dans le sous-sol, le comportement et la sécurité à long terme de sites de séquestration géologique.

Sources: Vignes J.L. et al., 1997-1998 ; Duclert S., 2002

Aujourd'hui, environ 1/5^e du CO₂ utilisé dans la récupération pétrolière provient de sources industrielles (Stevens S.H. *et al.*, 2001). Ce n'est, bien sûr, que dans ce cas seulement que le procédé présente un intérêt en terme de lutte contre le réchauffement climatique et constitue une méthode de séquestration à proprement parler.

Des projections sont réalisées pour la durée totale d'exploitation (quelques décennies en général) afin d'estimer la quantité de CO₂ nécessaire à chaque projet. Il est indispensable de connaître les quantités de CO₂ requises, y compris l'apport extérieur et la part recyclée, afin de déterminer quelle source est à même de constituer l'approvisionnement adapté dans la dimension et dans le temps. Ces estimations sont cependant sujettes à de fortes incertitudes dues à la nature de l'huile et du réservoir. Les chiffres sont très variables d'un site à l'autre mais l'expérience montre qu'en moyenne, ¼ à ½ tonne de CO₂ est nécessaire pour récupérer un baril de pétrole (Wawersik W.R. *et al.*, 2001). La quantité de CO₂ qui reste piégée dans le réservoir est nettement inférieure, elle est très variable et difficile à estimer.

Bien qu'elle soit utilisée notamment au Canada, à Trinidad et en Turquie, cette technique a très majoritairement cours aux États-Unis (95 % du pétrole extrait via l'injection de CO₂ l'est aux États-Unis). La récupération thermique reste cependant la plus utilisée des méthodes EOR dans ce pays, l'injection de CO₂ représentant 25 % de l'huile produite par récupération assistée et 12 % de la production totale américaine (Moritis G., 2000).

La récupération assistée de pétrole par injection de CO₂, utilisée commercialement depuis une trentaine d'années, est de plus en plus pratiquée. En janvier 1998, 179 000 barrils/jour étaient récupérés en injectant du CO₂ dans environ 66 champs pétrolifères

(Moritis et Guntis, 1998). En 2000, ce chiffre est passé à 216 000 barils/jour, soit un doublement par rapport à l'année 1990.

Sur les 74 sites actuellement en activité aux États-Unis, la plupart se trouvent localisés dans les bassins « Permian » et « Rocky Mountain » où de nombreux réservoirs en fin de production se prêtent bien à cette technique. De plus, l'infrastructure est en place avec de nombreux pipelines permettant notamment d'acheminer du CO₂ naturel en provenance du Nouveau Mexique et du Colorado. Au total, ce sont 33 Mt de CO₂ (toutes origines confondues) par an qui sont utilisés dans les 74 sites nord-américains et 6 MtCO₂ dans des projets d'EOR en Turquie.

Pour ce qui concerne plus spécifiquement le CO₂ industriel, environ **5 Mt** sont aujourd'hui employés et ce, dans trois sites aux USA et un site au Canada :

- le champ de Sharon Ridge au Texas exploité par Exxon Mobil utilise $2,1 \cdot 10^6$ m³/jour (soit 3 975 t) de CO₂ provenant de trois unités de traitement de gaz naturel (purification du gaz avec extraction du CO₂) ;
- le champ de Rangely dans le Colorado exploité par Chevron utilise $1,7 \cdot 10^6$ m³/jour (soit 3 180 t) de CO₂ provenant d'une unité de traitement de gaz naturel du Wyoming ;
- le champ de Purdy dans l'Oklahoma exploité par Anadarko utilise $1,0 \cdot 10^6$ m³ (soit 1 855 t par jour) de CO₂ provenant d'une usine de fabrication de fertilisants ;
- le champ de Weyburn dans le Saskatchewan exploité par PanCanadian utilise $2,7 \cdot 10^6$ m³/jour (soit 5 035 t) de CO₂ provenant de la centrale de gazéification du charbon de Great Plains Synfuels aux USA.

Cette technique de récupération assistée de pétrole par injection de CO₂ est systématiquement décrite comme étant d'ores et déjà une méthode de séquestration. On lui confère par ailleurs une valeur ajoutée, un intérêt économique, qui tient à la récupération de pétrole qui n'aurait pu être extrait autrement. Même si la nuance peut sembler ténue, ce procédé reste surtout jusqu'à présent un moyen de récupérer du pétrole, comme l'indique logiquement son nom, avec la valeur ajoutée de pouvoir séquestrer une certaine quantité de CO₂. En effet, les données du marché, pour le moment, tendent encore à favoriser la récupération pétrolière sur la séquestration du CO₂. Il s'agit d'un procédé onéreux nécessitant une infrastructure lourde (pipelines, puits d'injection, unités de traitement du gaz pour le recyclage du CO₂) et qui n'est mise en œuvre que si le prix du pétrole le justifie.

De plus, jusqu'à présent, la plupart des projets EOR avec injection de CO₂ ont été conçus de façon à minimiser les pertes de CO₂ à l'intérieur du réservoir puisque de telles pertes constituaient un coût supplémentaire pour l'exploitant. C'est pourquoi les projets n'ont généralement pas pris en compte le devenir du CO₂ piégé. Leur objectif n'était pas non plus de déterminer combien de CO₂ pouvait être effectivement stocké ou d'évaluer le bénéfice relatif du stockage par rapport à la production de pétrole.

En fait, tout l'enjeu des travaux menés actuellement consiste à adapter le procédé pour faire coexister au mieux ces deux objectifs : optimiser à la fois la récupération de pétrole et le stockage du CO₂, le tout au moindre coût. C'est un problème complexe, spécifique à chaque réservoir. Plusieurs techniques ont été proposées à cet effet

comme l'adaptation des techniques WAG* (synchronisation, taux d'injection et rapport eau/CO₂) ou la configuration des puits d'injection (pour obtenir des profils d'injection qui réduisent les effets nuisibles de l'écoulement préférentiel du gaz injecté dans des zones de perméabilité élevées) (Jessen K. *et al.*, 2001).

C'est dans cette optique de mieux concilier récupération de pétrole et stockage à long terme de CO₂ qu'a été mis en œuvre le projet Weyburn. Cette opération est ainsi la première ayant spécifiquement pour objectif d'étudier la séquestration du CO₂ dans un réservoir pétrolier.

Le champ de Rangely

Le champ pétrolier de Rangely, exploité par la Compagnie Chevron, est à l'heure actuelle parmi les plus importants sites utilisant du CO₂ d'origine anthropique. Il constitue un site remarquable car très documenté dans ce secteur pétrolier où l'information est souvent confidentielle (Wackowski, 1997). Le CO₂ provient de l'unité de traitement de gaz naturel de La Barge exploitée par ExxonMobil dans le Wyoming d'où il est acheminé par pipeline.

Le champ, qui s'étend sur 61 km², compte 341 puits de production et 209 puits d'injection. Le CO₂ est injecté dans l'unité gréseuse de « Pennsylvanian-Permian Weber » à une profondeur d'environ 1 700 m. L'injection de CO₂ a commencé en 1986 selon la technique WAG (water-alternating gas). Plusieurs procédés sont employés pour retarder le retour du CO₂ dans les puits d'extraction (utilisation de gels et mousses). Le CO₂ qui revient dans les puits d'extraction est recyclé et réinjecté.

Au milieu de l'année 2000, la quantité totale de CO₂ injectée était d'environ de 4,2 millions m³/jour (7950 t), dont environ 2,5 millions m³/jour (4 770 t) pour la part recyclée. Des puits de monitoring sont utilisés pour suivre le déplacement des produits injectés. Les pertes de CO₂ sont considérées comme négligeables.

À partir des simulations réalisées par Chevron, il a été possible d'estimer la quantité totale de CO₂ séquestrable dans ce champ pétrolier (fig. 38). Sur la durée totale d'exploitation, on estime à 22 millions m³ (136 millions de barils) la quantité de pétrole récupérée par ce procédé, soit 7,2 % de la quantité originelle du réservoir. Un total de 25 Mt de CO₂ devraient alors avoir été séquestrés.

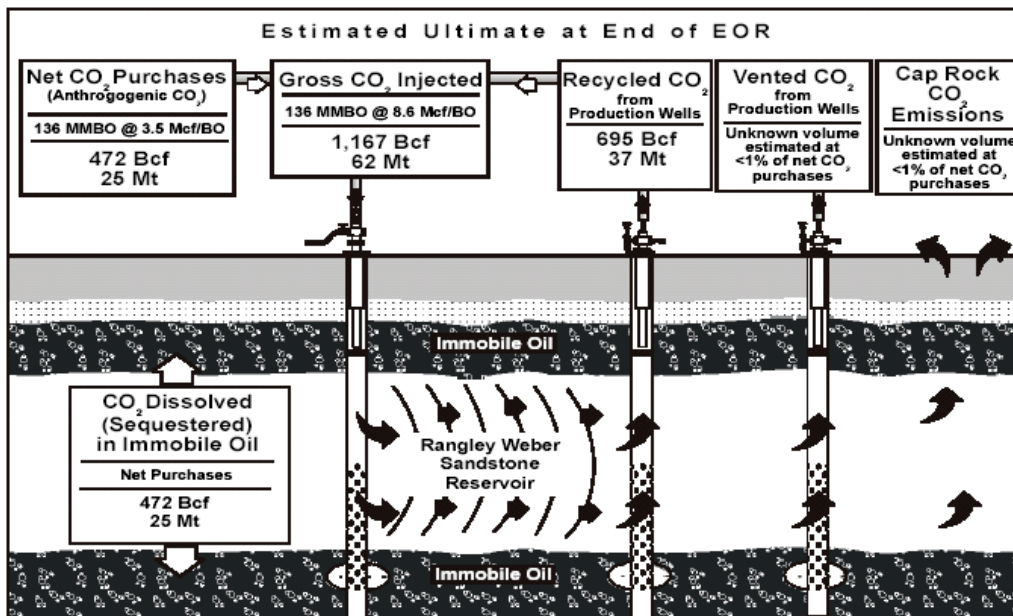


Fig. 38 - Estimation des volumes de CO₂ injectés, recyclés et séquestrés pour la durée totale de l'opération EOR de Rangely, Colorado, USA (Stevens S.H. *et al.*, 2001).

* WAG (water-alternating gas) est une technique alternant l'injection de CO₂ et d'eau.

La séquestration géologique à Weyburn : une expérience grande nature

Le champ de Weyburn

Le gisement de pétrole de Weyburn se trouve sur le bord nord-ouest du bassin de Williston, dans la partie sud du Saskatchewan (ouest du Canada). Découvert en 1954, ce champ de 180 km² est exploité par la compagnie PanCanadian Resources. Avec environ 650 puits de production et d'injection en activité, la production quotidienne de pétrole brut s'élève, en moyenne, à 2 900 m³/jour (18 200 bbl/jour), soit environ 10 % de la production totale de PanCanadian. Le champ a produit jusqu'à présent environ 55 millions de m³ d'huile pendant les phases de production primaire et de récupération secondaire (injection d'eau). Après une production estimée à 80 % des réserves récupérables, le champ est entré dans sa phase de déclin.

En 1997, la PanCanadian Resources a donc annoncé la mise en œuvre d'un projet EOR avec injection de CO₂ qui allait permettre de prolonger de plus 25 ans la vie du champ de Weyburn et d'extraire au moins 122 millions de barils supplémentaires.

Le CO₂ utilisé provient de l'usine de Great Plains Synfuels de Beulah (USA, Dakota du Nord) de la Compagnie Dakota Gasification. Cette usine, en activité depuis 1984, traite quotidiennement 16 200 tonnes de lignite et produit 3,54 millions de m³ de gaz naturel de synthèse. Un pipeline transfrontalier de 325 km a été construit spécialement pour ce projet par la Dakota Gasification Company et fournira 2,7 millions de m³/jour de CO₂, pur à 95 %, au champ de Weyburn. En outre, l'infrastructure nécessaire comprenant les équipements d'injection du CO₂ et de traitement pour son recyclage a été mis en place sur le site de Weyburn (fig. 39).

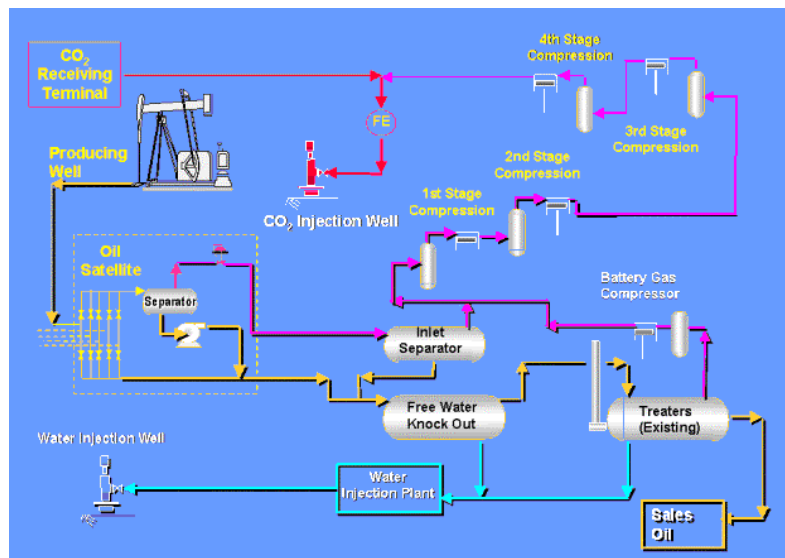


Fig. 39 - Schéma des équipements du projet pilote de Weyburn (Source : IEA GHG).

L'opération EOR a prévu l'injection de 5 000 tonnes de CO₂ par jour dans le réservoir. Les estimations montrent qu'à l'issue de l'opération, jusqu'à la moitié du CO₂ injecté devrait se trouver piégé dans l'huile non récupérable qui restera en place dans le gisement. Ainsi, ce sont environ 20 millions de tonnes de CO₂ qui devraient être séquestrés sur la durée totale de l'exploitation que l'on estime à une vingtaine

d'années. En termes de production, le projet stockera 85 m³ de CO₂ par baril d'huile produit.

L'un des intérêts majeurs du site de Weyburn réside dans la quantité d'informations disponibles sur le gisement de pétrole lui-même : logs géophysiques, carottes et échantillons, données de production et d'injection. En termes d'opération EOR, il constitue le site le mieux documenté du fait d'un choix politique de la province de Saskatchewan qui rend accessible au public toute information sur le gisement. En outre, le champ se trouve dans une plaine agricole facilement accessible et se prêtant bien aux travaux de terrain (échantillonnage, mesures géophysique). Toutes les conditions sont donc requises pour tirer le meilleur parti des recherches menées dans une opération conciliant EOR et séquestration de CO₂.

Suivi et organisation du projet

C'est à l'issue d'un workshop de l'IEA GHG R&D Programme qui s'était tenu en 1999 à Regina dans le Saskatchewan qu'un programme de recherche axé sur la séquestration du CO₂ à Weyburn a vu le jour. Outre l'exploitant, le projet implique la Saskatchewan Energy and Mines, et le Petroleum Technology Research Centre (PTRC) de l'Université du Saskatchewan qui agit en tant que coordinateur des recherches. Le projet est placé sous le patronage de l'IEA Greenhouse Gas R&D Programme qui administre le projet et prend également en charge la diffusion des résultats. Les fonds sont prodigués par Natural Resources Canada, Saskatchewan Energy and Mines, la Communauté Européenne et 7 sponsors industriels canadiens, américains et japonais.

Un consortium international de chercheurs relevant du secteur public et privé du Canada, des États-Unis et d'Europe a été mis en place afin d'élargir les divers champs de compétences : connaissance du bassin de Williston (Canada), expériences relatives aux opérations EOR (États-Unis) ou à d'autres projets de séquestration géologique (Europe).

Tout l'enjeu consiste à mieux comprendre les différents processus géologiques, géophysiques et géochimiques qui contrôlent la séquestration du CO₂ dans ce type de milieu et pour lesquels de fortes incertitudes demeurent.

Le projet sera également l'occasion de tester les technologies permettant de suivre le déplacement du CO₂ dans le réservoir, paramètre déterminant dans la durabilité du stockage, et devrait, en outre, contribuer à déterminer les coûts associés à ce type d'opération.

Les résultats attendus devraient être utiles, non seulement dans la mise en œuvre de futures opérations EOR, mais également pour des expériences de stockage de CO₂ dans des aquifères salins du bassin de Williston. Ces derniers pourraient, en effet, offrir un potentiel de stockage supplémentaire très important. Au-delà, les technologies impliquées et le savoir-faire pourraient ensuite être appliqués à d'autres sites de stockage sélectionnés à travers le monde.

Depuis septembre 2000 où l'injection de CO₂ a commencé, de nombreuses données géochimiques, hydrogéologiques et géophysiques (reconnaissance sismique) ont été acquises, analysées et interprétées par les équipes de recherche. Les résultats finaux du projet Weyburn seront disponibles fin 2003 et courant 2004.

L'enjeu est considérable : l'expérience acquise sur cet immense champ d'investigation que constitue le projet Weyburn sera déterminante pour l'avenir de la séquestration géologique dans les réservoirs d'hydrocarbures.

- **Les réservoirs de gaz naturels**

La récupération de gaz naturel à partir d'un gisement est en général relativement aisée. En fin d'exploitation, la grande majorité du gaz du réservoir est extrait (jusqu'à 95 %) sans qu'il ait été besoin de mettre en œuvre des techniques de récupération assistée comme dans le cas du pétrole. Dans tous les cas, injecter du CO₂ dans un réservoir encore en production risquerait de souiller le gaz naturel et c'est donc une solution qui a été jusqu'à présent écartée (Stevens S. *et al.*, 2001).

Pour tirer partie de ces immenses volumes disponibles que constituent les réservoirs épuisés de gaz naturel, certains considèrent comme particulièrement intéressante l'injection de CO₂ à des fins de séquestration dans ce type de structures. Plusieurs auteurs envisagent même comme possible de parvenir, par ce moyen, à récupérer la petite fraction de gaz encore piégé en profondeur (van der Burgt *et al.*, 1992 ; Blok *et al.*, 1997 ; Oldenburg *et al.*, 2001), ce qui permettrait de compenser au moins une partie des coûts de séquestration. Ils ont appelé ce procédé CSEGR (Carbon Sequestration with Enhanced Gas Recovery).

L'idée est donc d'injecter du CO₂ à distance des puits de production et de tirer partie de la repressurisation du réservoir pour chasser le gaz naturel encore en place mais qui est à une pression insuffisante pour s'évacuer naturellement.

Bien que des simulations d'injection de CO₂ dans des réservoirs de gaz naturel aient été développées (van der Burgt *et al.*, 1992 ; Oldenburg *et al.*, 2001), aucune expérience de terrain n'a encore été menée pour valider les résultats des modèles. Elles seront indispensables pour vérifier la validité de ce qui n'est encore qu'un concept de séquestration. Cependant, de tels projets pilotes devraient bientôt voir le jour et des études ont d'ores et déjà été conduites dans cet objectif (Oldenburg C.M. *et al.*, 2001). Un réservoir de gaz californien, Rio Vista, a été pressenti pour la mise en œuvre des expériences d'injection. Le principal point critique reste l'éventuel mélange des gaz, ce qui enlèverait beaucoup d'intérêt à la méthode.

- **Capacités de stockage dans les gisements de pétrole et de gaz**

Un certain nombre de critères spécifiques ont pu être définis pour identifier les réservoirs pétroliers les mieux adaptés à l'injection de CO₂ (Taber *et al.*, 1997a ; Taber *et al.*, 1997b). En se basant uniquement sur l'aspect récupération de pétrole, 80 % des réservoirs dans le monde pourrait convenir à l'injection de CO₂. En fait, les contraintes sont plus de nature économique que technique puisque les principaux facteurs limitants résident dans l'approvisionnement en CO₂ et dans le coût de construction des pipelines pour acheminer le CO₂ jusqu'aux gisements.

En excluant tout critère économique, les capacités de stockage de CO₂ ont été estimées à 130 GtC pour ce qui concerne les réservoirs pétroliers (Stevens S. and Gale J., 2000) et à environ 800 GtC pour les réservoirs de gaz épuisés (Stevens S. *et al.*, 2001).

c) Stockage dans des veines de charbon profond

Les grands réservoirs constitués de roches sédimentaires poreuses ne constituent pas les seules occurrences possibles de gaz naturel. Les veines de charbon ont également la particularité de contenir une quantité parfois importante de méthane. Celui-ci se trouve en effet piégé selon un processus physique d'adsorption à l'intérieur de la structure interne du charbon.

Les veines de charbon sont des structures géologiques assez communes, mais elles ont été jusque là peu exploitées de façon spécifique pour le gaz qu'elles contiennent. D'après l'American Gas Association (AGA), ce méthane constitue une vaste ressource énergétique qui reste encore à développer. Les réserves potentielles au niveau mondial sont estimées à 110 à 200.10¹² m³ (4,000 - 7,000 trillions ft³; Tait J. H., 1997). Significativement réparties sur l'ensemble des continents, on constate cependant que 90 % des réserves totales sont situées dans treize pays : États-Unis, Canada, Chine, Pologne, Russie, Inde, Kazakhstan, Australie, Afrique du Sud, Zimbabwe, Botswana, Allemagne et Royaume-Uni.

Outre l'apport énergétique du gaz qu'elles contiennent, les veines de charbon - lorsqu'elles sont inadaptées à l'exploitation minière du charbon lui-même - pourraient bien devenir dans un proche avenir des sites de stockage privilégiés pour le CO₂ d'origine anthropique.

- **Le méthane des veines de charbon : une contrainte devenue atout**

Il y a encore trente ans, le méthane naturellement piégé dans les veines de charbon était surtout considéré comme un risque par l'industrie minière. En effet, les opérations minières, en provoquant une chute de pression dans le réservoir, induisent la libération du méthane dans la mine et donc des risques importants d'explosion. Par mesure de sécurité, on avait donc recours à des systèmes de ventilation et de dégazéification, ce qui impliquait des émissions importantes de méthane dans l'atmosphère. À cette époque, il était fait peu cas des conséquences de ces procédés dans la contribution à l'augmentation de l'effet de serre. Mais la conjoncture a beaucoup évolué : non seulement l'impact sur le climat de ces procédés est mieux pris en compte mais au-delà, le méthane est maintenant considéré comme une ressource énergétique potentielle d'importance.

Depuis les années 70, les efforts intensifs en R&D ont permis de mieux caractériser ce type de gisement. Les avancées technologiques subséquentes ont ainsi stimulé la production de méthane des veines de charbon, faisant de cette ressource peu usuelle une composante non négligeable de l'approvisionnement en gaz naturel. Mais des efforts importants restent encore à faire : selon une estimation de l'Agence de Protection de l'Environnement américaine (EPA) pour l'année 1996, 79 mines souterraines ont émis environ 1,3 milliards de m³ (46.10⁹ ft³) de méthane. Aux États-Unis, un programme de cette Agence, voluntary Coalbed Methane Outreach Program, vise à aider les exploitants des gisements à mieux identifier les méthodes de récupération permettant de valoriser le méthane. La production de méthane issu de veines de charbon a ainsi augmenté de plus de 50 % depuis 1990.

Produire du méthane à partir des veines de charbon

La plupart des veines de charbon sont des aquifères dans lesquels la pression de l'eau joue un rôle essentiel en maintenant le gaz sous un état adsorbé. Pour libérer le méthane, l'eau doit être pompée afin de diminuer la pression du réservoir. Après désorption du charbon, le gaz progresse ensuite via les réseaux de fracture jusqu'au puits.

Certains filons sont trop profonds pour les techniques minières classiques, mais il reste possible d'outrepasser ces contraintes. Les opérateurs ont, dans ce cas, recours à un double système de forage qui permet de réaliser une fracturation hydraulique (augmentation de la fracturation existante et/ou création de nouvelles zones de rupture). Il est souvent nécessaire d'avoir, au préalable, asséché l'aquifère afin de réduire la pression du réservoir.

Bien que l'exploitation des hydrocarbures produise de façon générale une grande quantité d'eau, ce phénomène est particulièrement marqué pour l'exploitation du méthane des veines de charbon (les puits y produisent en moyenne treize fois plus d'eau que les puits de gaz naturel des réservoirs sédimentaires). Ceci est un élément important à prendre en considération et qui peut même être décisif pour l'exploitant. En effet, si ces eaux sont parfois valorisables, elles peuvent également majorer les coûts d'exploitation lorsque des traitements importants sont, par exemple, nécessaires avant leur rejet. Ainsi, dans la zone du "Black Warrior Basin" en Alabama, l'eau produite est employée pour l'irrigation ou traitée puis mélangée aux eaux de surface. Dans les régions où les eaux sont trop salines, elles peuvent aussi être réinjectées dans des formations géologiques peu profondes ou éventuellement recyclées dans les procédés d'extraction (fracturation hydraulique).

Sources : DOE, 1999b et Tait J. H., 1997

• Récupération assistée de méthane et séquestration du CO₂

De nouvelles méthodes visant à optimiser l'exploitation du méthane des couches de charbon connaissent aujourd'hui un développement important. Parmi, celles-ci, se trouve un procédé prometteur couramment appelé récupération ECBM (enhanced coalbed methane). Cette récupération assistée de méthane des veines de charbon peut notamment être réalisée par injection de CO₂, auquel cas elle devient une méthode potentielle de séquestration du CO₂. Si elle ressemble en cela à l'EOR, les mécanismes de piégeage impliqués sont très différents. Ici, le CO₂ injecté se trouve adsorbé dans les pores de la matrice carbonneuse où il vient remplacer le méthane ainsi libéré. Au niveau quantitatif, deux volumes de CO₂ sont nécessaires pour libérer un volume de méthane. Ceci est intéressant en terme de séquestration mais l'est moins pour ce qui est de la récupération du méthane. Pour ce dernier point, l'injection d'azote (N₂) s'avère plus performante. En effet, seulement 0,5 volume de N₂ est adsorbé pour chaque volume de méthane déplacé. Pour concilier les deux objectifs, une injection combinée de CO₂ et de N₂ peut être réalisée.

Adsorption et désorption dans le charbon pour un mélange gazeux

Les mécanismes de séquestration du CO₂ et conjointement d'amélioration de la récupération du méthane font intervenir un mélange complexe d'interactions physiques et chimiques qui doivent atteindre un état d'équilibre à la fois dans l'état adsorbé et dans l'état gazeux.

Le charbon a la capacité d'adsorber considérablement plus de CO₂ que le méthane (CH₄) ou le N₂ (dans un rapport approximatif de 4:2:1). En conséquence, en présence d'un mélange gazeux (par exemple, CO₂, CH₄ et N₂), on devrait retrouver approximativement ces proportions pour les quantités de chacun des gaz dans l'état adsorbé. Cependant, puisqu'il est peu probable que le gaz injecté pour la séquestration du CO₂ soit exactement de cette composition, un déséquilibre de pression-partielle est généré. L'adsorption/désorption de ces différents composants se produit donc jusqu'à ce que les gaz aient, non seulement atteint chacun un équilibre entre état adsorbé et gazeux, mais également qu'ils soient en équilibre entre eux.

La modélisation des réservoirs permet de quantifier les mécanismes et ainsi mesurer les avantages et les inconvénients de l'injection de N₂ et de CO₂ dans le procédé de récupération ECBM. Elle montre qu'une augmentation immédiate se produit dans la récupération de méthane en injectant du N₂. Cependant, le N₂ domine rapidement dans le mélange gazeux et atteint un pourcentage élevé dans la production en sortie de puits. Il est alors nécessaire de procéder à des traitements du gaz produit qui peuvent s'avérer

onéreux. L'injection du CO₂ donne le même résultat, mais plus lentement et avec un taux plus faible de CO₂ dans le gaz final.

Ces résultats sont importants pour la mise en œuvre des projets de récupération de méthane et de séquestration conjointe de CO₂. L'optimisation du procédé passe par l'injection d'un mélange gazeux contenant du N₂ (pour une récupération rapide de méthane) et du CO₂ (pour la séquestration), dans des proportions déterminées.

On voit ici se profiler un atout de la méthode pour les effluents de centrales puisque ceux-ci contiennent à la fois du gaz carbonique et de l'azote.

- **Projets en cours et sites pilotes**

Le projet Coal-seq

En octobre 2000, a été lancé aux États-Unis le projet Coal-Seq financé par le Département de l'énergie américain (DOE) et qui devrait s'étendre sur trois ans. Ce projet étudie la faisabilité de la séquestration du CO₂ dans les couches de charbon par le procédé de récupération ECBM. Plus spécifiquement, le projet cible en priorité l'analyse des résultats des expériences de terrain via la modélisation, avec, en support, des travaux de laboratoire complémentaires.

Les principaux champs étudiés se trouvent tous deux dans le San Juan Bassin, à la frontière du Colorado et du Nouveau Mexique, le plus important bassin au monde pour la production de méthane de veines de charbon. Les sites sont l'unité d'Allison, exploité par Burlington Resources et l'unité de Tiffany, exploité par BP. Ces deux sites sont les deux seuls au monde où il existe un véritable retour d'expérience sur l'injection CO₂ ou de N₂ pratiquée à grande échelle dans des veines de charbon.

En outre, deux autres études secondaires ont été incluses au projet : le projet de récupération ECBM de Fenn/Big-Valley de l'Alberta Research Council (Canada) et le nouveau projet financé par l'Union européenne en Pologne, RECOPOL. Les sites étudiés par ces deux projets expérimentent des conditions différentes des sites américains à la fois dans la nature des gaz injectés et de celle du charbon.

Les sites de San Juan Basin

L'unité d'Allison est le plus grand site au monde de récupération ECBM et également celui pour lequel on possède le plus de recul. Le projet pilote comporte quatre puits d'injection de CO₂ et neuf puits de production de méthane. Au départ et durant plus de cinq ans, ces puits ont produit selon les procédures classiques d'exploitation (pression/dépression). En 1995, quatre puits injecteurs ont été forés pour l'injection de CO₂ à un premier taux de 140 000 m³ par jour (5 MMcfd), une valeur qui a diminué ensuite aux environs de 84 900 m³ par jour (3 MMcfd). Les opérations ont commencé par une première période de six mois d'injection de CO₂, et pendant ce temps, cinq des puits de production ont été temporairement fermés pour faciliter l'échange CO₂/CH₄ dans le réservoir. Après six mois, l'injection de CO₂ a été temporairement suspendue pour évaluer les performances du champ, et les cinq puits fermés ont été réouverts. L'injection a repris environ huit mois plus tard, et s'est poursuivie presque sans interruption jusqu'au milieu de l'année 2001, où les opérations ont été de nouveau suspendues pour réévaluer l'opération. Les pertes de CO₂ ont été minimales pendant

* Le CO₂ utilisé ici est d'origine naturelle car il présente un moindre coût (environ 12,4 dollars par tonne dans le cas du San Juan Basin ; source : Wong *et al.*, 2001). Ce n'est donc pas les volumes de CO₂ séquestrés qui sont intéressants dans cette opération mais bien l'expérience qui pourra être acquise des procédés mis en œuvre.

la durée du projet : durant les cinq années d'injection, les concentrations moyennes en CO₂ à la production étaient de 6 %, ce qui est seulement légèrement au-dessus des niveaux initiaux de pré-injection (4 %). Ceci indique que les processus de séquestration du CO₂ et de libération du méthane ont bien été conformes à la modélisation du réservoir.

L'unité de Tiffany est exploitée par BP (antérieurement Amoco Production Compagny) qui a commencé à étudier les techniques de récupération ECBM vers la fin des années 80, en s'appuyant principalement sur des travaux expérimentaux en laboratoire.

Fort de ces premiers résultats, et après quelques tests pilotes, Amoco a mis en œuvre le plus grand site pilote aux fins commerciales de récupération ECBM par injection d'azote (N₂). Après neuf ans de production primaire, l'injection d'azote a débuté en janvier 1998 via dix puits injecteurs forés expressément auxquels ont été ajoutés ensuite deux anciens puits de production reconvertis. Il y a au total 34 puits de production dans le secteur étudié. Les volumes d'injection ont été en moyenne de 680 à 790.10³ m³ par jour (24-28 MMcfd) dans les 12 puits. Alors que la production totale de l'unité Tiffany avant l'injection de N₂ approximait 140 000 m³ par jour (5 MMcfd) pour les 34 puits, elle atteignait 820 000 m³ par jour (29 MMcfd) en mars 1999. Des arrivées importantes d'azote ont été constatées dans de nombreux puits, comme l'avaient prévu les simulations.

- **Les projets canadiens et européens***

Le projet de récupération ECBM de l'Alberta Research Council (ARC ECBM Recovery Project)

Le projet canadien, initié en 1997, prévoit six phases d'étude s'étalant jusqu'en 2005 (fig. 40). Il inclut un grand nombre de participants relevant d'organisations diverses, à fois dans le secteur public et privé, et ce à l'échelle internationale.

Le projet cible les veines de charbon de la région de Fenn/Big-Valley. D'une façon générale, les charbons de l'Alberta ont une perméabilité beaucoup plus faible que ceux du San Juan Bassin. Les taux de production de méthane sont donc ici très limités et la rentabilité économique impose donc la récupération ECBM pour optimiser l'exploitation.

Le site canadien consiste en un puits unique où plusieurs tests d'injection ont été réalisés avec des compositions variables de gaz : N₂ pur, 53 % de N₂ ; 47 % de CO₂, 87 % de N₂ ; 13 % de CO₂, CO₂ pur. Ces tests pilotes visaient notamment à améliorer la précision des mesures tant dans l'injection que dans la production résultante, à mieux appréhender les propriétés du réservoir et à calibrer les modèles numériques.

Tous les tests ont parfaitement fonctionné et les principaux objectifs ont été atteints. La base de données obtenue est de grande qualité, elle a permis de valider le modèle numérique et de réaliser d'ores et déjà des projections pour les opérations futures. L'opération a donc été, pour le moment, couronnée de succès, faisant la démonstration de la faisabilité effective de la séquestration du CO₂ dans ces structures charbonneuses. La prochaine étape consiste maintenant à concevoir, sur la base des premiers résultats, de nouveaux projets pilotes où les aspects économiques seront

* Ces projets sont également intégrés au projet Coal-Seq.

plus spécifiquement examinés. Le développement complet de la production sur l'ensemble du site reste l'objectif ultime.

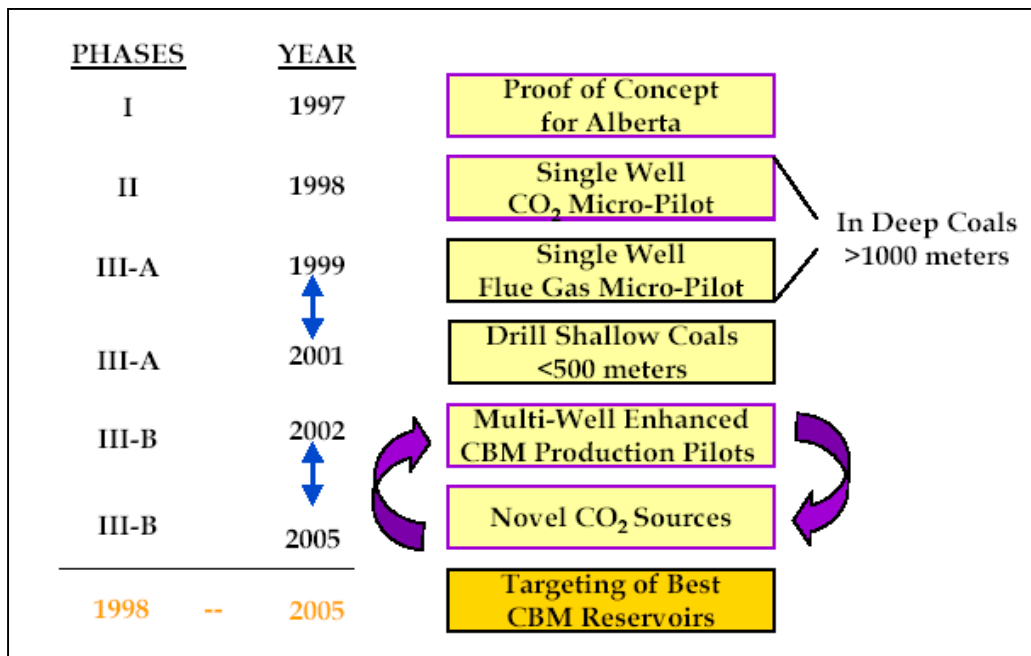


Fig. 40 - Les grandes phases du projet de récupération ECBM de l'Alberta Research Council (Gunter B., 2002).

Le projet RECOPOL

Le projet européen RECOPOL (REduction of CO₂ by means of CO₂ storage in coal seams in the Silesian Coal Basin of POLland) partage les mêmes objectifs que ses équivalents américains et canadiens : évaluer la faisabilité de l'injection du CO₂ dans des veines de charbon par l'utilisation d'un procédé combinant la production de méthane avec la séquestration du CO₂. L'étude et la mise en œuvre de ce projet pilote constitue la première expérience européenne de validation du concept de récupération ECBM.

Coordonné par TNO (Pays-Bas), le programme réunit également les centres de recherche et industriels Aachen University of Technology (Allemagne), Delft University of Technology (Pays-Bas), Central Mining Institut (Pologne), CSIRO (Australie), DBI-GUT (Allemagne), l'Institut Français du Pétrole (IFP), Gaz de France, Gazonor et l'IEA dans le cadre de son programme GHG. Le budget de 3,5 millions d'Euros est financé à 50 % par le 5^e programme cadre européen (PCRD) et par les différents partenaires pour les 50 % restants.

Initié en novembre 2001, le projet durera trois ans dont dix-huit mois d'expériences de terrain (fig. 41). Le site choisi se trouve au sud de la Pologne, près des frontières tchèque et slovène. Il existe déjà sur le site deux puits de production qui seront donc utilisés. Un nouveau puits d'injection dont la localisation exacte est en cours de définition sera foré pour la conduite des tests. Ces derniers prévoient d'utiliser du CO₂ provenant d'une usine de fertilisant et qui sera acheminé par camions. Parallèlement,

des modélisations du réservoir seront effectuées ainsi que des expériences en laboratoire.

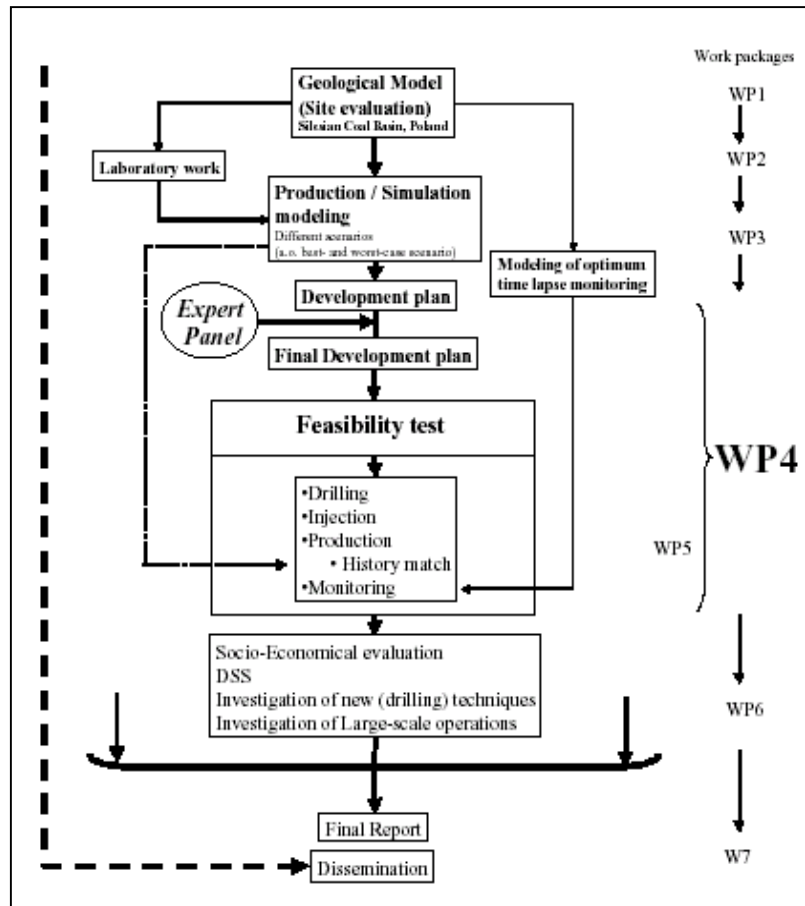


Fig. 41 - Les différentes phases du projet RECOPOL (Pagnier H. et Van Bergen F., 2002).

La modélisation détaillée des différents sites américains, canadien et polonais sera riche d'enseignements sur le comportement du CO₂ (et/ou du N₂) injectés dans l'objectif de séquestrer du CO₂. À leurs termes, ces travaux devraient être à même de fournir aux industriels une étude socio-économique complète et un outil rationnel d'évaluation de ce procédé de séquestration avec un système d'aide à la décision pour le développement d'autres projets de séquestration de par le monde.

Un concept intéressant pourrait naître alors qui intégrerait un système autosuffisant au niveau de l'apport énergétique et qui ne générerait aucune émission de CO₂ (fig. 42). La mise en œuvre de ce concept est d'autant plus plausible que les veines de charbon sont des gisements beaucoup plus communs et mieux répartis que ne le sont les réservoirs sédimentaires pétroliers et gaziers. Avec des contraintes moins importantes au niveau du transport du CO₂, le procédé de récupération ECBM pourrait bien devenir à relativement court terme une méthode de séquestration particulièrement attractive.

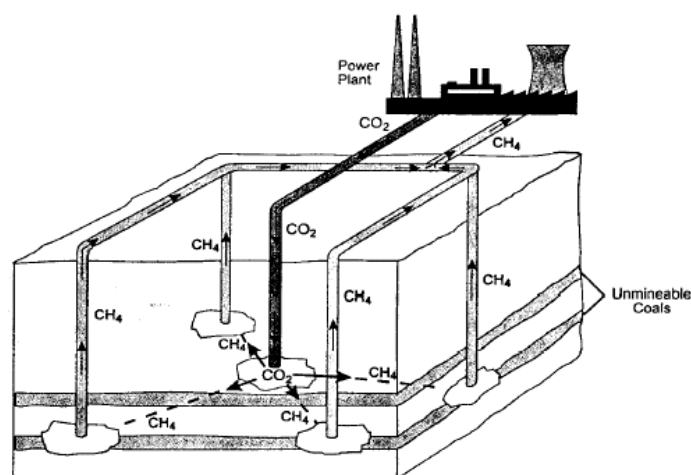


Fig. 42 - Un concept intégrant centrale produisant de l'énergie à partir de combustibles fossiles, récupération ECBM et séquestration du CO₂ (source : Reeves S.R., 2001).

- **Potentiel de stockage dans les veines de charbon**

Il existe de très importantes variations dans les propriétés physiques et chimiques du charbon de ces veines. Etant entendu que ces caractéristiques influencent directement la capacité d'absorption du CO₂, il est très difficile de donner une estimation précise de la capacité globale de séquestration dans ce type de structures. Une fourchette de 82 à 263 GtC a été avancée (Gunter *et al.*, 1998b). Des estimations plus récentes indiquent un potentiel de stockage de l'ordre de quelques dizaines de GtC (Herzog, 2001c).

CO₂ storage in black shale

The University of Kentucky Research Foundation, in Lexington, will study the displacement of natural gas from black Devonian shales and the possible use of these rocks to store CO₂. Studies have shown that CO₂ is preferentially adsorbed by coals. The study will determine whether a similar phenomenon could occur in these shales. The research project will analyse CO₂ adsorption along with natural gas production, and determine which shales offer the best sequestration potential.

« Greenhouse Issues » - Number 59, mars 2002

d) Stockage dans les aquifères profonds

Les aquifères sont constitués de roches poreuses et perméables où les espaces intergranulaires (pores de la roche et fractures) sont remplis d'une solution aqueuse. Ces structures sont très communes dans le sous-sol, particulièrement dans les grands bassins sédimentaires. Lorsque les ressources en eau ne sont pas exploitables, par exemple du fait de la salinité, ces réservoirs sont parfois utilisés pour stocker temporairement du gaz naturel. En 1995, on a répertorié dans le monde 85 sites de stockage de gaz dans des aquifères dont 12 se trouvaient en France. Aux États-Unis, plus de 12 % de l'ensemble des sites de stockage de gaz sont de purs aquifères, soit 51 sur les 406 sites répertoriés (AGA, 1999).

Le stockage temporaire de gaz à valeur commerciale en aquifère est donc un procédé qui n'est pas nouveau et pour lequel on possède une certaine expérience. En revanche, pour ce qui concerne spécifiquement le CO₂, c'est une option tout à fait

nouvelle. Il n'existe à ce jour qu'une seule opération de ce type : depuis 1996, la société pétrolière Statoil injecte du CO₂ dans des aquifères salins profonds en mer du Nord. Contrairement aux deux premières options de séquestration géologique que nous avons décrites, procédés EOR et récupération ECBM, l'injection de CO₂ ne se solde pas ici par la récupération d'un produit valorisable commercialement. L'objectif ultime est donc purement environnemental et ne s'inscrit que dans la lutte contre l'augmentation de l'effet de serre.

Comme nous l'avons dit, les opérations de flaring et de venting pratiquées dans la production d'hydrocarbure sont en nette diminution depuis quelques années. Si ce sont parfois des soucis de rentabilité dans une conjoncture économique favorable qui motivent la limitation de ces pratiques dommageables pour l'environnement, ce peut être également des mesures de politiques environnementales incitatives ou répressives qui rendent économiquement viables des techniques de substitution jusque là non exploitées. La récupération puis la réinjection de tout ou partie des gaz « indésirables » est l'une des alternatives possibles. C'est celle qui a été choisie par la société Statoil, pionnière en la matière, pour échapper à la taxe instaurée par le gouvernement norvégien qu'elle aurait eu à payer si elle avait eu recours au venting dans son exploitation de gaz naturel en mer du Nord.

- **Injection de CO₂ dans un aquifère salin en mer du Nord : description de l'opération**

Le gisement de gaz naturel Sleipner West, exploité par la société Statoil, se trouve au centre de la mer du Nord, à environ 200 km des côtes. Ce gaz est majoritairement constitué de méthane mais contient également une certaine proportion de CO₂. Les teneurs en CO₂ peuvent légèrement varier mais sont généralement situées dans une fourchette comprise entre 4 et 9,5 % (Holloway S., 2002). Cependant, pour que le gaz puisse être commercialisé, la législation norvégienne impose un seuil de 2,5 %. Aussi, le gaz doit être traité pour ramener la teneur en CO₂ du gaz en dessous de cette valeur. Cette opération est réalisée offshore : le gaz produit via 18 puits forés depuis la plateforme Sleipner B est acheminé sur 12 km pour être traité à la plateforme Sleipner T (procédé d'absorption par des amines), située à proximité immédiate de la plateforme principale (Sleipner A) (fig. 43).

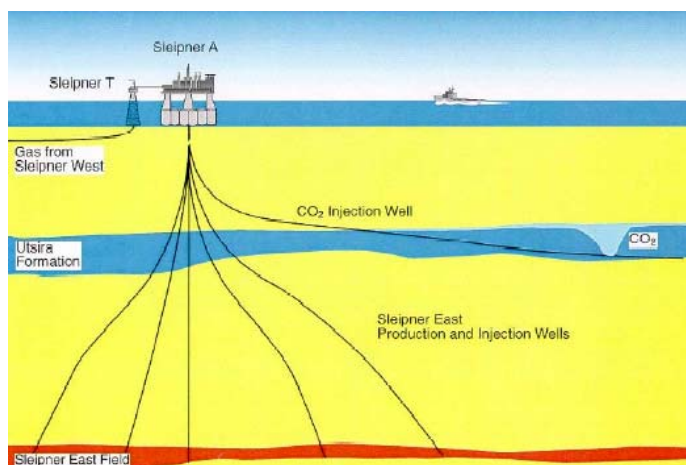


Fig. 43 - Coupe schématique du site de Sleipner (courtesy of Statoil).

Chaque année, ce sont ainsi environ 1 million de tonne de CO₂ qui sont extraits du gaz naturel produit, soit 3 % des émissions totales de la Norvège. Au lieu d'être renvoyé à l'atmosphère (venting), ce CO₂ est réinjecté, depuis août 1996, dans une formation gréseuse, Utsira Sand, située entre 800 et 1000 m sous le plancher océanique. La présence d'un toit au-dessus de cette formation sert d'écran et limite la dispersion du CO₂ injecté.

Pour ce qui est du coût additionnel de cette opération, on estime à 15 dollars US la tonne de CO₂ évité (O. Kaarstad cité dans Herzog, 1999).

- **Le programme SACS**

Un projet intitulé SACS, a été mis en place autour de l'opération réalisée à Sleipner, afin de constituer le support scientifique qui permettra de tirer le maximum d'enseignement de cette expérience de séquestration.

Le programme R&D GHG de l'IEA coordonne ce projet international et joue un rôle de facilitateur. Divers partenaires publics et privés ont pris part à cette opération financée en partie par l'Union européenne dans le cadre de ses 4^e et 5^e PCRD (programmes cadre de R&D). Outre un groupement d'industriels (Statoil, BP Amoco, ExxonMobil, Norsk Hydro, Vattenfall), divers organismes de recherche apportent leur contribution dont notamment l'IFP et le BRGM ainsi que ses équivalents anglais et danois (British Geological Survey- BGS, Geological Survey of Denmark and Greenland – GEUS).

Après une phase de préparation préalable (phase 0, synthèse et évaluation des données), le projet a véritablement commencé en 1998. Il cible cinq domaines d'investigation : la caractérisation géologique du site ; la simulation du réservoir afin d'appréhender les effets potentiels de l'injection de CO₂ dans la formation Utsira ; les aspects géochimiques des interactions entre le CO₂ et les roches hôtes ainsi qu'avec la couverture de la formation ; le monitoring de l'opération avec l'analyse des besoins et des coûts des équipements de surveillance ; la modélisation géophysique.

En 1999, à l'issue de la phase 1 du projet, il a d'ores et déjà été possible de mesurer la dispersion du CO₂ au sein de la formation Utsira grâce à des méthodes de sismique réflexion (time-lapse) (fig. 44). À cette étape intermédiaire, les résultats de l'opération sont satisfaisants puisque les données montrent que le CO₂ s'est dispersé au-dessus et autour du point d'injection sans toutefois traverser le toit de la formation Utsira.

La deuxième phase du projet (SACS2) a débuté en avril 2000 et devrait se terminer en 2002. Parmi les temps forts, une nouvelle campagne sismique a été conduite en septembre 2001. Les données sont en cours de dépouillement et les résultats devraient être rendus publics prochainement.

Le projet permettra d'évaluer la performance du réservoir et ses capacités de stockage. Au-delà du site lui-même, les informations acquises seront décisives pour développement de nouvelles opérations de par le monde. À ce propos, un « manuel de bonnes pratiques » basé sur les résultats de ce projet pilote devrait bientôt voir le jour.

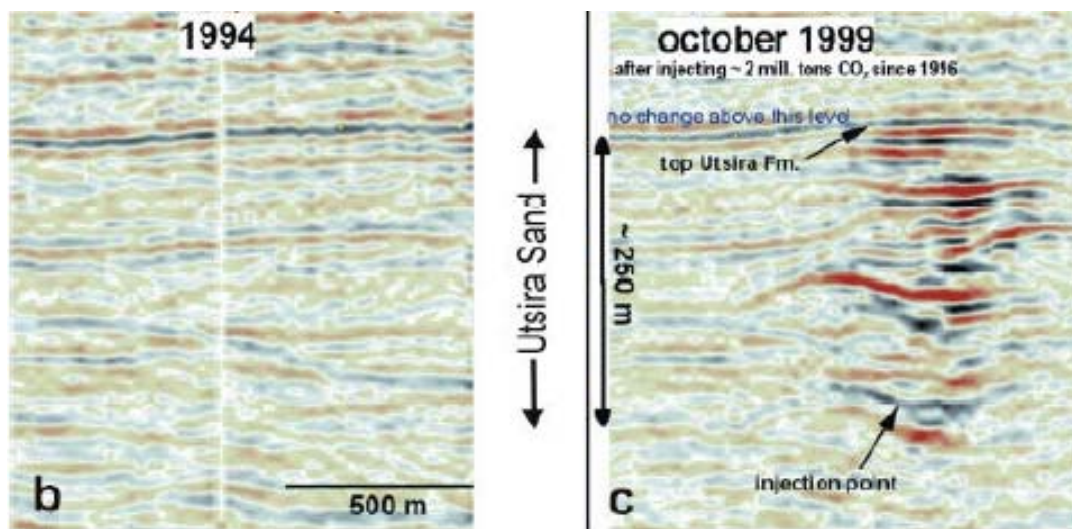


Fig. 44 - Images de sismique réflexion de la formation Utsira réalisées en 1994 (b) avant que ne commence l'opération de séquestration et en 1999 (c) après que 2 millions de tonnes de CO₂ aient été injectés dans la formation. Les zones plus foncées marquent la présence de couches saturées en CO₂ (repris d'après Chadwick A. et al., 2001).

- **Potentiel de stockage dans les aquifères**

Les aquifères sont des structures particulièrement répandues dans les bassins sédimentaires qu'ils soient continentaux ou océaniques. Aux profondeurs auxquelles le CO₂ doit être séquestré, c'est-à-dire au-delà de 700 à 900 m, ces réservoirs sont rarement exploités. Ce sont donc des candidats très intéressants en terme de capacité de stockage du CO₂ dans le cadre de la lutte contre le changement climatique. Cependant, tous ne sont pas adaptés à recevoir des quantités importantes de CO₂. L'efficacité du stockage dépend de nombreux facteurs, notamment relatifs aux équilibres géochimiques qui vont s'établir entre le CO₂, l'eau et la roche ; mais, en premier lieu, c'est la géologie du réservoir et celle de sa roche couverture qui seront déterminants. Ces caractères sont très spécifiques à chaque site et, au sein d'un même bassin sédimentaire, il peut exister d'importantes variations. C'est pourquoi les études locales et détaillées sont incontournables lorsqu'il s'agit d'évaluer précisément les capacités de séquestration. Bien que ce type d'études se multiplie, il demeure aujourd'hui beaucoup d'incertitudes quant aux capacités de stockage du CO₂ à l'échelle planétaire dans ce type de structures géologiques.

Cependant, de toutes les options géologiques actuellement étudiées, elles arriveraient, *a priori*, en tête. Au moins équivalentes à celle des réservoirs de pétrole et de gaz (plusieurs centaines de GtC), elles pourraient être jusqu'à dix fois plus importantes (Herzog, 2001c).

Le projet européen Joule II (1993-1996) a, quant à lui, conclu à une capacité globale pour l'Europe dépassant 200 GtC (soit environ 800 Gt de CO₂).

2.2.3. Séquestration par injection dans l'océan profond

Des trois grands milieux que sont l'atmosphère, la biomasse terrestre et l'océan, ce dernier est de très loin celui qui représente le stock de carbone le plus important avec, au total, plus de 38 000 Gt (voir première partie - § 1.). Alors qu'il existait un équilibre dans les flux échangés entre océan et atmosphère pendant la période pré-industrielle (environ 74 GtC/an environ), les émissions massives de CO₂ d'origine anthropique ont modifié ces échanges : à l'heure actuelle, le flux océan-atmosphère s'élève à 90 Gt de carbone, alors que le flux inverse atmosphère-océan est légèrement supérieur et s'élève à 92 Gt (IEA, 2002b). Ce sont ainsi environ 2 Gt de carbone qui sont absorbés chaque année par l'océan permettant de modérer l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂.

Dans l'optique de maîtriser les concentrations de CO₂ atmosphériques, une solution avantageuse pourrait consister à augmenter, par différents moyens, cet écart entre les deux flux contraires. C'est sur cette idée, déjà ancienne, que repose le concept de séquestration dans l'océan.

a) Absorption du carbone par l'océan : rappel des processus impliqués

Les échanges atmosphère-océan s'établissent selon deux processus : l'activité biologique de la biomasse marine et la solubilité, régie par l'équilibre thermodynamique du CO₂ à l'interface air-mer (voir première partie - § 1.). Il existe donc deux processus distincts de fixation du carbone dans le milieu océanique :

1) la photosynthèse :

la biomasse océanique, principalement constituée de phytoplancton, utilise le CO₂ dissous des couches superficielles de l'océan pour la constitution de ses tissus. La fixation du carbone atmosphérique se fait ici dans la matière organique. Nous reviendrons dans la suite sur la façon dont on peut tirer partie de ce phénomène pour contrôler la concentration atmosphérique du CO₂. La séquestration par apport physique de CO₂ (CO₂ concentré d'origine industrielle) dans l'océan ne concerne pas le processus photosynthétique ;

2) la dissolution du CO₂ sous forme de carbone inorganique :

à l'interface air-mer, les échanges sont régis par l'équilibre des pressions partielles du CO₂ dans les deux milieux. Le mouvement des vagues facilite également la formation de microbulles d'air dans les couches superficielles de l'océan. Avant leur retour dans l'atmosphère, une partie du CO₂ qu'elles contiennent passe dans le milieu aqueux. Dans sa quasi-totalité (seulement 1 % du CO₂ demeure sous cette forme moléculaire), le carbone sera utilisé pour former de l'acide carbonique et, par une suite de réactions, des ions bicarbonates et carbonates (voir première partie - § 1.).

Acide carbonique, ions carbonate et ions bicarbonate forment ensemble ce que l'on appelle le carbone inorganique dissous. La réaction de neutralisation du carbonate par le CO₂ (voir première partie - § 1.2.) procure à l'océan une grande capacité additionnelle d'absorption du CO₂. Néanmoins, la majeure partie de l'océan (océan profond) n'est pas en contact direct avec l'atmosphère. De ce fait, cette réaction n'a lieu qu'en surface et l'absorption du CO₂ ne progresse donc vers les profondeurs

océaniques qu'au rythme millénaire de la circulation profonde. La capacité des eaux profondes à absorber le CO₂ n'est donc quasiment pas employée à l'heure actuelle.

Le principe de la séquestration est simple : il s'agit de dépasser la contrainte de cette barrière superficielle en apportant directement le CO₂ dans les couches profondes de l'océan. Cette idée n'est pas nouvelle, elle a été proposée par Marchetti en 1977 qui a suggéré que du CO₂ injecté dans les eaux denses de la Méditerranée serait ensuite entraîné dans les profondeurs de l'Atlantique et retenu ainsi pendant une longue période (Marchetti, 1977).

Cependant, le cycle du CO₂ dans l'océan est un phénomène complexe et encore mal connu. Malgré plusieurs opérations de recherches expérimentales dont, notamment, les mesures réalisées dans le cadre du World Ocean Circulation Experiment (WOCE, voir première partie, § 1.3.), ce sont encore aujourd'hui les modèles mathématiques qui dominent dans l'approche des processus physiques, chimiques et biologiques qui siègent dans l'océan.

Un de ces modèles, développé par le Max-Planck Institute d'Hambourg permet de suivre le devenir du CO₂ dans les eaux profondes et ce sur une période de l'ordre du millénaire. Il montre que le temps de retour du CO₂ à l'atmosphère est très variable (du siècle au millénaire) et très étroitement lié à la situation géographique (Bacastow R.B. and Dewey R.K, 1996).

b) Les solutions proposées

Parmi les solutions envisagées pour doper la quantité de CO₂ inorganique dissous dans l'océan, on peut retenir trois scénarios principaux (fig. 45) :

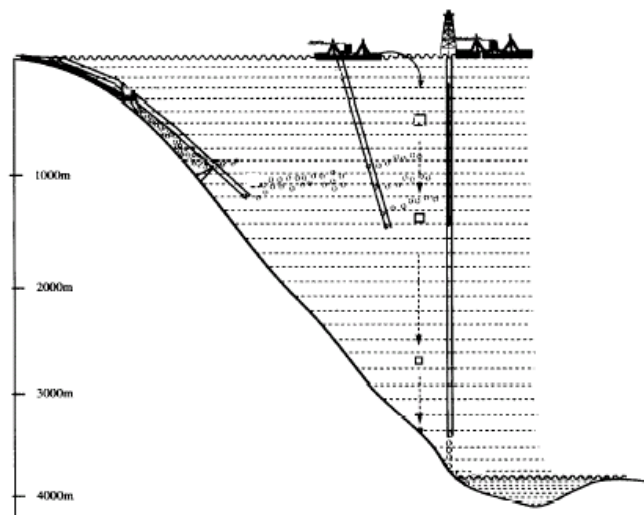


Fig. 45 - Les différents scénarios d'injection de CO₂ dans l'océan (repris de Herzog et al., 2001d).

- **Injection à des profondeurs intermédiaires (1 500 - 2 000 m)**

Afin de minimiser l'impact environnemental et éviter les zones de production les plus riches, on estime qu'il est nécessaire de respecter une profondeur minimum de 1 500 m pour l'injection du CO₂. De plus, les modèles semblent suggérer qu'une telle

profondeur serait à même d'assurer des temps de rétention du CO₂ de quelques siècles. Les techniques sont aujourd'hui au point pour de telles injections : des pipelines fixes depuis les zones côtières ou mobiles depuis des bateaux peuvent être alternativement utilisés. Des études ont été réalisées pour déterminer le devenir d'un panache de CO₂ diffusé en fines gouttelettes (état liquide) depuis un pipeline plongeant (Liro C.R. *et al.*, 1992 ; Drange H. and Haugan P.M., 1992). D'après les résultats obtenus, il semblerait que l'ensemble du CO₂ injecté, en respectant les procédures adéquates, se trouverait dissous dans une colonne d'eau d'une centaine de mètres au-dessus du point de sortie. Ces eaux riches en CO₂ devraient ensuite se diluer et, grâce aux courants, se disperser horizontalement. La mobilité du point d'injection en ayant recours à des bateaux pourrait encore faciliter la dispersion du carbone dissous (Ozaki M., 1997). Les temps de rétention seraient inchangés mais on réduirait certainement l'impact environnemental de ces opérations d'injection.

- **Injection à grande profondeur (> 3 000 m)**

Au-delà de 3 000 m de profondeur, le CO₂ liquide devient plus dense que l'eau de mer. L'idée est donc de créer un « lac » de CO₂ liquide reposant sur les fonds marins et cela en s'aidant de la topographie des lieux afin d'éviter une dispersion horizontale (Ohsumi T., 1993). Les conditions de pression et température de tels sites devraient favoriser la formation d'hydrates de carbone (voir première partie, § 1.2.). Bien que l'on ne puisse garantir une stabilité totale du système et l'absence d'échanges avec les eaux océaniques, il est clair que la formation des hydrates devrait nettement ralentir la dissolution du CO₂. En conséquence, cette méthode devrait augmenter les temps de séquestration du CO₂ dans l'océan relativement à l'injection à moindre profondeur. En revanche, les technologies à mettre en œuvre sont plus lourdes : il serait nécessaire de faire descendre verticalement un pipeline depuis une plate-forme offshore. Les longueurs impliquées et le fait qu'il n'existe qu'un seul point d'attache induisent de très fortes contraintes. Les calculs réalisés montrent cependant qu'il serait techniquement possible de mettre en place des pipelines ayant jusqu'à 1 m de diamètre et qui descendrait jusqu'à des profondeurs de 5 000 m (Ozaki M. *et al.*, 1995).

- **Largage de blocs de CO₂ solide**

Enfin, la dernière des principales voies d'introduction de CO₂ dans l'océan en vue de sa séquestration consiste à larguer, depuis des bateaux, des blocs de CO₂ solides (Murray C.N. *et al.*, 1996). Avec une densité de 1,5 t/m³, ces blocs devraient rapidement se déposer sur les fonds océaniques et pourraient même être partiellement enfouis dans les sédiments. Des calculs et des tests réalisés au Japon ont montré que, en chute libre jusqu'à 3 000 m de profondeur, la moitié d'un bloc initial de 4 m³ resterait intact au moment de son dépôt sur le fond océanique.

c) Des impacts environnementaux incertains

Bien qu'elle ne fasse qu'amplifier le phénomène tout à fait naturel d'adsorption du carbone par l'océan, la séquestration océanique pose des problèmes encore mal résolus en terme d'impact sur les écosystèmes marins.

En effet, la dissolution de CO₂ et la formation subséquente d'ions carbonate et bicarbonate entraîne une modification du pH des eaux marines qui ne peut être sans

conséquences sur l'ensemble de la biomasse marine et tout particulièrement sur la population animale (Knutzen J., 1981).

Force est donc de constater que, même sans injection directe de CO₂ dans l'océan, le milieu océanique subit déjà les conséquences des activités anthropiques : les 2 Gt de carbone absorbés annuellement se traduisent par une augmentation déjà perceptible de la concentration des eaux marines en carbone inorganique dissous et une modification subséquente du pH (voir première partie - § 1.3.).

Pour ce qui concerne l'impact d'une opération de séquestration de CO₂ dans l'océan, on peut s'appuyer sur les résultats d'une étude de modélisation conduite récemment (Adams E.E. *et al.*, 1997). Cette étude s'applique à prévoir, une fois atteint l'état d'équilibre, les changements de pH qu'induirait l'injection du CO₂ produit par une centrale à charbon de 500 Mwatt (ce qui correspond à 130 kg/s de CO₂). Plusieurs options d'injection sont étudiées, le cas le plus simple étant celui d'un flux unique de CO₂ liquide diffusé selon un panache de micro-gouttellettes (diffuseur statique). Les résultats montrent alors que le pH, de 7,8 à l'origine, perdrait environ 1 unité dans une zone de plusieurs kilomètres autour du point d'injection. Cette forte variation ne saurait être sans conséquence sur l'écosystème local. Cependant, l'adoption de dispositifs moins « agressifs » autorisant une diffusion plus large et plus rapide du CO₂ pourrait permettre de l'atténuer. Par exemple, on peut multiplier les points d'injection pour créer des sources à débits plus faibles ou avoir recours aux diffuseurs mobiles que sont les pipelines plongeant des bateaux.

Avec un impact moins fort sur le pH local, ces dernières options, ainsi que le largage disséminé de blocs de CO₂ solide, seraient certainement moins dommageables pour l'environnement local.

La zone la plus riche au niveau de la biomasse est localisée à des profondeurs de 500 à 1 000 m. Au-delà, la vie pélagique diminue exponentiellement. En revanche, il existe une population significative d'organismes qui vivent dans les zones très profondes (organismes benthiques). L'option consistant à créer un lac de CO₂ dans une dépression ponctuelle du fonds océanique ne perturberait que ces populations mais, localement, ses dommages seraient sévères.

À l'échelle régionale ou globale, l'impact à long terme sur les écosystèmes marins reste plus difficile à estimer. Mais on ne peut écarter la possibilité d'une diminution des taux de reproduction ou de croissance sur la population animale. L'une des préoccupations concerne particulièrement les espèces pélagiques qui connaissent des migrations verticales sur des périodes de temps variables, de la journée à la saison. Une couche d'eau plus acide (pH plus faible) pourrait en effet constituer une barrière pour de tels processus (IEA, 2002b). On a pu également prouver que des espèces à haut métabolisme, comme les calamars, supportent beaucoup moins bien des variations de pH que d'autres espèces comme, par exemple, les vers des sédiments marins (Poertner H.O. et Reipschlager A., 1996).

d) Projets réalisés ou en cours : état des lieux

Pays leader dans la recherche sur la séquestration du CO₂ dans l'océan, le Japon s'est lancé dès 1997 dans un grand programme de recherche national. Outre quelques entreprises privées et des universités, le projet est soutenu par deux grands instituts

japonais : le Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE) et le Kansai Environmental Engineering Center. Il vise à étudier le comportement du CO₂ liquide dans l'océan et à développer parallèlement des systèmes d'ingénierie pour l'injection profonde. Par ailleurs, l'impact environnemental du CO₂ et plus particulièrement ses effets sur les organismes marins constitue un important volet des travaux de recherche. Enfin, des modélisations sont effectuées pour évaluer le devenir du CO₂ séquestré sur le long terme (Masuda, 1998).

Climate change research sparks Hawaii protests

Hawaiian tourism companies, commercial fishermen and sports groups have joined environmentalists to fight a research project designed to combat climate change.

The project would inject liquid carbon dioxide into waters off the island of Kauai as an alternative to letting CO₂ gas - thought to cause global warming - escape into the atmosphere. Opponents fear the test is just the first step in a long series of experiments that would increase the acidity of the waters, move downstream and damage marine life on the way.

Funding would be provided mostly by Japan with Norway and the US chipping in. It was agreed under the Kyoto climate change accord that "ocean sequestration" should be tested, and the effort has drawn support from several multinational energy and automotive companies, including Chevron/Texaco, GM, Exxon/Mobil and Ford.

The US Department of Energy has ruled that an environmental impact statement was unnecessary because human beings will not be affected.

The plan is to carry out a two-week dumping experiment in federal waters to test for the dispersions and dissolution of CO₂ in waters of moderate depth. The department also concluded that mitigation measures "will further address public" concerns. Other countries are trying out forms of ocean sequestration. Norway has been pumping 1m tonnes of liquefied CO₂ each year into depleted natural gas aquifers below the North Sea. Japan is researching deep ocean disposal,

In Hawaii, however, dumping pollution into the surrounding ocean is "socially unacceptable", said Isaac Harp, president of the Coalition Against CO₂ dumping. It is also politically unacceptable to Congresswoman Patsy Mink, who has urged that the experiments be conducted elsewhere. She asked why "this experiment, which is being funded primarily by Japan and Norway, would be conducted in Hawaii".

"Hawaii's ocean environment is too precious to put at risk for an experiment of this kind", she said.

The coalition has already defeated a larger sequestration project, overcoming objections that it was "anti-science". The Hawaii State Natural Energy Laboratory, a recipient of federal energy department funds, rescinded permission to conduct it.

The testing will be performed by Pacific International High Technology Research. Several other grants have been issued. One would finance the testing of the use algae growing on artificial reefs to absorb CO₂.

Mr Harp said that the backers of the project had divided the sequestration effort into small pieces to avoid having to prepare a full impact report. "It is not a scientific experiment. It is a large scale technology feasibility project without peer reviews or support from any independent scientific person or organisation", he said.

The Union of Concerned Scientists has also expressed doubt about the process. It suggested that technological capacity was "running ahead of our scientific, especially ecological understanding of the consequences of marine sequestration".

Nancy Dunne in Washington, Published : June 20 2002

La même année 1997 a été initié un grand projet international impliquant, outre le RITE japonais, la Norvège (Norwegian Institute for Water Research) et les États-Unis (Massachusetts Institute of Technology). Depuis, le Canada (Institute of Ocean Sciences), l'Australie, et la Suisse ont rejoint le projet initialement prévu pour 5 ans et devant donc se terminer en mars 2002. Outre des expériences *in situ* qui devaient se dérouler au large des Kona Coast à Hawaii pendant l'été 2001, le projet prévoyait des

* N.B. : Il s'agit d'une erreur de la journaliste puisque les aquifères salins dans lesquels le CO₂ est injecté en mer du Nord (projet Sleipner) ne sont en rien d'anciens réservoirs de gaz ; voir chapitre consacré à ce projet).

injections de CO₂ dans des sites plus restreints tels que des fjords (Adams *et al.*, 1997), ce afin d'examiner plus précisément les impacts sur la biomasse locale.

De nombreuses voies, notamment parmi les habitants de l'île d'Hawaï, se sont élevées pour dénoncer le projet. Les expériences, qui prévoyaient l'injection de 60 t de dioxyde de carbone liquide à 800 m de profondeur, ont dû être, dans un premier temps, reportées à l'année suivante avant d'être définitivement abandonnées.

**Séquestration de CO₂ dans l'océan profond :
un nouveau projet de l'US department of Energy**

L'université du Massachusetts s'apprête à étudier dans son laboratoire une nouvelle technique pour la séquestration du CO₂ dans l'océan profond. Dans cette méthode, du CO₂ liquide, de l'eau et du calcaire finement broyé seront mélangés dans une émulsion pour ensuite être injectés dans l'océan pour le stockage à long terme. Cette émulsion, plus dense que l'eau de mer, descendrait dans les couches profondes de l'océan par gravité. Ceci permettrait d'injecter le CO₂ à des profondeurs plus faibles que dans les techniques proposées jusqu'ici. Durant la première année du projet, l'étude portera sur la structure et la stabilité de l'émulsion. L'année suivante, il est prévu d'étudier les caractéristiques d'écoulement de l'émulsion dans un pipe afin de déterminer le mélange idéal des différents produits et optimiser la stabilité de l'émulsion.

« Greenhouse Issues » - Number 59, March 2002

e) Une option de séquestration qui fait débat

Selon les spécialistes du domaine, il serait possible de séquestrer des quantités énormes de CO₂, de l'ordre de plusieurs milliers de GtC (Herzog, 2001c), ce qui place l'océan en tête de tous les sites potentiels de séquestration.

Cependant, les incertitudes qui demeurent quant aux impacts environnementaux de cette option de séquestration constituent un sérieux obstacle à son développement. Pour le moment, l'application stricte du principe de précaution empêche le passage de l'étape de projets pilotes à la mise en œuvre de cette option dans des quantités susceptibles d'avoir un impact en terme de lutte contre le changement climatique. C'est l'avis des détracteurs qui ont manifesté leur opposition aux expériences réalisées au large d'Hawaï. Les scientifiques impliqués dans les projets de recherche argumentent, quant à eux, que le principe de précaution s'applique également à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre de l'atmosphère et que celle-ci n'est pas sans effet sur les couches superficielles de l'océan. Leur argumentation tient dans le triple constat que (1) les couches superficielles sont actuellement en train de se charger en carbone inorganique dissous, que (2) ces zones contiennent une biomasse beaucoup plus abondante que les zones profondes et que (3) les couches profondes se trouvent bien en dessous de leur potentiel en terme de stockage de CO₂. La question qui reste à trancher est de savoir où se situe le plus grand risque : conduire des tests expérimentaux ou attendre ?

2.2.4. De nouveaux concepts émergents

En marge des méthodes de séquestration industrielle par injection dans le sous-sol ou l'océan pour lesquels, même si de nombreuses incertitudes demeurent, de grandes avancées ont d'ores et déjà été réalisées, il existe d'autres concepts, encore embryonnaires, qui pourraient être amenés à se développer à moyen terme. Sans être complètement exhaustif, nous reprenons ici trois de ces terrains d'investigation.

a) Fixation du CO₂ en un produit stable : le carbonate

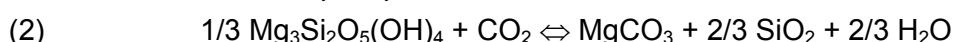
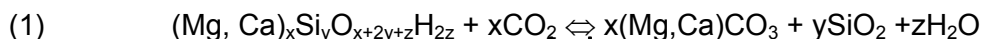
La plupart des méthodes de séquestration de CO₂ se calquent sur les processus naturels d'échange de carbone entre les réservoirs présents dans l'océan, la biosphère terrestre, ou le sous-sol. Pour ce qui concerne ce dernier milieu, les roches carbonatées représentent le plus important stock de carbone (voir première partie, § 1.2.).

Leur formation est la conséquence d'interactions diverses (altération superficielle, circulation d'eaux souterraines ou activité hydrothermale) entre fluides aqueux et roches silicatés enrichies en calcium et magnésium, interactions qui conduisent à la libération de ces éléments dans le fluide. Calcium et magnésium vont ensuite réagir avec le CO₂ dissous, présent naturellement dans le milieu, pour précipiter des carbonates. Le résultat final est donc la conversion du CO₂ en un minéral, donc un produit stable.

L'exploitation de ce processus naturel pour séquestrer du CO₂ d'origine industrielle - on parle de séquestration sous forme minérale, de piégeage minéralogique (mineral sequestration) ou de carbonatation sous forme minérale (mineral carbonation) - a été proposé pour la première fois il y a une dizaine d'année (Seifritz, 1990).

Plusieurs méthodes, utilisant différents procédés et réalisés *in situ* ou en milieu industriel, ont été suggérées pour réaliser la carbonatation (Gunter W.D. *et al.*, 1993 ; Lackner K.S. *et al.* 1995 ; Kojima T. *et al.*, 1997 ; O'Connor W.K., 1998).

Les réactions de carbonatation qui se produisent spontanément à l'échelle des temps géologiques sont bien connues des géologues. Les trois réactions ci-dessous sont données à titre d'illustration des processus impliqués :



La famille de réactions représentée par la réaction (1) montrent le processus par lequel les minéraux silicatés sont transformés, lorsqu'ils réagissent avec du CO₂, en minéraux carbonatés, en silice et en eau. La réaction (2) illustre la transformation d'un minéral silicaté commun, la serpentine et du CO₂ en magnésite (carbonate de magnésium), eau et silice. D'après cet équilibre, une tonne de serpentine permettrait de stocker environ une demi-tonne de CO₂. La réaction (3) illustre la transformation d'un autre minéral, la forsterite, qui est le pôle Mg d'un minéral commun, l'olivine. Dans ce dernier cas, une tonne d'olivine peut, dans l'absolu, piéger jusqu'à deux-tiers de tonne de CO₂.

Dans une vue conceptuelle, une opération de séquestration pourrait donc consister à amener une source concentrée de CO₂ jusqu'à un « réacteur de carbonatation » où serait également apportée de l'olivine ou de la serpentine broyées, en provenance d'une mine. Les différents produits de la réaction seraient ensuite séparés, le CO₂ résiduel pouvant être recyclé et les minéraux carbonatés ramenés à la mine ou éventuellement utilisés pour d'autres applications.

Sur la base de différentes hypothèses (teneur en MgO du silicate utilisé, rendement de la réaction...) une estimation montre qu'une centrale de 500 MW qui génère

approximativement 10 000 tonnes de CO₂ par jour nécessiterait un peu plus de 30 000 tonnes par jour de minerais (Goldberg Ph. *et al.*, 2001).

Ce concept de séquestration présente deux principaux avantages : (1) une stabilité sur le long terme : la carbonatation sous forme minérale est un processus naturel qui ne présente, en lui-même, aucun danger ni nuisance environnementale. De plus, on peut considérer comme permanente la fixation du CO₂ contrairement à d'autres options de séquestration ; (2) de vastes capacités de stockage : la matière première est très largement disponible et présente une bonne répartition géographique. Des estimations ont montré que les complexes ultramafiques d'Amérique du Nord contenaient une quantité suffisante de minéraux silicatés magnésiens pour fournir la matière première nécessaire à la carbonatation des émissions de CO₂ annuelles globales, et ce pour de nombreuses années (Goff F. *et al.*, 1997).

Par ailleurs, le procédé est potentiellement rentable puisque, d'une part, il est exothermique (réactions avec dégagement de chaleur) et les coûts de l'opération peuvent être compensés par la valorisation des produits obtenus.

La principale barrière pour ce procédé réside dans la lenteur des réactions impliquées. Les priorités de recherche sont placées dans la façon de parvenir à les accélérer. Par ailleurs, il convient de mesurer l'impact environnemental d'une exploitation minière de cette ampleur.

Avec le soutien du département à l'Énergie américain (DOE), une équipe de chercheurs du National Energy Technology Laboratory, de l'Albany Research Centre (ARC), de Los Alamos National Laboratory, et de l'université de l'état de l'Arizona s'est constituée en 1998 afin de mener un projet de recherche visant à étudier et à améliorer le procédé de carbonatation. Trois objectifs principaux ont été définis : (1) identifier les technologies les plus efficaces, (2) déterminer la faisabilité économique des différents procédés possibles, (3) déterminer les impacts environnementaux de chaque procédé.

De nombreuses expériences ont été réalisées avec de l'olivine et de la serpentine. Les travaux de recherche ont d'ores et déjà permis de réduire considérablement les temps de réactions. Par ailleurs, de nombreuses techniques ont été testées telles que : un prétraitement à la chaleur, une carbonatation dans l'acide carbonique en solution aqueuse, une modification de la chimie des solutions et notamment leurs concentrations en HCO₃⁻, l'utilisation d'une solution d'HCl réagissant avec la serpentine pour produire du Mg(OH)₂ ensuite utilisé pour séquestrer le CO₂..., etc. Les chercheurs étudient également la possibilité d'utiliser, à la place des minéraux naturels, certains déchets comme les « cendres volantes » (poussières parfois toxiques qui sont des déchets de combustions industrielles) riches en calcium et magnésium comme matière première pour séquestrer le CO₂ (Goldberg P.M. *et al.*, 2000).

L'objectif est de construire, d'ici 2006, une unité pilote capable de séquestrer 5,5 t par heure de CO₂, soit l'équivalent de ce qui est produit par une centrale de 10 MWe (Goldberg Ph. *et al.*, 2001).

Cependant, même avec les progrès réalisés jusque là, le procédé reste relativement lent et la plupart des réactions nécessitent des hautes pressions et des températures assez élevées, ce qui implique un coût énergétique important. Le développement à

grande échelle d'une méthode de séquestration économiquement rentable basée sur la carbonatation reste donc incertain.

**Un nouveau concept de production d'énergie « propre »
utilisant la séquestration de CO₂ par décarbonatation**

Ce concept prévoit la production d'hydrogène et de CO₂ par transformation du charbon au moyen d'une réaction chimique à haute température avec la vapeur. Il n'y a pas de combustion. L'hydrogène ainsi obtenu pourrait être utilisé comme combustible dans une pile thermique à combustible à oxyde solide pour produire de l'électricité. En faisant réagir le CO₂ avec de la chaux, CaO, on élimine le CO₂ et l'on produit un minéral, le carbonate de calcium (CaCO₃). La calcination du CaCO₃ à haute température libère un flux concentré de CO₂, et le CaO est recyclé. En faisant réagir le CO₂ libéré avec de la serpentine naturelle, un silicate de magnésium, on pourrait obtenir du carbonate de magnésium, produit sans danger qui pourrait être entreposé dans la mine de serpentine.

Ce concept a été proposé initialement par le Los Alamos National Laboratory, au Nouveau-Mexique. Depuis, un consortium appelé ZECA (Zero Emission Coal Alliance) explore plus à fond le concept. Ce consortium a entrepris au coût de 550 000 dollars (US) une étude de faisabilité techno-économique de la proposition. Le ZECA est composé de huit producteurs de charbon, sociétés de service public et fabricants des États-Unis, avec le Los Alamos National Laboratory. Il compte également quelques participants canadiens : EPCOR, SaskPower, Ontario Power Generation, TransAlta Utility Corporation, AFL Venture (ATCO, Fording Coal and Luscar Ltd.), l'Association charbonnière canadienne, AOSTRA et Ressources naturelles Canada.

Source : D.A. Reeve, 2000

Parallèlement aux processus purement chimiques que nous avons décrits, d'autres processus, de nature biologique, interviennent également dans la précipitation des carbonates en présence de CO₂. Certains micro-organismes (enzymes, bactéries, microalgues) favorisent, en effet, ce processus. Une meilleure compréhension de leur action pourrait conduire à des solutions innovantes pour la capture du CO₂ d'origine anthropique comme, par exemple, l'utilisation de l'enzyme anhydrase carbonique pour convertir du CO₂ en carbonate de magnésium (Bond G.M. *et al.*, 1999 ; Bond G.M. *et al.*, 2000).

Dans cet objectif, un programme de recherche est actuellement conduit aux États-Unis. Ce projet, conduit par le National Energy Technology Laboratory du DOE (Department of Fossil Energy) a pour objectif d'utiliser ces processus biologiques pour stabiliser, comme dans l'étude que nous avons citée précédemment, des « cendres volantes » (Roh Y. *et al.*, 2001). Celles-ci pourraient ainsi être transformées en conglomérats carbonatés utilisables ensuite dans le génie civil comme matériaux de comblement ou pour la construction des routes.

La mise en œuvre du procédé pourrait consister en un système ouvert où les déchets seraient colonisés par des microorganismes capables de produire de la calcite, de l'aragonite, et des carbonates de fer comme la sidérite. Ces carbonates seraient formés *in situ*, d'une part, en surface par des algues et, d'autre part, en profondeur par des bactéries anaérobies.

Les résultats des recherches montrent aujourd'hui que les bactéries ferro-réductrices transforment bien le CO₂ en minéraux carbonatés (calcite/sidérite) en utilisant le métal contenu dans les cendres volantes.

Ce procédé présente le triple avantage de piéger du carbone sous une forme stable, de stabiliser des déchets potentiellement polluants et de les convertir en un produit ensuite valorisable. Par ailleurs, des déchets agricoles ou issus de l'industrie

agroalimentaire pourraient être utilisés comme source énergétique pour la croissance des ces micro-organismes et être donc ainsi recyclés.

Cependant, la biominéralisation générée par l'activité de ces microalgues n'est pas le seul mécanisme valorisable de fixation du carbone, on peut également tirer parti d'un autre mécanisme qui est la constitution de leurs propres tissus par photosynthèse.

b) Biofixation du CO₂ par la photosynthèse de microalgues

De la même manière que les activités liées à l'utilisation des terres ou la fertilisation des océans*, ce concept repose sur le processus de fixation du carbone qu'est la photosynthèse. En revanche, au contraire de ces deux options de séquestration qui agissent de façon globale sur l'atmosphère, il s'agit ici d'agir à l'échelle locale pour traiter les effluents gazeux d'une unité industrielle.

Le processus de photosynthèse par les plantes est trop lent pour agir significativement sur une source locale et concentrée de CO₂. En revanche, les microalgues sont des espèces à croissance rapide dont les taux de fixation du carbone sont nettement supérieurs. L'efficacité d'utilisation des rayonnements solaires est ainsi de 5 % pour les microalgues contre 0,2 % pour les végétaux classiques.

Trois organismes, Physical Sciences Inc. (PSI), une compagnie américaine, Aquasearch Inc., et le Hawaii Natural Energy Institute de l'université d'Hawaii travaillent ensemble à développer les technologies qui permettraient de récupérer et séquestrer du CO₂ de sources concentrées par la photosynthèse des microalgues (Nakamura T. *et al.*, 2001). L'objectif ultime est de quantifier le potentiel de séquestration à l'échelle industrielle.

Le principe serait celui d'un « photobioréacteur » où serait incorporé du CO₂ d'origine industrielle ainsi que les nutriments nécessaires à la croissance des algues (fig. 46). À ce stade des recherches, il n'a pas encore décidé laquelle des deux solutions était la plus judicieuse : minéralisation du carbone (production de carbonate) grâce à l'activité alguaire ou fabrication de produits à haute valeur commerciale.

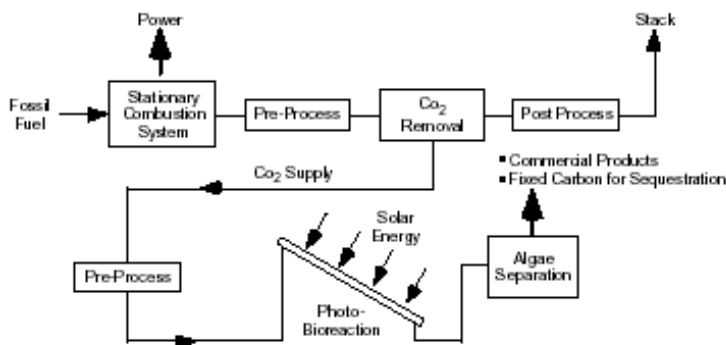


Fig. 46 - Récupération et séquestration du CO₂ produit par une centrale par photosynthèse de microalgues (Nakamura T. et al., 2001).

En effet, les microalgues peuvent notamment produire des produits utilisables dans l'industrie pharmaceutique ou chimique, des combustibles ou d'autres produits divers.

* ces options de séquestration seront développées dans le chapitre suivant.

À l'heure actuelle, les principaux débouchés sont les additifs alimentaires ou l'utilisation des algues pour le traitement de déchets. Cette industrie est encore modeste, la production mondiale annuelle étant de quelques milliers de tonnes par an. Cependant, les prix sont très élevés et le marché, qui représente actuellement plus de 5 milliards de Dollars US, devrait connaître un fort développement dans les prochaines décennies (jusqu'à 50 milliards, Nakamura T. *et al.*, 2001).

Les deux possibilités (biominéralisation ou valorisation en produit commercial) peuvent être combinées et dépendent du choix des espèces d'algues qui seront sélectionnées.

Outre cette valeur ajoutée qui permet de compenser les coûts engagés, le procédé présente plusieurs avantages :

- la culture des algues ne nécessite pas un approvisionnement en CO₂ pur. On peut utiliser un flux gazeux ne contenant que 2 à 5 % de CO₂, ce qui simplifie significativement l'étape de séparation des gaz ;
- des produits issus de la combustion comme NO_x ou SO_x peuvent participer à l'apport nutritif des algues, ce qui, à nouveau simplifie les procédés ;
- les produits sont recyclés et l'impact environnemental est donc réduit.

Le projet bénéficie de l'interdisciplinarité des équipes de chercheurs : Aquasearch Inc, la compagnie américaine a développé le photobioréacteur (13 millions de Dollars d'investissement) qui produit d'ores et déjà des denrées commercialisées. L'université d'Hawaï apporte son expertise dans la compréhension et l'évaluation des processus de séquestration du CO₂. Enfin, PSI possède une importante expertise technique dans les domaines du contrôle des pollutions et du traitement des déchets.

Le programme de recherche commun comprend cinq volets répartis sur trois ans :

- année 1 : capture du flux gazeux en provenance d'une centrale thermique ; sélection, à partir de 15 à 20 espèces, des algues les mieux adaptées (y compris au flux gazeux) ;
- années 2 et 3 : optimisation et démonstration du fonctionnement du photobioréacteur à l'échelle industrielle, mise au point du système de séquestration et analyse économique du procédé.

Pour le moment, les rendements sont encore modestes : moins de 100 tonnes de CO₂ sont fixées par hectare cultivé et par an. On estime qu'une réduction des coûts de production ainsi qu'une amélioration de la productivité permettant de passer à 400 t de CO₂ fixées par hectare et par an, seront indispensables avant que cette méthode ne puisse avoir un rôle significatif dans la lutte contre l'augmentation de l'effet de serre (IEA, 2001d).

L'IEA et son programme R&D GHG s'intéresse également à ce concept innovant. Elle a ainsi organisé avec une société, EniTecnologie, et le DOE américain un workshop visant à étudier la possibilité de mettre en place un réseau international de collaboration et de coordination de R&D sur la biofixation du CO₂ par l'utilisation de microalgues.

Ce workshop s'est tenu dans les laboratoires de EniTecnologie près de Rome en janvier 2001 et a réuni 38 participants d'origines diverses : fournisseurs d'énergie,

industriels du domaine de la culture alguaire, universitaires et représentants d'organisations gouvernementales. Il a permis de décrire l'état de l'art de la biofixation par les microalgues et d'identifier de possibles pistes de R&D avec, à la clef, une proposition formelle pour l'établissement d'un réseau R&D sous le patronage du programme IEA GHG (IEA, 2001e).

c) Produire du méthane avec du CO₂ : les bactéries méthanogènes

La séquestration dans les réservoirs pétroliers ou les veines de charbon profond offre, grâce à la récupération de produits valorisables commercialement, la possibilité de compenser les coûts supplémentaires. Quand il n'existe pas une telle valeur ajoutée, ce peut être un souci d'économie comme dans le cas de l'injection de CO₂ dans les aquifères salins en mer du Nord qui n'aurait sans doute pas vu le jour sans la taxe norvégienne sur le CO₂. Dans tous les cas, les opérations de séquestration ne pourront se développer que si le contexte économique est favorable.

C'est précisément dans cet esprit que des recherches sont aujourd'hui menées pour mettre en œuvre un concept permettant de recycler le CO₂ en CH₄ après son injection dans le sous-sol (Koide H., Yamazaki K., 2000 ; Beecy D.J. *et al.*, 2000 ; Budwill K. *et al.*, 2002).

Le méthane biogénique désigne le gaz naturel issu de la réduction du CO₂ via des processus biogéochimiques (Rice D.D. et Claypoal G.E., 1981). Les processus qui contribuent à la production du méthane sont complexes et encore mal connus. Les observations montrent qu'ils varient d'un site à l'autre et qu'ils se produisent généralement sur de longues périodes. Les processus biologiques incluent la méthanogénèse et l'hydrogénéogénèse mais des processus géochimiques ont également pu être identifiés (Schoell M. *et al.*, 2001).

Les bactéries méthanogènes produisent du méthane par plusieurs voies qui sont principalement la fermentation de l'acétate et la réduction du CO₂ en CH₄ (Ferry J.G., 1992 ; Whiticar M.J. *et al.*, 1986). Ces bactéries anaérobies, qui appartiennent à la famille Archaea, se rencontrent dans des environnements très divers tels que les systèmes digestifs des animaux, les fonds océaniques ou les filons houillers. D'une façon générale, c'est un ensemble d'organismes microbiens qui fonctionnent en synergie et participent à une série de réactions biochimiques dans la production de méthane.

Globalement, on estime que 20 % du gaz naturel provient de l'activité bactérienne dont les deux tiers par fermentation de l'acétate et le tiers restant par réduction du CO₂ (Whiticar M.J., 1986). Cependant, la fraction générée par les méthanogènes varie beaucoup et elle peut être, dans certains cas, dominante.

Par exemple, dans le site de Terang-Sirusan dans la partie Est de la mer de Java, le méthane est généré exclusivement par les bactéries méthanogènes à travers la réduction du CO₂ (Noble R.A. *et al.*, 1998). À Monterey Bay (Californie), les études menées sur les gaz qui accompagnent les infiltrations d'hydrocarbure des fonds marins suggèrent également que la majeure partie du méthane produit est d'origine microbienne (Lorenson T.D. *et al.*, 2000).

Une étude récente des champs gaziers et pétroliers du Golfe de Mexico donne des informations sur les vitesses de ces processus et montre qu'ils peuvent participer au renouvellement des réserves à une échelle de temps compatible avec une exploitation commerciale (de l'ordre de la décennie) (Whelan J.K., 2000). Pour ce qui concerne les filons houillers, les méthanogènes peuvent dopper la production de méthane des veines de charbon comme le confirme des études menées en laboratoire (Scott A.R., 1999).

Les derniers développements dans le décodage et le séquençage génétique, l'identification de nouvelles enzymes et leur sélection selon des critères spécifiques devraient permettre d'améliorer les processus de conversion du CH₄ en CO₂ (Arnold F.H. *et al.*, 2000). L'approvisionnement en hydrogène constituant un facteur limitant important, il reste nécessaire de trouver, dans un système donné, la combinaison optimale de bactéries méthanogènes et hydrogénogènes. Dans certains cas, on peut également imaginer d'injecter de la matière organique pour fournir l'hydrogène et favoriser ainsi une conversion du CO₂ en CH₄ plus rapide et plus complète. De toute évidence, il s'agit là d'un domaine de recherche prometteur (Koide H., 1999 ; Beecy D.J. *et al.*, 2001).

d) Conclusion

Depuis quelques années, il existe une certaine prise de conscience quant à l'importance des processus biologiques dans de très nombreux phénomènes naturels et notamment dans le cycle du carbone. À l'interface entre biologie, géologie et géochimie, la géobiologie est une science en plein essor qui pourrait jouer un rôle capital dans le développement de ces nouveaux concepts de séquestration comme la minéralisation ou la conversion du CO₂ en CH₄.

Outre l'identification de nouvelles pistes potentiellement intéressantes, le défi consiste aujourd'hui à acquérir une meilleure connaissance des processus biogéochimiques naturels qui restent encore souvent obscures et de parvenir à améliorer leur rentabilité, notamment par des gains sur les échelles spatiales et temporelles. Si les activités de R&D qui s'y appliquent actuellement s'avèrent fructueuses, ces procédés de séquestration pourraient alors connaître à moyen terme une application industrielle et apporter leur contribution à la lutte contre le changement climatique. En revanche, il est évident qu'au jour d'aujourd'hui l'estimation des volumes de CO₂ séquestrables par la mise en œuvre de ces procédés innovants reste encore prématurée.

2.2.5. Séquestration industrielle : synthèse

La figure 47 reprend les différentes voies possibles que nous avons décrites pour la séquestration des sources concentrées de CO₂. Bien que la séquestration sous forme minérale (carbonatation) ait été envisagée *in situ*, la mise en application des concepts émergents ou l'injection dans l'océan ne présente pas les mêmes contraintes que l'option géologique d'injection dans le sous-sol pour laquelle il est nécessaire de trouver des sites adaptés impliquant donc une bonne caractérisation préalable des structures.

* Des sessions sont consacrées à cette thématique dans les conférences nationales et internationales sur la séquestration (GHGT ; National conference on Carbon sequestration) et plusieurs séminaires sont également spécialement organisés comme le *Mineral Carbonation Workshop*.

L'estimation des capacités de stockage globales reste donc encore un exercice difficile. En effet, malgré la mise en œuvre de très importants moyens de R&D et le développement de plus en plus de projets intégrant des sites pilotes, les lacunes sont encore importantes. Au-delà des problèmes scientifiques et techniques se rapportant directement à la séquestration du CO₂, d'importantes barrières se situent également au niveau de la capture dont les coûts restent prohibitifs.

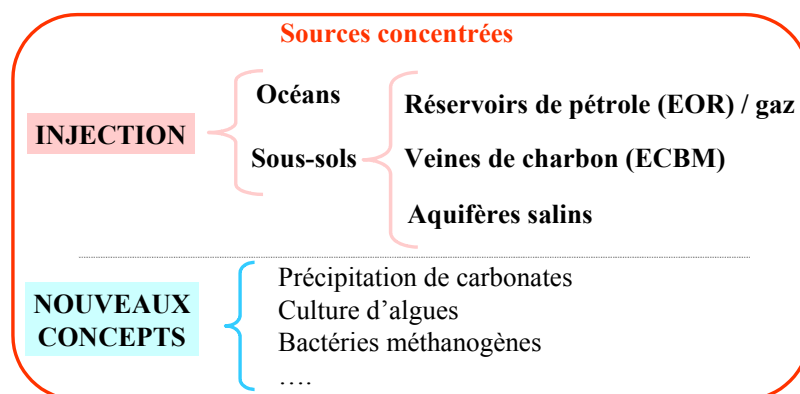


Fig. 47 - Récapitulation des options de séquestration industrielle.

a) De fortes capacités de stockage... mais beaucoup d'incertitudes

Si l'estimation des capacités de stockage de CO₂ offerts par les différents types d'options de séquestration industrielle à l'échelle planétaire reste encore imprécise, on possède aujourd'hui une idée grossière de leur importance relative (fig. 48).

Océans		1000s GtC
Aquifères	100s GtC	1000s GtC
Réservoirs pétroles/gaz	100s GtC	
Veines charbon	10s GtC	100s GtC

Fig. 48 - Estimation comparative des quantités de CO₂ séquestrables (en Gt de carbone) à l'échelle mondiale (valeurs selon Herzog, 2001c).

Il semblerait que l'océan soit, de tous les candidats, celui qui possède les plus grandes capacités, ceci en excluant tous critères liés aux impacts environnementaux. Pour ce qui est des capacités de séquestration dans le sous-sol, de nombreux pays ont d'ores et déjà entrepris des études visant à les inventorier. Les réservoirs d'hydrocarbures pourraient stocker jusqu'à quelques centaines de milliards de tonnes de carbone, soit plusieurs centaines d'années d'émissions anthropiques. Les estimations concernant ces structures sont parmi les mieux contraintes grâce à l'expérience acquise au cours de quelques décennies d'exploration et exploitation pétrolières. En revanche, de très grandes incertitudes (de l'ordre d'un facteur 10) demeurent quant aux capacités de stockage dans les aquifères et les veines de charbon. Au-delà du simple recensement de ces objets, il est en effet encore très difficile de déterminer quels sont, parmi l'ensemble, ceux qui se prêtent réellement à une séquestration sur le long terme.

Cependant, quelque soit l'incertitude sur les estimations, il demeure un point essentiel : la potentialité des options de séquestration industrielle est énorme et pourrait couvrir largement les objectifs visés dans la lutte contre le réchauffement climatique.

b) Les projets de recherche : un bon début mais des efforts à poursuivre

En regard des potentiels estimés, les quantités de CO₂ effectivement séquestrées - et ce en supposant une stabilité sur le long terme des volumes déjà injectés - sont très limitées et évaluées à quelques millions de tonnes de CO₂ chaque année (moins de 2 MtC/an). Environ 5 millions de tonnes par an de CO₂ d'origine anthropique sont injectées dans des opérations de récupération assistée de pétrole et 1 million de tonne dans l'aquifère d'Utsira en mer du Nord. Pour le moment, les injections dans les veines de charbon (San Juan Bassin, USA et Fenn Big Valley, Canada) sont réalisées à partir de CO₂ naturel.

Ces chiffres rappellent que les projets de recherche sur la séquestration industrielle (voir ann. 3) sont encore pour la plupart très jeunes et ceci est tout particulièrement vrai pour ce qui est de la mise en œuvre de sites pilotes. Nous n'avons aujourd'hui, dans les meilleurs des cas, que quelques années de recul.

Pour ce qui concerne les aspects scientifiques, les principaux challenges des projets de recherche dans les années à venir seront :

- pour la **séquestration océanique** : de s'assurer de l'inocuité sur les écosystèmes d'un stockage massif de CO₂ dans l'océan. Il n'existe pas à ce jour de véritable site pilote et les quelques expériences d'injection qui avaient été planifiées ont beaucoup de mal à voir le jour du fait d'une forte mobilisation des associations de défense de l'environnement ;
- pour la **séquestration géologique** :
 - de résoudre le conflit de deux objectifs divergents : récupérer du pétrole à moindre coût et séquestrer une quantité optimum de CO₂. En effet, bien que l'injection de CO₂ à des fins de récupération pétrolière soit maintenant une technique éprouvée, l'objectif était jusque là de minimiser les pertes de CO₂ dans le réservoir,
 - d'améliorer notre compréhension des processus physiques et chimiques siégeant dans les réservoirs. Les sites pilotes de Weyburn et de Sleipner en mer du Nord devraient apporter à court terme des résultats capitaux sur ce point. D'autre part, l'étude des analogues naturels (gisements de CO₂) à laquelle se consacrent notamment plusieurs projets de recherche (programmes NASCENT en Europe et GEODISC en Australie) seront également riches d'enseignements,
 - de développer les technologies de surveillance et de contrôle du devenir du CO₂ dans le réservoir (migrations et fuites éventuelles). En effet, bien que les champs de pétrole ou de gaz soient des structures qui aient prouvé leur stabilité sur plusieurs millions d'années, elles peuvent avoir été fragilisées suite aux opérations de forage, d'extraction des produits ou d'injection du CO₂. Un contrôle par des méthodes géophysiques (sismiques) ainsi qu'une surveillance étroite des puits s'avèreront toujours indispensables dans les opérations de séquestration géologiques.

c) Un nécessaire abaissement des coûts

Le fait que le CO₂ naturel reste aujourd'hui la source d'approvisionnement la moins onéreuse constitue le principal frein au développement des méthodes de séquestration qui ont d'autres avantages économiques par ailleurs (récupération de pétrole ou de gaz) où l'on constate que le CO₂ naturel reste la source largement la plus utilisée.

Sur les trois grandes étapes de la séquestration industrielle - capture, transport, stockage (injection) - la dernière reste la moins onéreuse. Les coûts estimés par exemple pour les réservoirs salins ou d'hydrocarbures sont très bas, de l'ordre de 1 à 3 USD (IEA, 2001c).

À cause des très grands volumes impliqués, le moyen le plus adapté pour transporter le CO₂ depuis une source concentrée jusqu'à son site de stockage est le pipeline. Le transport de gaz par pipeline est maintenant une technique bien éprouvée par l'industrie pétrolière, de même que les tankers qui transportent couramment du gaz liquéfié (LPG, liquide petroleum gas). En prenant en compte l'infrastructure nécessaire, le coût de transport par pipeline a été estimé à 7,82 USD par tonne de CO₂ pour une distance de 500 km (Doctor R.H. *et al.*, 2001), ou de l'ordre de 1 à 3 USD par tonne de CO₂ et par tranche de 100 km (IEA, 2001c). Ce coût est bien sûr majoré lorsque le réservoir de stockage se trouve offshore ou dans le cas de l'injection dans l'océan. Dans ce cas, le coût de transport du CO₂ par pipeline sur une distance de 500 km serait d'environ 12 USD par tonne de CO₂ (IEA, 2002b). Avec des tankers qui achemineraient le CO₂ jusqu'à une plate-forme d'injection (cas de l'injection à grande profondeur), le prix serait cependant moins élevé et devrait avoisiner 2 USD par tonne de CO₂. Mais à cela, il conviendrait d'ajouter les frais supplémentaires dus notamment à l'acheminement du CO₂ jusqu'au port ainsi que la mise en place de la plate-forme en haute mer et du pipeline plongeant. Dans le cas d'injection à moindre profondeur depuis un bateau mobile, les coûts devraient avoisiner ceux d'un pipeline vertical fixe. Enfin, on estime que de toutes les options, le largage par bateau de blocs de CO₂ solide serait de loin la plus onéreuse. Il existe très peu d'informations diffusées sur ce type de technique.

La première étape de la séquestration industrielle, c'est-à-dire la capture du CO₂ est de loin celle qui est la plus onéreuse, au moins en ce qui concerne les effluents gazeux des centrales de production d'énergie. Nous avons vu que les coûts de capture variaient de 18 à 80 USD par tonne de CO₂ capturé (deuxième partie, § 1.3.2.). Dans tous les cas, la capture induit des pertes de rendement de la centrale et une majoration du prix de l'électricité qui varie en fonction du type de centrale (charbon, IGCC ou NGCC) et du procédé de séparation des gaz.

Bien sûr, le coût de capture du CO₂ industriel étant fonction de la concentration du CO₂ dans l'effluent gazeux, le CO₂ capturé des sources concentrées (comme les unités de traitement du gaz naturel) a un coût moins élevé (entre 10 et 15 USD par tonne, S. Wong *et al.*, 2001) que celui des effluents de centrales à combustibles fossiles. Il est donc clair qu'il sera préférentiellement utilisé s'il est disponible en quantité suffisante. Cependant, dans le cas de la récupération ECBM par exemple, même en considérant un coût de CO₂ de 15 USD par tonne et sachant que deux volumes de CO₂ sont nécessaires pour produire un volume de méthane, le coût de production du méthane est porté à 30 USD par tonne. Au prix courant du gaz en tête de puits (50 USD la tonne), le coût représente 60 % du prix du gaz.

Selon une étude récente de l'IEA*, le coût global de la tonne de CO₂ évitée dans le cas d'une centrale se situerait dans une fourchette de 40 à 60 USD, ceci en considérant un coût de transport et stockage (aquifères ou réservoirs de pétrole ou gaz) de 8 USD par tonne de CO₂ séquestré (IEA, 2001c). Si l'on s'en tient à ces estimations, il apparaît que le seul coût de capture représente plus des quatre cinquièmes (80 à 87 %) du coût de la tonne de CO₂ évité.

Une opération complète de séquestration de CO₂ dans l'océan profond (incluant l'étape de capture, de transport et d'injection) devrait avoir, pour un site situé à 500 km des côtes, un coût du même ordre, de 40 à 60 USD par tonne de CO₂ (IEA, 2002b).

Capacité de stockage versus coûts de séquestration

Basé sur les dernières évaluations des réserves pour les 155 plus grandes provinces de pétrole (soit 32 000 gisements de gaz identifiés), un modèle global pour la séquestration de CO₂ dans les gisements de pétrole et gaz épuisés a été construit (Stevens *et al.*, 2001). Le modèle estime la capacité et les coûts de séquestration pour chaque province basés sur la profondeur moyenne, la densité de l'huile, la localisation, les capitaux et frais d'exploitation et les prix du pétrole. La figure 49 présente les courbes estimées de capacité/coût en fonction du type de source de CO₂ (centrale, usine d'engrais, etc.). Selon le scénario de « marché » où le CO₂ de haute pression est mis à la disposition des opérateurs au prix de \$ 100 t/C (environ 27 US D/tCO₂), une capacité de stockage d'environ 34 GtC est disponible dans les gisements de pétrole épuisés, mais aucune dans les gisements de gaz épuisés. Si le CO₂ est fourni gratuitement à l'opérateur une capacité de stockage de 141 GtC pourrait exister dans les gisements de gaz et de pétrole épuisés. (N.B. Ces valeurs supposent un coût de séquestration de l'ordre de 50 USD/tC soit environ 14 US D/tCO₂).

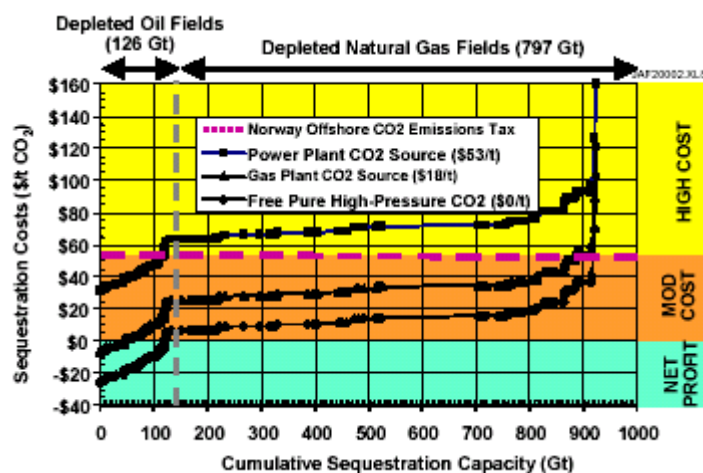


Fig. 49 - Potentiel de séquestration en fonction des coûts (Stevens S.H. et al., 2001).

Outre une baisse des coûts de capture (d'importants progrès technologiques peuvent encore être réalisés), des mesures politiques incitatives ou répressives comme la généralisation d'une taxe sur le CO₂ pourraient permettre le développement des opérations de séquestration. À moins que le futur marché des permis d'émissions ne soit suffisamment attrayant pour inverser l'actuelle trop timide pénétration des méthodes de séquestration industrielle.

* L'étude vise à estimer les coûts de CO₂ capturés et évités (les quantités de CO₂ évité sont moins importantes puisque l'opération de capture génère elle-même des émissions de CO₂ supplémentaires) pour différents types de centrale à charbon, IGCC et NGCC avec des captures pré-combustion (absorption physique) ou post-combustion (absorption chimique par MEA).

2.3. RENFORCER LES CAPACITÉS DE PIÉGEAGE DES RÉSERVOIRS ORGANIQUES : SÉQUESTRATION DANS LA BIOMASSE

Bien que des recherches soient menées pour évaluer les possibilités d'augmenter la capacité de fixation du carbone par la biosphère océanique, les plus gros efforts se concentrent sur la biosphère terrestre avec, prioritairement, les peuplements forestiers et, de façon plus marginale, les actions spécifiques sur les sols.

Dans le domaine de l'utilisation des terres, nous avons vu que les actions possibles dans la lutte contre l'augmentation de l'effet de serre pouvaient prendre trois formes : conservation, substitution et fixation du carbone. Même si nous avons voulu cibler ici plus précisément les activités visant à fixer du carbone qui correspondent à proprement parler à de la séquestration, traiter des processus politiques relatifs à ces questions nous obligeait à dépasser ce cadre. Parce que leur portée sera déterminante dans la lutte contre le changement climatique, nous consacrons une large part à ces processus et aux accords qui en découlent avec, en particulier, la définition d'un instrument spécifique, le Mécanisme de Développement Propre.

2.3.1. Séquestration du carbone dans les écosystèmes terrestres

Pendant la croissance des peuplements forestiers, l'équilibre biologique entre les phénomènes de respiration et de photosynthèse est en faveur de la photosynthèse, ce qui permet la constitution de nouveaux tissus. À maturité, photosynthèse et respiration se compensent et il y a stabilisation de la biomasse du peuplement.

Outre la photosynthèse et la respiration, la quantité de biomasse contenue dans un écosystème forestier (végétation aérienne et souterraine, sol) est influencée par d'autres processus régulateurs tels que la mortalité des différents tissus, l'extraction des produits ligneux au cours des récoltes ou des travaux d'entretien et par la minéralisation de la matière organique contenue dans le sol (fig. 50).

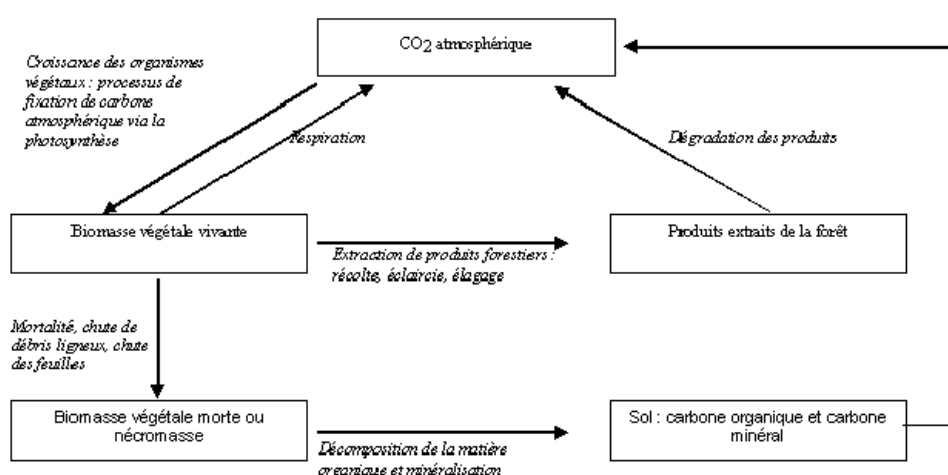


Fig. 50 - Principaux réservoirs et flux de carbone dans un écosystème forestier (C. Mégevand, 1998).

Trois compartiments échangent des flux de carbone avec l'atmosphère. De quelle façon peut-on alors agir sur ces flux ? Nous allons nous intéresser dans un premier

temps aux compartiments « biomasse végétale vivante » et « produits extraits de la forêt ». Nous les traiterons ensemble dans la partie intitulée peuplements forestiers, puis dans un second temps, nous verrons quelles sont les actions possibles sur le compartiment sol.

a) Peuplements forestiers

- **Les activités favorisant la fixation du carbone**

Il existe plusieurs façons d'augmenter le stock de carbone au niveau des peuplements forestiers.

Les **projets de boisement ou de reboisement** constituent le moyen d'action le plus efficace. On distingue dans ce cas les projets sans extraction de bois à des fins commerciales des projets où les produits issus de la forêt sont valorisés et constituent l'argument économique majeur. Le boisement correspond à l'établissement de forêts sur des terres qui précédemment n'étaient pas classées comme forêts (il y a passage de l'état de non-forêt à celui de forêt) alors que le reboisement concerne les plantations forestières sur des terres temporairement déboisées considérées comme forêts (FAO, 2001).

La principale motivation des premiers projets sans extraction de bois a d'abord surtout été l'acquisition d'un savoir-faire dans les techniques de fixation de carbone à grande échelle. Auxiliairement, ce type d'opération orientée sur la sauvegarde environnementale peut également servir de vecteur de communication pour certains industriels. La capacité de stockage de tels projets peut être assimilée à la capacité maximale de carbone contenue dans le peuplement forestier ainsi constitué (biomasse, litière, sol) puisque aucun produit n'en est extrait. Le projet « Puits de carbone – Peugeot » dans le nord du Mato Grosso financé par le constructeur automobile français Peugeot comme contribution à sa politique de protection de l'environnement est une bonne illustration de ce type d'opération.

Le projet « Puits de carbone – Peugeot »

Le projet vise à fixer du carbone dans une plantation d'espèces indigènes établie sur une terre dégradée. La plantation couvre environ 5 000 ha, sur un domaine privé de 15 000 ha. Seule la plantation sert de puits à carbone, mais on s'efforce aussi de conserver la forêt naturelle même si elle n'entre pas en jeu dans le bilan du carbone. Il est géré par ONF Brésil, une succursale de l'Office national des forêts de France et par l'Instituto Pro Natura, une ONG brésilienne. La durée du projet est de 40 ans. La contribution de Peugeot se monte à 10 millions d'Euros et l'objectif du projet est de maximiser la fixation de carbone, tout en utilisant des essences locales et en préservant ou en renforçant la diversité biologique dans la zone. Le projet est un premier pas vers le rétablissement de la forêt naturelle, grâce à la remise en état des pâturages et à l'élimination des espèces herbacées exotiques. Au cours de son communiqué de presse en octobre 1998, Peugeot a annoncé qu'il n'utiliserait pas les crédits de carbone qui pourraient être éventuellement issus de ce programme. Son intention première était de prouver la faisabilité d'un tel projet et de bénéficier des enseignements qui en découleraient.

Sources : C. Mégevand, 2001 et FAO, 2001

Le second type de projet de reboisement correspond aux plantations avec exploitation des produits ligneux. Il peut s'agir de plantations industrielles de grande échelle mais aussi, à moindre échelle, de plantations villageoises.

Dans ce cas, la contribution à la lutte contre le changement climatique ne peut être considérée égale à la capacité maximale de stockage de carbone sur la parcelle. Il est

alors plus pertinent de considérer un stock moyen sur la parcelle qui rend compte du cycle de production du peuplement. Un autre compartiment de stockage de carbone correspondant aux produits issus de la plantation doit également être considéré. Ce stockage peut avoir une durée de vie très variable en fonction des usages qui sont faits du bois* : pâte à papier, bois de charpente, caissage... Il est nécessaire de considérer le devenir des produits issus de ces plantations pour rendre compte de l'efficacité globale de séquestration du carbone des plantations exploitées. Dans certains cas, les produits des plantations servent de substituts aux énergies fossiles (bois de chauffe) ou à des matériaux dont la fabrication implique de fortes émissions de CO₂ (ciment, aluminium). Les plantations ont alors un double bénéfice en terme de lutte contre le changement climatique.

Une des principales critiques adressées aux plantations industrielles et également parfois à d'autres programmes réalisés à des fins de fixation du carbone est d'opérer avec une seule essence, souvent exogène, sur de grands espaces et de menacer la biodiversité et l'équilibre du milieu**. Certaines ONG, comme le WWF ou Greenpeace, ont même dénoncé des programmes de plantations qui se seraient faits aux dépens de forêts naturelles.

Les pratiques d'agroforesterie sur des terres agricoles peuvent être assimilées à une forme spécifique de boisement ou de reboisement. Selon la définition de Baumer (1987), l'agroforesterie est un terme collectif pour des systèmes et des techniques d'utilisation des terres où des ligneux pérennes (arbres, arbustes, arbrisseaux et sous-arbrisseaux, et par assimilation palmiers et bambous) sont cultivés ou maintenus délibérément sur des terrains utilisés par ailleurs pour la culture et/ou l'élevage, dans un arrangement spatial ou temporel, et où sont exploitées des interactions à la fois écologiques et économiques, pas forcément stables dans le temps, entre les ligneux et les autres composantes du système. Le développement local est un élément central de ce type de projet comme le montre l'exemple de Te Au Chiapas au Mexique.

Projet de foresterie communautaire de Scolel Te au Chiapas, Mexique

Le projet a été lancé par l'université d'Édimbourg et le Centre d'Édimbourg pour la gestion du carbone (Royaume-Uni) et par El Colegio de la Frontera Sur (Mexique), et financé par le Département pour le développement international du Royaume-Uni. Son objectif est d'élaborer des systèmes de planification de modèles et d'administration pour permettre aux paysans d'accéder aux marchés du carbone. Dans le cadre du projet, des petits paysans et des communautés locales identifient des activités de reboisement, d'agroforesterie et de remise en état des forêts susceptibles de rapporter sur le plan financier et de fixer ou de conserver le carbone. Les activités proposées sont insérées dans un système de planification et d'évaluation, et les compensations du carbone sont vendues par l'intermédiaire d'un fonds fiduciaire géré par une ONG locale, Ambio. Les systèmes sont maintenant au point et du carbone a été vendu à divers acheteurs, dont la Fédération automobile internationale. Actuellement, environ 300 agriculteurs, exploitant en moyenne 1 ha de forêt chacun, participent au projet. Le potentiel de fixation moyen est de 26 tonnes par hectare pour un coût de 12 dollars EU par tonne.

Source : FAO, 2001

Outre les grands projets de boisement ou de reboisement, les **modalités d'exploitation des forêts existantes** peuvent avoir un rôle dans l'augmentation sinon dans le maintien des stocks de carbone. Les techniques d'enrichissement et

* Durées de vie estimées de divers produits ligneux : ameublement : 10 ans ; bardage, agencement, cloison : 20 ans ; charpente traditionnelle : 50 ans (Karsenty, 2000).

** À noter que ce problème d'extention des plantations monospécifiques préexistait à l'intégration de l'argument carbone dans l'économie des plantations. La diminution prévue de la ressource disponible dans les forêts naturelles (dégradation, conversion ou mise en réserve) et la demande croissante en produits ligneux ont été à l'origine du développement de ce type de plantations dans le monde.

l'amélioration des performances des arbres et produits dérivés sont deux exemples de ces pratiques sylvicoles.

Techniques d'enrichissement

Il est possible d'enrichir un écosystème naturel avec des essences sélectionnées en intégrant des plants dans des forêts existantes. Cette technique permet de contrôler en partie la composition de la forêt et d'orienter les objectifs de production. L'enrichissement peut se faire avec des essences indigènes ou des espèces nouvelles, voire génétiquement modifiées. Dans plusieurs pays des régions tempérées et boréales, les forêts d'essences naturelles se régénèrent naturellement mais on a souvent recours à des plantations d'enrichissement. Il est ainsi parfois devenu difficile d'opérer une distinction entre forêts naturelles et plantations. La pratique de l'enrichissement forestier peut être positivement influencée par la prise en compte de l'argument carbone. En effet, le gain carbone d'une telle opération est facilement quantifiable et peut être rémunéré dès les premières années (C. Mégevand, 2001).

Amélioration des performances des arbres et des produits ligneux

De larges gains de productivité sont encore possibles dans les plantations forestières grâce aux améliorations génétiques de toutes sortes. Les progrès accomplis en matière de biotechnologie sont aujourd'hui largement appliqués au secteur forestier. Ils portent sur les taux de rendement des plantations industrielles, par exemple en réduisant les risques biologiques qui menacent les plantations. Mais ils permettent aussi d'agir sur la qualité des bois : l'amélioration du rapport fibres valorisables et non valorisables en est une illustration. Ainsi, l'impact en terme de fixation de carbone se porte à la fois sur la parcelle et sur les produits ligneux issus de l'exploitation.

Biotechnologies modernes et foresterie

Les biotechnologies modernes appliquées aujourd'hui à la foresterie se classent en trois grandes catégories:

Les biotechnologies qui font appel aux marqueurs moléculaires peuvent notamment servir à : i) quantifier la diversité génétique entre populations et entre arbres ; ii) identifier des génotypes par des études taxonomiques, biologiques et par la détermination de l'empreinte génétique ; et iii) localiser les gènes qui codent pour des caractères quantitatifs ayant une importance économique.

Les technologies qui stimulent la multiplication végétative et favorisent la production à grande échelle de matériaux homogènes. La culture de tissus végétaux en laboratoire peut aussi être utilisée pour sélectionner des caractères tels que la résistance aux maladies et la tolérance aux herbicides, aux métaux, aux sels et aux basses températures. La micropropagation est déjà employée pour les espèces cultivées, y compris en horticulture, et l'on dispose de techniques permettant de l'appliquer à plusieurs essences forestières. Leur coût élevé obstacle actuellement l'utilisation directe de matériel micropropagé dans les programmes de foresterie.

La modification génétique des essences forestières. Le terme organisme génétiquement modifié (OGM) se réfère généralement aux organismes dans lesquels on a introduit du matériel génétique provenant d'autres organismes.

FAO, 2001

Parmi ces pratiques de meilleure gestion forestière, se trouvent les techniques d'exploitation forestières à impacts réduits (EIR). Cette méthode, qui consiste à limiter les dégâts occasionnés sur les stocks restants par les différentes opérations forestières, combine des bénéfices écologiques et des avantages économiques (moindres pertes à la récolte, réduction de temps de retour sur la parcelle). Cependant, plus qu'un objectif de fixation de carbone, ces pratiques correspondent davantage à une optique de conservation des stocks de carbone comme nous l'avons vu précédemment (deuxième partie, § 1.1.).

Comment toutes ces activités de fixation du carbone sont-elles considérées par les politiques ? Il est important d'avoir une bonne connaissance des accords internationaux pour appréhender précisément le cadre des projets de séquestration de carbone dans la biomasse qui peuvent être mis en œuvre. D'une façon générale, les projets réalisés dans le domaine forestier dans la lutte contre le réchauffement climatique vont au-delà d'un objectif de séquestration du carbone au sens strict du terme et concernent également la substitution et la conservation. Sans être complètement exhaustif, nous revenons sur les principales étapes qui ont marqué les processus politiques depuis leur initiation.

- **Écosystèmes forestiers et accords internationaux**

C'est au cours des années 70 qu'il a été pour la première fois proposé de recourir à la foresterie pour atténuer les changements climatiques (Dyson, 1977). Cependant, il a fallu attendre la fin des années 90 pour que des négociations internationales examinent cette possibilité à l'échelle de la planète, demandent que soit défini et évalué le rôle des forêts et proposent un mécanisme pour la collaboration internationale.

La **Convention climat** (1992) considère la fixation de carbone dans les écosystèmes forestiers comme un moyen éligible pour réaliser son objectif de lutte contre le changement climatique. Le rôle des écosystèmes en terme de puits, source et réservoir de gaz à effet de serre y est mentionné. Les engagements des Parties à la Convention comprennent l'inclusion des puits dans les inventaires nationaux et dans les programmes d'action. Les activités relevant de la fixation du carbone sont regroupées sous la dénomination LULUCF (Land-use, land-use change and forestry).

Un « précurseur » des mécanismes de flexibilité, qui verront le jour un peu plus tard sous leur forme actuelle, est mentionné dans l'article 4, § 2 de la Convention : il s'agit de la Mise en Oeuvre Conjointe (MOC).

C'est la première Conférence des Parties (CoP1) de Berlin (1995) qui donnera une légitimité aux projets de fixation de carbone dans le cadre du MOC. Il y est en effet décidé la mise en place d'une phase pilote désignée sous le terme « **Phase pilote de mise en oeuvre conjointe** » (AIJ en anglais). L'objectif était d'acquérir une expérience des instruments de flexibilité encore embryonnaires. Cette phase pilote a plus tard donné naissance aux deux mécanismes d'activité conjointe et de développement propre (fig. 51).

Elle devait « apporter des bénéfices environnementaux réels, mesurables, et à long terme, concernant la réduction du changement climatique, qui n'auraient pas eu lieu en l'absence de telles activités ». À l'heure actuelle, environ 200 projets ont été mis en œuvre dans ce cadre pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, dont quelques dizaines de projets forestiers. Nous y reviendrons dans la suite.

* Dans la pratique, on constate que le terme de « fixation » est souvent utilisé dans son large et comprend également les processus qui permettent d'éviter les émissions de CO₂ (conservation et substitution). Nous lui préférons le terme « séquestration » lorsqu'il s'agit effectivement du sens strict (stockage de carbone supplémentaire).

1995 : Berlin CoP1

Mise en Œuvre Conjointe : MOC
(AJJ en anglais)
Phase pilote

1997 : Kyoto CoP3 et
Protocole de Kyoto

Activité Conjointe
(parfois aussi nommée MOC)
(JI en anglais)

Mécanisme de Développement Propre : MDP
(CDM en anglais)

Fig. 51 - Relations entre phase pilote de « Mise en œuvre conjointe » et mécanismes de flexibilité de Kyoto.

Les projets de la phase pilote ne se sont pas cantonnés aux pays de l'Annexe I contrairement au mécanisme d'Activité Conjointe. Comme ce mécanisme est parfois également intitulé MOC, cela peut être la source de confusions. Cette confusion n'existe pas en anglais (en orange : pays de l'annexe I, en jaune : pays de l'annexe I et non-annexe I).

Le protocole de Kyoto

Le protocole de Kyoto valide en 1997 la prise en compte des activités de fixation de carbone dans les écosystèmes terrestres comme un moyen éligible de lutte contre le changement climatique. Ces activités sont explicitement mentionnées dans les articles 3 et 6 du protocole. En revanche, l'article 12 ne les explicite pas.

Article 3 (activités domestiques)

Cet article définit les secteurs d'activités à inclure dans l'inventaire national des flux annuels de carbone des pays de l'annexe I. Les flux de carbone liés aux activités anthropiques dans le secteur forestier doivent être comptabilisés pour établir le niveau global d'émissions de l'année de référence (1990) et le comparer à celui de la période d'engagement. Le paragraphe 3 de l'article 3 désigne **exclusivement les activités de boisement, reboisement et déboisement.**

Le paragraphe 4 de ce même article renvoie aux activités humaines supplémentaires dans le domaine de la foresterie (hors boisement, reboisement et déboisement) et de l'utilisation des terres. La nature des activités éligibles au titre de cet article n'est pas encore définie dans le protocole.

Article 6 (activités conjointes, pays de l'annexe I)

L'article 6 développe la possibilité offerte aux pays de l'annexe I de réaliser des projets présentant un intérêt carbone dans d'autres pays de l'annexe I (« projets visant à réduire les émissions anthropiques par les sources ou à renforcer les absorptions par les puits de gaz à effet de serre dans tout secteur de l'économie ») et de bénéficier des unités de réduction d'émissions générées par ces projets.

Article 12 (mécanisme de développement propre, pays de l'annexe I et pays non annexe I)

Parmi les critères d'éligibilité des projets, l'article 12 indique : « avantages réels, mesurables et durables liés à l'atténuation des changements climatiques ». Cette mention donne naissance au **critère d'additionnalité** qui compte parmi les plus importants pour la validité des projets relevant du mécanisme de développement

propre (MDP). En revanche, il n'est fait aucune mention spécifique aux activités de fixation du carbone dans cet article.

Ce manque de clarté autour des critères d'éligibilité des projets pouvant être mis en œuvre dans le cadre du mécanisme de développement propre a alimenté des débats houleux entre les Parties, notamment sur les questions relatives aux rôles des écosystèmes dans la fixation du carbone ou à l'énergie nucléaire.

Cependant, le protocole a permis de trancher sur une question controversée : **la conservation des massifs forestiers dans les pays en développement ne sera pas reconnue comme une activité éligible.**

L'exclusion des activités de conservation résulte d'une volonté de réduire le poids des « activités LULUCF » dans le champ des activités liées à l'application du Protocole de Kyoto, mais découle également des doutes sur la possibilité d'établir des scénarios de référence suffisamment robustes pour quantifier les réductions d'émissions entraînées par la réalisation de projets de conservation, ainsi que les risques de pertes associées à la préservation d'un massif donné (leakage). Le critère d'additionnalité invalide donc les projets de conservation.

Additionnalité et scénario de base

Alors que les émissions et l'absorption nationales de carbone sont mesurées en valeur absolue à l'intérieur des frontières nationales, les effets des projets forestiers sont évalués par rapport à un scénario théorique « sans le projet » ou « scénario de base ». La définition du scénario de base d'un projet peut être dérivée de plusieurs manières, notamment en extrapolant les tendances antérieures en matière de changement d'affectation des terres, les effets attendus des pratiques sylvicoles standard actuelles, ou en construisant un modèle des pressions sociales et économiques sur les ressources forestières. Il reste à arrêter des méthodes standards. Lorsqu'un projet et un scénario de base sont comparés, des tests dits « d'additionnalité » peuvent être effectués pour vérifier si la fixation du carbone est attribuable au projet ou simplement à des facteurs accessoires, tels que réorientations des politiques ou modifications des conditions socioéconomiques, qui n'entrent pas dans le champ d'application du projet.

Limites et pertes du projet (leakage)

La fixation des limites d'un projet a un effet important sur la réduction des émissions attribuée aux activités du projet. Si un projet se propose de protéger une étendue de forêt spécifique mais oblige à défricher une autre zone de forêt, il est possible qu'une partie des avantages du projet soit « perdue ». De même, si un projet de boisement conduit à une baisse des produits du bois, suivie d'une réduction de l'investissement dans les plantations commerciales ou d'une augmentation du défrichage des forêts pour répondre aux besoins alimentaires de subsistance, la fixation nette de carbone sera diminuée. Il est également nécessaire de définir les limites du projet pour inclure la totalité des flux ou des stocks de carbone susceptibles d'être sensiblement affectés par les activités du projet, notamment le carbone stocké dans le bois coupé.

FAO, 2001

Les décisions de la 6^e Conférence des Parties à Bonn (Cop 6-bis)

Après l'échec de la COP6 à la Haye en novembre 2000, la COP6-bis de Bonn en juillet 2001 a permis d'éclaircir certains points restés flous dans le protocole de Kyoto. Dans le cadre de l'accord obtenu entre les 178 parties, les activités de fixation du carbone sont clairement désignées comme des moyens éligibles pour remplir les engagements. Nous relatons l'essentiel des accords intervenus pour ce qui concerne les trois articles 3, 6 et 12 du protocole de Kyoto.

Article 3 (activités domestiques)

Article 3, § 3 : Les parties conviennent d'adopter une définition du terme « forêt » et des définitions des activités de « boisement », « reboisement » et « déboisement » aux fins de l'application du paragraphe 3 de l'article 3.

Forêts, boisement, reboisement, déboisement, restauration : les définitions retenues pour les activités domestiques

On entend par « forêt » une terre d'une superficie comprise entre 0,05 et 1,0 hectare, dont le houppier (ou peuplement équivalent) couvre plus de 10 à 30 % de la surface et dont les arbres peuvent atteindre une hauteur abattable minimale de 2-5 mètres, conformément au paragraphe 2 ci-après. Une forêt peut être constituée soit de formations denses dont les divers étages et le sous-bois couvrent une forte proportion du sol, soit de formations claires. Les jeunes peuplements naturels et toutes les plantations dont le houppier ne couvre pas encore 10-30 % de la superficie ou dont les arbres n'atteignent pas encore une hauteur de 2-5 mètres sont classés dans la catégorie des forêts, de même que les espaces faisant normalement partie des terres forestières qui sont temporairement déboisés par suite d'une intervention humaine telle que l'abattage, ou de phénomènes naturels mais qui devraient redevenir des forêts.

On entend par « boisement » la conversion anthropique directe en terres forestières de terres qui n'avaient pas porté de forêts pendant au moins 50 ans par plantation, ensemencement et/ou promotion par l'homme d'un ensemencement naturel.

On entend par « reboisement » la conversion anthropique directe des terres non forestières en terres forestières par plantation, ensemencement et/ou promotion par l'homme d'un ensemencement naturel sur des terrains qui avaient précédemment porté des forêts mais qui ont été convertis en terres non forestières. Pour la première période d'engagement, les activités de reboisement seront limitées au seul reboisement des terres qui ne portaient pas de forêts à la date du 31 décembre 1989.

On entend par « déboisement » la conversion anthropique directe de terres forestières en terres non forestières.

On entend par « restauration du couvert végétal » les activités humaines directes commencées le 1^{er} janvier 1990 ou après cette date, visant à accroître les stocks de carbone par la plantation d'une végétation couvrant une superficie minimale de 0,05 hectare et ne répondant pas aux définitions du boisement et du reboisement qui précèdent.

Extrait du document FCCC/CP/2001/Add.3/Rev.1, 19 juin 2001

La définition retenue exclut, par exemple, les activités de reboisement au sein des forêts naturelles dégradées, qui seraient assimilées à une restauration du couvert végétal.

Article 3, § 4 : Les activités humaines additionnelles sont spécifiées pour les pays de l'annexe I qui peuvent utiliser toute une gamme d'activités : gestion forestière, gestion des terres de grande culture, gestion des terres de pâturage et de régénération végétale.

Article 6 (activités conjointes, pays de l'annexe I)

Dans le texte relatant les termes de l'accord intervenu, il n'est pas fait explicitement mention des activités éligibles au titre de l'article 6. Il est seulement inscrit que les Parties de l'annexe I « doivent s'abstenir d'utiliser des unités de réduction des émissions générées par des installations nucléaires pour remplir leurs engagements ». Un plafond de crédits pouvant être issus d'activités anthropiques additionnelles liées aux articles 3 et 6 est déterminé par une grille pour chacun des pays de l'annexe I (annexe Z du document de l'UNFCCC du 24 juillet 2001).

Article 12 (mécanisme de développement propre, pays de l'annexe I et pays non annexe I)

En ce qui concerne le MDP, seules les actions de boisement et de reboisement sont éligibles, basées sur des modifications survenues dans l'utilisation des terres. Les

activités de substitution d'énergies fossiles par de la biomasse, activités dont l'éligibilité ne faisait pas de problème, concernent également la foresterie.

Cette inclusion partielle des puits de carbone est valable pour la première période d'engagement. Les négociations sur la deuxième période d'engagement (2013-2017) statueront sur les activités LULUCF éligibles au MDP pour cette deuxième période.

Il est posé toutefois une limite aux quantités de « crédits » susceptibles d'être obtenus par les activités de boisement/reboisement dans le MDP. La majoration de la quantité d'émission de gaz à effet de serre attribuée à une Partie au titre de l'article 12 ne peut dépasser 1 % des émissions de l'année de référence de cette Partie, multipliée par cinq, au cours de la première période d'engagement.

Outre l'important volet sur le MDP qui intéresse principalement les forêts des pays en développement, la CoP6bis a demandé des **ressources nouvelles pour le Fonds pour l'Environnement Mondial (FEM)**, par le biais de différents mécanismes financiers. Le Climate Change Focal Area, qui constitue le pôle d'activités existant du FEM concernant les changements climatiques devrait voir ses moyens accrus (FAO, 2002).

Le Fonds pour l'environnement mondial (FEM)

Le FEM a été créé à l'initiative des gouvernements français et allemand en 1990, dans l'optique d'inciter les pays en développement et en transition à prendre des mesures ayant un impact positif en termes d'environnement mondial. Les quatre grands domaines visés par le Fonds sont : la biodiversité, le climat, les eaux internationales et la couche d'ozone.

En 1992, le compromis obtenu à Rio a officiellement entériné le principe selon lequel les pays les plus riches doivent aider les pays en développement et en transition à satisfaire aux objectifs des Conventions Biodiversité et Climat, à travers des ressources additionnelles à leur aide publique au développement. Le FEM y a été désigné comme l'instrument financier de la Convention sur la diversité biologique et de la Convention-cadre sur les changements climatiques (respectivement, articles 39 et 21).

Le Secrétariat du FEM, basé à Washington, est géré par la Banque mondiale sous la supervision des 32 membres du Conseil du FEM (représentant 14 pays de l'OCDE, 16 pays en développement et deux pays de l'Europe centrale et orientale). Instance de décision et d'orientation du FEM, le Conseil veille notamment à la mise en œuvre des recommandations formulées par les Conférences des Parties aux deux conventions.

Après sélection des projets par le Conseil (sur avis du Groupe consultatif pour la science et la technologie), les activités opérationnelles sont mises en œuvre par l'une des trois agences :

- la Banque mondiale pour les projets d'investissement ;
- le PNUD (Programme des Nations Unies pour le développement) pour les projets d'assistance technique et d'appui institutionnel ;
- le PNUE (Programme des Nations Unies pour l'environnement) pour les projets de renforcement de capacité, de recherche et de sensibilisation.

Le Fonds français pour l'environnement mondial (FFEM)

Depuis 1994, le FFEM vient compléter l'action du FEM. Comme lui, il a pour objectif de financer les coûts additionnels liés à la protection de l'environnement mondial dans les stratégies de développement. Néanmoins c'est un fonds bilatéral alimenté par l'État français, en sus de l'aide publique au développement et des contributions de la France au FEM. Le Secrétariat du FFEM est géré par l'Agence Française de Développement (AFD) à Paris.

Repris d'après FAO, 2002

Par ailleurs, trois nouveaux fonds, qui restent à constituer et à financer, ont été annoncés à Bonn :

- le *Fonds spécial pour les changements climatiques* : ce fonds, alimenté par des contributions volontaires des Parties doit financer des activités dans le domaine de l'adaptation, du transfert de technologies, de l'énergie, des transports, de l'industrie, de l'agriculture, de la foresterie, de la gestion des déchets, ainsi que des actions

visant à diversifier les économies des pays en développement fortement dépendants à l'égard des combustibles fossiles ;

- le *Fonds pour l'adaptation relevant du Protocole de Kyoto* : financé par un prélèvement de 2 % (part des fonds) sur les activités de projets MDP, il devrait financer le renforcement des capacités pour l'adaptation au changement climatique et des mesures de conservation des forêts tropicales, de réhabilitation des terres dégradées, de lutte contre la désertification. Les pays de l'Annexe I sont invités à fournir des ressources complémentaires ;
- le *Fonds pour les pays les moins avancés* qui doit financer un programme de travail spécifique en direction de ces pays (PMA) qui devrait comprendre les programmes d'action nationaux aux fins de l'adaptation. Les ressources du FEM seront mises à contribution pour abonder ce fonds.

Reste que la COP6BIS n'a pu parvenir à un accord sur d'éventuelles pénalités financières pour les pays de l'Annexe I qui dépasseraient leurs quotas d'émissions au cours d'une période d'engagement. Or, ces pénalités financières auraient dû être affectées aux financements de l'un ou de l'autre de ces différents fonds. Le montant de ces fonds dépendra donc largement de la volonté des pays industrialisés.

Les précisions de la 7^e Conférence des Parties de Marrakech

La 7^e CdP réunie à Marrakech en novembre 2001, a précisé plusieurs points relatifs au MDP et à la fixation du carbone par les puits et notamment :

- la constitution d'un comité exécutif du MDP qui aura mandat d'approuver les méthodologies proposées par les organes subsidiaires (organe subsidiaire de mise en oeuvre (SBI) et SBSTA) pour les scénarios de référence, l'évaluation et la définition des limites des projets et l'accréditation des entités opérationnelles ;
- la possibilité d'activités « unilatérales » dans le cadre du MDP.

En effet, le MDP a été implicitement conçu dans l'optique d'une architecture « bilatérale », c'est-à-dire en adoptant pour référence la figure d'un investisseur issu d'un pays de l'annexe I à la recherche de crédits carbone, et un partenaire, public ou privé, issu d'un pays en développement (non ann. I) pour développer les activités. L'architecture « unilatérale », concerne les investisseurs établis dans le pays en développement qui entreprendraient l'activité eux-mêmes et bénéficieraient des « Certificats de Réductions d'Émissions » (CRE sur lequel repose le MDP, voir première partie, § 2.1.) qui seraient ensuite vendus sur le « marché du carbone » devant se mettre en place avec l'entrée en vigueur des mécanismes de flexibilité*.

Un point très attendu de la 7^e CoP concernait la prise en compte du stockage du carbone dans les produits bois**. Mais la Conférence des Parties souhaite s'appuyer sur des études plus approfondies sur ce point en vue d'une décision en 2004. Le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat a été mandaté pour préparer de nouvelles lignes directrices pour l'estimation des émissions et absorptions de gaz à effet de serre associés à l'utilisation des terres, aux changements

* Dans un premier temps, les pays de l'Annexe I s'étaient montrés défavorables à cette option, arguant que certains pays risquaient de mener une politique négative du point de vue de la lutte contre l'effet de serre tout en obtenant des CRE.

** À l'heure actuelle, les règles comptables retenues considèrent que le carbone est émis dans l'atmosphère dès que le bois sort de la forêt, ce qui est simplificateur.

d'affectation des terres et à la foresterie. Ces guides permettront de compléter le rapport spécial du GIEC de l'année 2000 consacré à cette question.

**Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie :
le rapport spécial du GIEC (2000)**

Élaboré par le GIEC à la demande de l'Organe subsidiaire de conseil scientifique et technologique (SBSTA) de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), le rapport fait le point sur les connaissances scientifiques et techniques dans le domaine des stratégies de piégeage du carbone applicables aux activités menées dans le secteur de l'utilisation des terres, du changement d'affectation des terres et de la foresterie. Le cycle global du carbone y est traité ainsi que les incidences actuelles des différentes activités conduites dans le secteur de l'utilisation des terres et de la foresterie sur les stocks de carbone et les émissions des gaz à effet de serre. On y étudie aussi quelles seront les émissions fixées et émises de carbone compte tenu de différents scénarios de définitions et de différentes stratégies de comptabilisation du carbone, en rapport avec le Protocole de Kyoto, dans le secteur de la foresterie et de l'utilisation des terres.

Cette publication est donc le document de référence incontournable pour tous les aspects techniques reliant la foresterie et le changement climatique. La version complète n'existe qu'en anglais (Land Use, Land-Use Change and Forestry) et n'est pas accessible sur Internet. Par contre, un « résumé à l'intention des décideurs » de ce document existe en version française sur le site Internet du GIEC.

Le document principal se divise en six chapitres : (1) Perspective globale, (2) Implications des différentes définitions et de sujets génériques, (3) Activités de boisement, reboisement et déboisement, (4) Activités humaines additionnelles - article 3.4 (du Protocole de Kyoto), (5) Activités basées sur des projets, (6) Implications du Protocole de Kyoto pour les lignes directrices de l'inventaire.

Les différentes actions possibles pour atténuer le changement climatique sont largement développées, notamment dans le chapitre 4 qui comporte des notes d'information. Par ailleurs, la mise en œuvre pratique de projets MDP dans les pays en développement y est discutée (chap. 5).

Conclusion

Les Conférences des parties de Bonn et de Marrakech auront donc permis d'apporter d'importantes précisions sur les instruments pouvant être mis en place dans le secteur du changement d'utilisation des terres. Les possibilités des différents groupes de pays (ann. I et non ann. I) sont mieux définies.

Les points essentiels concernent d'une part, les activités domestiques et d'autre part, le mécanisme de développement propre, instrument central dans les actions de fixation du carbone des écosystèmes terrestre :

Seuls les pays de l'annexe I pourront, dans le cadre des activités domestiques, utiliser toute une gamme d'actions (art. 3, § 4) : gestion forestière, gestion des terres de grande culture, gestion des terres de pâturage et de régénération végétale. Par ailleurs, les définitions retenues pour les termes forêts, boisement, reboisement, déboisement et restauration sont valables uniquement pour les activités domestiques (non pour le mécanisme de développement propre).

Enfin, si le protocole de Kyoto avait tranché sur l'exclusion des activités de conservation dans les projets relevant du mécanisme de développement propre, il est maintenant arrêté que le MDP ne peut s'appliquer qu'aux seules activités de boisement et de reboisement.

Le Mécanisme de Développement Propre est un instrument qui n'est pas encore mis en œuvre. Les négociations internationales en cours ont pour objet de définir et de préciser les institutions spécifiques et les règles de son application.

Cette mise en œuvre reste ainsi suspendue à la résolution de certains points techniques comme les pertes ou fuites associées (leakage), l'additionnalité qui fonde la quantité de crédits attribués à un projet ou la non-permanence potentielle des puits. Cette dernière est un point important car elle fonde la valeur des crédits attribués à un projet forestier. Elle découle du facteur temps associé à la croissance d'une forêt et de la réversibilité potentielle des gains de carbone dérivant des activités forestières. Le problème de non-permanence ouvre le débat sur les crédits qui peuvent être accordés (« crédits permanents ou définitifs », « crédits temporaires »).

Ces questions techniques concernant l'inclusion des projets forestiers dans le MDP devraient être réglées pour la 8^e Conférence des Parties prévue fin 2002, après un processus de consultation des organes subsidiaires (SBI et SBSTA).

Cependant, c'est une véritable dynamique qui s'est mise en place autour de cet instrument. Les perspectives de la Convention Climat ont entraîné un flot d'investissements publics ou privés, effectués par différents organismes, entreprises ou fondations, dans des buts variés : communication commerciale ou institutionnelle, apprentissage en vue du MDP, mécénat, actions militantes. Beaucoup de ces projets ont été initiés au cours de la « phase pilote de mise en œuvre conjointe » (AIJ) de 1995. Ces projets ne concernent pas seulement des activités de séquestration sensus stricto mais aussi de conservation ou de substitution. Certains combinent plusieurs de ces activités.

- **Projets réalisés ou en cours : état des lieux**

Les projets d'utilisation des terres (LULUCF) visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre, et en particulier les projets forestiers, représentent aujourd'hui une quarantaine de projets. Parmi ces projets, 18 sont officiellement reconnus comme projets AIJ et donc inscrits au secrétariat de la Convention Climat^{*}.

Les autres n'ont pas été retenus car certains ont été entrepris avant 1995, date officielle d'initiation de la phase pilote AIJ ; certains sont des projets domestiques internes à un pays particulier, certains sont encadrés par des organismes en dehors des structures de la phase pilote (les projets encadrés par le FEM, par exemple), d'autres enfin n'ont pas reçu l'accord du pays hôte pour l'implantation du projet. Il convient de noter que parmi tous ces projets trente environ sont en cours à l'heure actuelle, dont neuf projets AIJ et une vingtaine de projets non AIJ (FAO, 2002).

Le tableau 13 résume les caractéristiques d'un ensemble représentatif de projets LULUCF, qui sont en cours d'exécution et couvrent environ 3,5 millions d'hectares (GIEC, 2000a).

^{*} Au chapitre V, nous analysons la portée de ces projets AIJ (LULUCF et autres domaines) en termes de CO₂ évité ou séquestré.

	Type de projet	Nombre de projets	Surface (millions d'ha)	Carbone stocké (millions de tonnes)	Carbone stocké (tonnes/ha)	Coûts (\$EU/tonne de carbone)
Fixation	Boisement/ reboisement	8	0,18	21,7	26-328	1-28
	Agroforesterie	2	0,20	10,8	56-165	0,2-10
Conservation	Protection	7	2,90	40-108	4-252	0,1-15
	Aménagement	4	0,33	5,7	0,2-85	0,3-8

Tabl. 13 - Comparaison de certains projets LULUCF (source : FAO, 2001 repris de GIEC, 2000a)

Les **projets de conservation** en cours représentent à eux seuls environ **80 %** des surfaces concernées par les projets forestiers de lutte contre les changements climatiques, soit près de 7 Mha s'ils arrivent à terme (GIEC, 2000a). Ces projets sont soit des projets de protection (interdiction totale d'exploitation) soit des projets d'aménagement (production durable). Ils permettraient de conserver à long terme de 40 à 108 tonnes par hectare (aménagement des forêts), et entre 4 et 252 tonnes (protection des forêts) (FAO, 2001). Sur l'ensemble de la durée d'exécution de ces projets, les émissions de carbone évitées sont estimées à **5,7 millions de tonnes** pour l'aménagement des forêts et à **40-108 millions de tonnes** pour la protection des forêts.

Les **projets de séquestration** (accroissement des stocks de carbone) ne représentent que **5 %** environ du total des superficies. 180 000 ha sont gérés pour des activités de boisement/reboisement et correspondant à une séquestration estimée à **21,7 millions de tonnes** de carbone durant le cycle d'exécution des projets. Deux projets, couvrant 200 000 ha, comprennent des activités d'agroforesterie et devraient stocker 10,8 millions de tonnes de carbone supplémentaires.

Il n'y pas eu de **projets de substitution** à proprement parler et les 15 % de superficies restantes concernent les projets « multi-activité », lesquels comprennent des activités de substitution.

• **Potentiel de fixation du carbone**

Le potentiel d'établissement de plantations à vocation de fixation de carbone a été largement étudié par le Groupe II du GIEC qui a ainsi établi un bilan des terrains disponibles pour de tels programmes. Il montre que les possibilités dépendent de nombreux facteurs liés à la nature pédologiques des terrains mais aussi à des contraintes culturelles, sociales et économiques. Ainsi, tous les terrains satisfaisant les conditions techniques de plantation ne sont pas pour autant disponibles : d'autres usages peuvent être considérés prioritaires tels que l'agriculture ou des activités économiques.

Dans les régions tempérées et boréales, les surfaces disponibles pour les programmes de plantation seraient d'environ 215 millions d'hectares. Dans les régions tropicales, les terrains réellement disponibles, soit 130 millions d'hectares estimés ne représentent que 6 % des surfaces techniquement aptes, du fait de contraintes culturelles ou socio-économiques (Nilsson S. et Shopfhauser W., 1995).

Le potentiel de fixation du carbone des activités de boisement ou de reboisement est très variable. Il est fonction de l'espèce, de la station et du type d'aménagement adopté.

Normalement, les taux de fixation, en tonnes de carbone par hectare et par an, du boisement/reboisement sont de 0,8 à 2,4 tonnes dans les forêts boréales, de 0,7 à 7,5 tonnes dans les régions tempérées et de 3,2 à 10 tonnes dans les régions tropicales (Brown *et al.*, 1996).

Le potentiel de fixation des activités agroforestières est encore plus variable, et dépend de la densité de plantation et des objectifs de production du système.

En supposant que les disponibilités mondiales de terre sont de 345 millions d'hectares pour les activités de boisement/reboisement et d'agroforesterie, Brown *et al.*, (1996) estiment qu'environ **38 Gt** de carbone pourraient être fixées au cours des cinquante prochaines années (30,6 Gt grâce à des activités de boisement/reboisement et 7 Gt grâce à l'adoption accrue de pratiques d'agroforesterie) (fig. 52). Pour d'autres auteurs, 40 GtC constituerait une valeur minimum et l'on pourrait stocker jusqu'à 66 Gt de carbone d'ici à 2050, soit près de 1 GtC par an (Nilsson S. et Shopfhauser W., 1995).

Les activités sylvicoles qui accroissent la productivité des écosystèmes forestiers, comme les éclaircies pratiquées en temps voulu, peuvent accroître jusqu'à un certain point la quantité de carbone stockée dans les forêts. Toutefois, par rapport aux activités de boisement/reboisement, les variations des systèmes de sylviculture ont un effet faible sur les stocks totaux de carbone (Dixon *et al.*, 1993).

Cependant, il apparaît que, par-dessus tout, ce sont les actions de conservation des stocks de carbone existants dans les forêts qui constitueraient la stratégie la plus efficace dans la lutte contre le changement climatique (fig. 53).

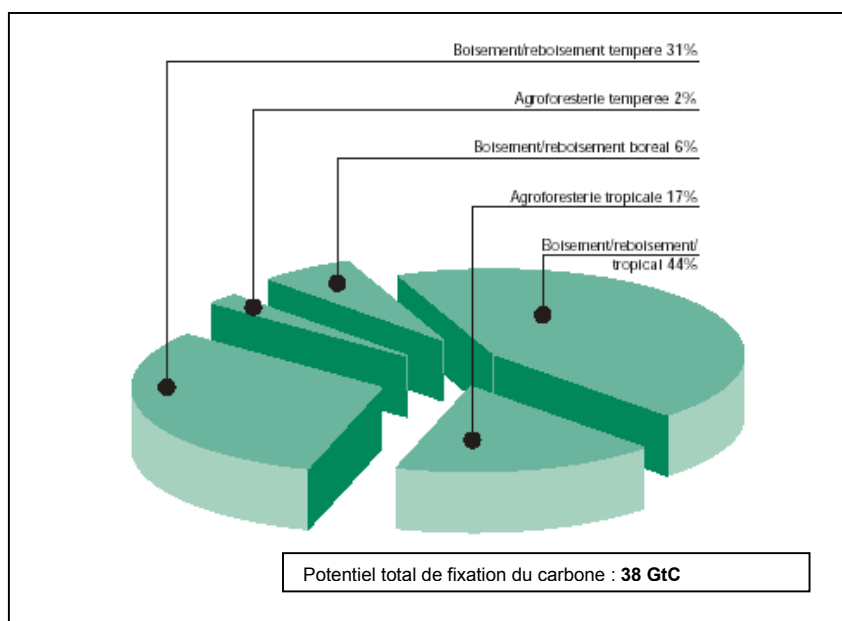


Fig. 52 - Contribution potentielle à la séquestration totale de carbone par les activités de boisement/reboisement et d'agroforesterie, 1995-2050 (FAO, 2001 : données tirées de Brown *et al.*, 1996).

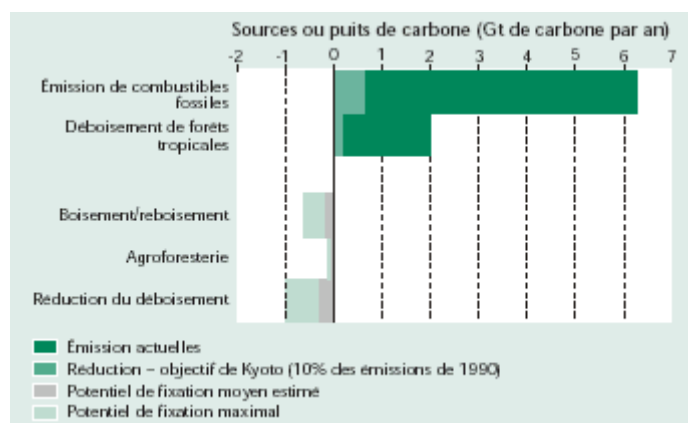


Fig. 53 - Potentiel estimé des sources et des puits de carbone, pour différents modes d'utilisation des terres (FAO, 2001).

b) Actions spécifiques sur les sols

Les sols agricoles peuvent être un puits ou une source de carbone, donc jouer un rôle sur la quantification des émissions de gaz à effet de serre aux niveaux national et mondial. Le plus souvent, les pratiques culturales employées dans les zones tropicales et tempérées portent une atteinte grave à la réserve de carbone contenue dans les sols (voir première partie, § 1.3.).

En marge de ces techniques traditionnelles dommageables, il existe d'autres types de pratiques agricoles qui permettent de limiter la vulnérabilité des sols aux phénomènes d'érosion et de lessivage, lesquels jouent un rôle déterminant dans la perte de fertilité des sols. Ces pratiques dites d'agriculture de conservation consistent à limiter la perturbation des sols lors de leur mise en culture.

• L'agriculture de conservation

Plusieurs pratiques peuvent être mises en œuvre pour diminuer les pertes de carbone dans les sols voir augmenter ce stock lorsque l'atteinte est déjà marquée. On peut citer notamment :

- le maintien d'une couverture permanente des sols, même pendant les intercultures,
- l'enrichissement du sol par apport de résidus organiques,
- la limitation ou la suppression des labours (semis direct).

L'agriculture de conservation s'est largement développée ces quinze dernières années. Le semis direct ou non labour a particulièrement progressé passant de 6 à 47,5 millions d'hectares au niveau mondial dans l'espace d'une décennie (47,5 millions d'hectares : chiffre de 1997). Les États-Unis ont été pionniers de la méthode dès les années 50 et restent aujourd'hui leader mondial dans ce domaine. La mise en œuvre du Farm Bill de 1985 et 1990 témoigne de la volonté de l'administration américaine de développer l'agriculture de conservation. En 1997, dans ce pays, 37 % des 120 millions d'hectares cultivés étaient soumis à différentes pratiques relevant de l'agriculture de conservation. Pour le seul semis direct, 18,5 millions d'hectares étaient cultivés de

cette façon aux États-Unis soit 39 % du total mondial. Les autres pays engagés dans cette voie sont le Brésil (10 Mha), le Canada (16 Mha), l'Argentine (11 Mha), l'Australie (4 Mha). Le reste du monde constitue les 9 % résiduels (Mégevand C., 2001). En Europe, l'agriculture de conservation reste encore très peu développée avec seulement 1 à 2 % des surfaces agricoles totales. La France et l'Espagne seraient les deux pays où ce mode de culture est le plus pratiqué avec, en 1998, environ 1 million d'hectares concernés (Mégevand C., 2001).

Outre les techniques que nous avons citées, la nature des cultures elles-mêmes peut également influencer le taux de carbone dans les sols. Des travaux de recherche sont menés afin de quantifier cette influence encore mal connue.

Inventaire des essais français de longue durée sur le stockage de carbone dans les sols

Une opération, intitulée « Inventaire des essais français de longue durée sur le stockage de carbone dans les sols », est actuellement menée afin de quantifier le rôle des productions non alimentaires (blé, colza, betterave) sur le stockage de carbone dans les sols.

L'ONIDOL (Organisation Nationale Interprofessionnelle Des OLéagineux), l'ITCF (Institut des Céréales et des Fourrages), l'AGPB (Association Générale des Producteurs de Blé), l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), et l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) se sont ainsi associés dans l'objectif de documenter l'influence des modes d'occupation des sols et des pratiques culturales sur le stockage de carbone dans les sols agricoles. L'enjeu est d'utiliser les données acquises sur les sites étudiés pour caractériser les potentiels de stockage de carbone et les techniques pouvant être mises en œuvre pour augmenter ces stocks ainsi que d'identifier les besoins en mesures et sites complémentaires nécessaires pour mieux quantifier ces possibilités de stockage.

L'étude s'appuie essentiellement sur une enquête au niveau national visant à recenser des études au champ d'au moins quatre années, et de constituer une base de données à partir des informations recueillies auprès des personnes responsables de ces essais. Une analyse critique de la situation française, et une comparaison à la situation internationale est prévue dans un second temps.

Source : INRA (<http://www-egc.grignon.inra.fr/StockageC/>)

• **Potentiel de fixation de carbone dans les sols**

Une période de l'ordre du siècle est nécessaire pour que le carbone d'un sol se rapproche de son état d'équilibre, une fois adoptées des pratiques culturales plus « douces ».

Dans l'absolu, on pourrait considérer que les sols sont susceptibles de séquestrer la quantité de carbone équivalente aux pertes qu'ils ont subies depuis leur mise en culture, soit environ 55 GtC. Cependant, dans la pratique, la reconstitution des stocks n'est jamais optimale et un retour à l'état d'origine semble difficile, voire impossible.

La figure 54 illustre le processus de reconstitution du stock de carbone dans les sols cultivés après adoption de techniques de conservation. Elle montre que les processus sont lents et nécessitent un effort sur le long terme.

Une étude menée sur les sols canadiens dans une opération de surveillance intitulée Century, a montré que 75 % du carbone perdu suite à la mise en culture pouvait être à nouveau fixé et durablement stocké (Falloux F., 1998).

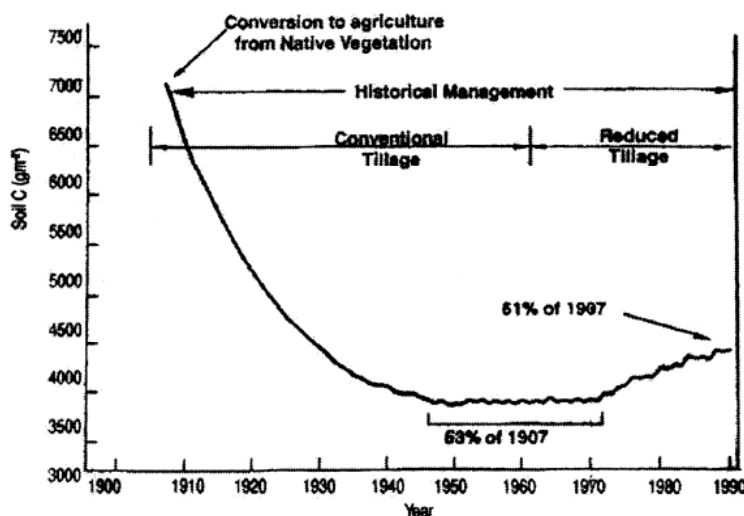


Fig. 54 - Évolution du stock de carbone de sols de la zone céréalière du Middle West américain après passage au moindre labour (Lal et al., 1998).

Selon un rapport du Global Change Strategies International Inc. (GCSI) entièrement consacré au potentiel de séquestration du carbone par les sols, il serait possible, à l'heure actuelle, d'augmenter de 0,45 à 0,61 Gt par an les stocks de carbone dans ce compartiment (GCSI, 1999). De son côté, le GIEC estime à **20 à 30 GtC** le potentiel global de reconstitution du carbone pour l'ensemble des sols cultivés actuellement.

Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?

À la demande du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) vient de réaliser une expertise scientifique collective visant à évaluer l'apport du stockage du carbone dans les sols agricoles français dans un objectif de lutte contre l'effet de serre (INRA, 2002).

Le document, disponible en ligne sur le site de l'INRA (<http://www.inra.fr/actualites/rapport-carbone.html>), relativise l'intérêt de cette option, du moins dans les conditions françaises : si le potentiel de stockage additionnel de carbone dans les sols agricoles métropolitains apparaît non négligeable, sa valorisation dans le cadre du Protocole de Kyoto se révèle difficile. La prise en compte de ce stockage devrait plutôt être envisagée dans un cadre plus large, incluant l'ensemble des gaz à effet de serre et intégré dans un plan global portant sur l'agriculture durable et la qualité des sols.

Source INRA (<http://www.inra.fr/actualites/rapport-carbone/carbone-4p.pdf>)

2.3.2. Stockage de carbone dans la biomasse marine

Cette méthode de séquestration vise, comme la séquestration dans les écosystèmes terrestres, à agir sur le CO₂ déjà présent dans l'atmosphère, c'est pourquoi nous avons choisi de les présenter ensemble. En général, les auteurs préfèrent décrire conjointement toutes les méthodes de séquestration dans l'océan. Cependant, bien que le milieu naturel soit le même, le procédé est ici radicalement différent de l'injection de CO₂ dans l'océan. Il n'est, en effet, pas question d'apporter ponctuellement une grande quantité de CO₂ mais d'agir indirectement en augmentant la production des matériaux biologiques dans les océans afin de diminuer le CO₂ en excès de l'atmosphère. Cela consiste donc à renforcer les capacités de la « pompe biologique » naturelle.

La « pompe biologique » des océans

Le CO₂ dissous dans les eaux de surface est utilisé par le phytoplancton pour produire ses tissus. Celui-ci est rapidement consommé par le zooplancton qui, à son tour, peut être consommé par des animaux plus grands comme les poissons. Bien que l'on estime que 70 à 80 % du carbone fixé est recyclé dans les eaux de surface (Sarmiento, 1993), le reste va être exporté sous forme de particules de carbone organique jusqu'au plancher océanique où il sera lentement minéralisé par des bactéries. En effet, à leur mort, une partie des organismes formés dans les couches superficielles de l'océan vont lentement descendre par gravité dans les couches profondes. Ces débris, en s'accumulant, seront finalement enfouis (fig. 55).

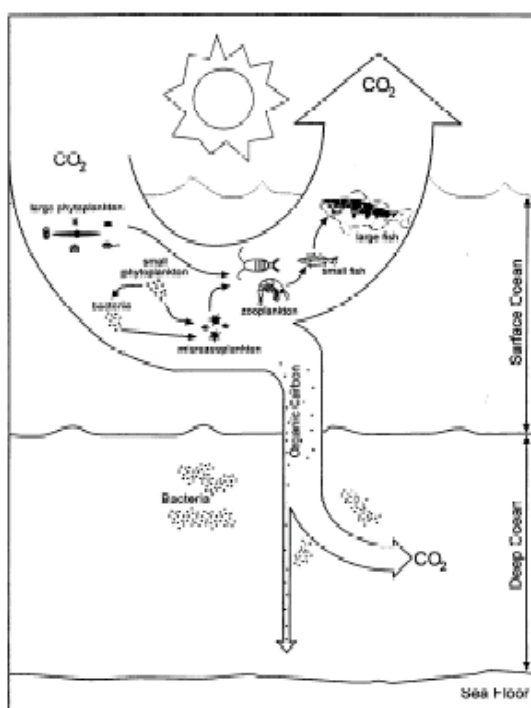


Fig. 55 - La « pompe biologique » des océans (d'après Herzog, 2001b).

La fertilisation des océans par des micro-nutriments, comme le fer, et des macro-nutriments, comme le phosphore et l'azote, pourrait être un moyen d'accélérer cette « pompe biologique » naturelle et d'augmenter ainsi le transfert de CO₂ de l'atmosphère vers l'océan où il serait séquestré.

Cette méthode pourrait également avoir des répercussions économiques puisqu'il semble que l'augmentation de la productivité biologique entraîne un accroissement de la population poissonneuse. Le secteur de la pêche pourrait ainsi bénéficier des retombées de ce procédé, ce qui constituerait une façon de « financer » la séquestration du carbone.

Ayant constaté que certaines zones de l'océan étaient pauvres en phytoplancton et riches en azote et phosphore (zones HNLC - high nitrogen low chlorophyll areas ; zones riches en azote et pauvres en chlorophylle), l'hypothèse a été proposée selon laquelle un manque de fer pouvait limiter la croissance du phytoplancton (Chisholm, 1992). Afin de mieux quantifier ce processus, plusieurs expériences de fertilisation par

apport de fer, intitulées IRONEX, ont été réalisées dans le Pacifique équatorial en 1993 et 1995 (Martin *et al.*, 1994 ; Coale *et al.*, 1996). Les résultats ont montré que l'addition de fer dans une zone océanique de type HNLC provoque l'immédiate disponibilité des macronutriments présents et se traduit par une réduction de la pression partielle du CO₂ à la surface de l'eau. Cette fertilisation par addition du fer n'est cependant réalisable à l'échelle de quelques dizaines de km².

Outre cette première option de fertilisation par le fer, d'autres stratégies de fertilisation océanique ont été proposées qui visent également à doper le développement des organismes marins. On a proposé, par exemple, un apport de macro-nutriments tels que des nitrates et phosphates, et cela sans critère spécifique pour la zone océanique sélectionnée. Une autre stratégie pourrait également voir le jour sur la base d'études plus récentes selon lesquelles il semblerait que l'absence de fer et d'autres micro-nutriments pourrait également réduire la fixation de l'azote et donc l'apport des nitrates dans les zones océaniques de type LNLC (low nitrogen, low chlorophyll areas ; pauvres en azote et chlorophylle) (Falkowski, 1997).

IRONEX : Iron Fertilization Experiments

The equatorial Pacific and Southern Oceans have excess macronutrients, nitrogen and phosphorus, in their surface waters. The late John Martin of Moss Landing Laboratories hypothesized that these nutrients are abundant in these regions because the micronutrient iron is very scarce, thus limiting phytoplankton growth.

To test this hypothesis, two unenclosed transient iron fertilization experiments (IRONEX I and II) were conducted in the equatorial Pacific in 1993 and 1995, and a third experiment is being planned for the Southern Ocean.

The results from IRONEX II, in which 500 kg iron was added to a 72 km² patch of surface water, were particularly dramatic. Quantum yield of photosynthesis increased significantly within 2 hours, nitrogen and phosphorus were drawn down, and chlorophyll concentrations increased 30-fold within a week, approaching levels typical of coastal waters. The species composition of the phytoplankton community shifted dramatically, with larger cells dominating by the end of the experiment. The bloom caused a decrease in the partial pressure of CO₂ in the middle of the patch and a three-fold increase in dimethyl sulfide production, both of which have implications for climate regulation. The duration of the experiment was 18 days—not long enough for significant changes at higher trophic levels—and the bloom dissipated shortly after the last injection of iron. It is not at all clear how sustained fertilization would affect ecosystem structure, export of carbon to the deep sea, and fluxes of greenhouse gases. These effects cannot be predicted from a transient experiment, so longer-term fertilization experiments are needed.

DOE (1999a)

Pour le moment, de nombreuses incertitudes demeurent encore quant à l'effet de la fertilisation par le fer sur le reste de l'écosystème marin. Mais les expériences réalisées dans le Pacifique équatorial mettent déjà en évidence une modification de l'équilibre entre les différents types d'organismes (Coale *et al.*, 1996). On ignore encore également les effets de la fertilisation sur le long terme, car, jusqu'à présent, les expériences réalisées ont été très limitées dans le temps. Parmi les problèmes potentiels, se trouve le devenir de la matière organique déposée dans les fonds marins. On peut craindre, par exemple, une augmentation de la production de N₂O (puissant gaz à effet de serre) lors de la reminéralisation de la matière organique (Fuhrman et Capone, 1991, cité dans Jean-Baptiste Ph. *et al.*, 2001) et une anoxie des eaux profondes (par consommation accrue d'oxygène lié à la dégradation de la matière organique) (Sarmiento et Orr, 1991, cité dans Jean-Baptiste Ph. *et al.*, 2001). Enfin, on n'est pas encore parvenu à estimer la quantité de carbone absorbé par les organismes marins qui, au bout du compte, est réellement séquestrée. Des travaux de modélisation sembleraient d'ailleurs indiquer que, si cette méthode de fertilisation océanique était appliquée à grande échelle, la quantité de CO₂ atmosphérique

séquestrée serait bien inférieure à celle que l'on pourrait attendre d'une augmentation de la productivité biologique (Orr J.C. et Sarmiento J.L., 1992 ; Jean-Baptiste Ph. *et al.*, 2001).

Pour tenter d'apporter des éléments de réponse aux questions que l'on se pose encore, le Département à l'Énergie américain (DOE) a inauguré, en juillet 1999, DOCS, un centre pour la séquestration du carbone océanique (Center for Ocean Carbon Sequestration), qui vise notamment à étudier tous les problèmes liés à la fertilisation océanique.

DOCS

DOCS has been established as a center to conduct, focus, and advance the research necessary to evaluate and improve the feasibility, effectiveness and environmental acceptability of ocean carbon sequestration.

The Center will address fertilization and direct injection, and other ocean carbon sequestration strategies. It will advance our understanding of the biological, chemical, and physical processes that are critical to the ocean carbon cycle and help us understand the effects of proposed sequestration strategies on this system.

The Center was awarded by the US Department of Energy to the Lawrence Berkeley and Lawrence Livermore National Laboratories (LBNL and LLNL, Climate and Carbon Cycle Group). Although LBNL and LLNL are located in California near San Francisco, center participants are from across the nation.

The Center will train graduate students and post doctoral investigators. Interacting with the larger community, it will advance the state of ocean sequestration science and will provide a source of accurate information on fundamental processes of ocean carbon sequestration for the government, other researchers, and the public.

Source : Herzog et al., 2001d

Le manque de données rend pour le moment improbable une quelconque opération de fertilisation de grande ampleur. De petites expériences pilotes sont planifiées mais leur principale motivation reste d'étudier le potentiel en terme de retombées halieutiques. De gros progrès dans les recherches menées dans le domaine marin seront nécessaires pour améliorer notre compréhension des systèmes biologiques et trancher sur cette question : la fertilisation océanique est-elle vraiment une méthode efficace et sans danger dans une stratégie de lutte contre l'augmentation de l'effet de serre ?

3. Bilan et perspectives : les phases opérationnelles du dossier « changement climatique »

3.1. LE PAYSAGE GLOBAL DE LA LUTTE CONTRE LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : RAPPEL DES DOMAINES D’ACTION ET CADRE POLITIQUE

La figure 56 présente une synthèse des différents éléments traités jusque là.

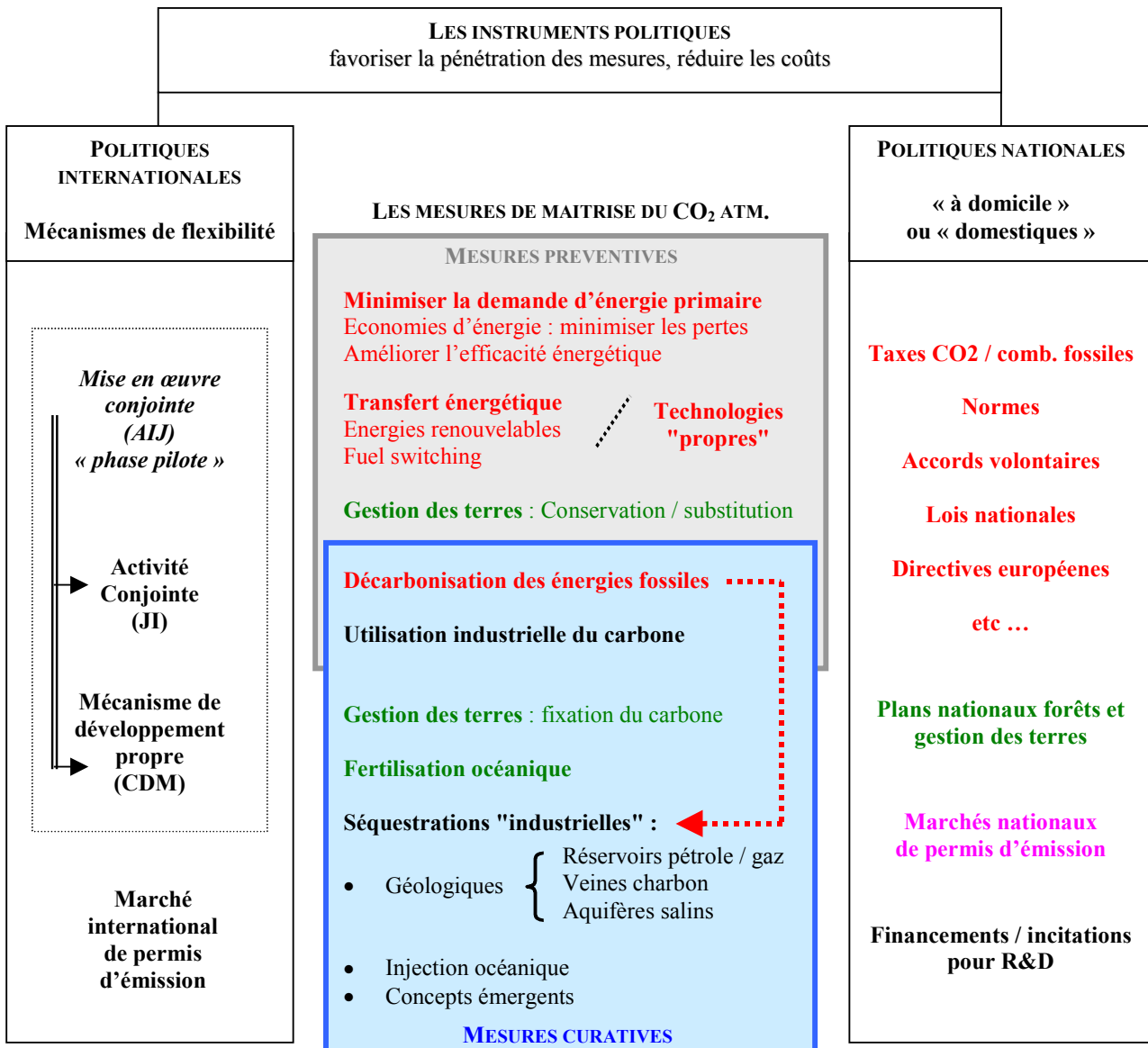


Fig. 56 - Synthèse des éléments structurels du dossier « changement climatique » (voir commentaires dans le texte).

- (a) Au centre, nous avons récapitulé les **domaines d'actions** possibles de la lutte contre l'augmentation des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère. Nous avons vu qu'ils relevaient de deux principaux secteurs : la gestion des terres (activités dites LULUCF) et l'énergie.

Les mesures peuvent être préventives dans le sens où l'on prévient la production de CO₂ ou curatives lorsque l'on traite le CO₂ produit, soit en le récupérant avant sa diffusion dans l'atmosphère (séquestrations industrielles), soit ensuite, en dopant les puits naturels de carbone (activités de fixation dans le domaine de la gestion des terres, fertilisation océanique).

Il existe un domaine de recouvrement entre mesures préventives et curatives. Ainsi, dans le concept de décarbonisation des énergies fossiles, on peut considérer que la décarbonisation « upstream » tend à prévenir la formation de CO₂ pendant l'utilisation du combustible, c'est-à-dire pendant sa fin première : la production d'énergie. En revanche, la décarbonisation « downstream » est curative : on traite l'effluent. Les méthodes de séquestrations industrielles*, qu'elles soient géologiques ou d'autres natures, font, en fait, partie intégrante de ce concept de décarbonisation (à quoi sert de capturer si l'on ne peut stocker ?), et sont clairement des mesures curatives. Dans notre figure récapitulative, la couleur rouge signifie domaine strict de l'énergie, le vert indique que les actions se font sur les écosystèmes et le noir ne relève pas d'un secteur propre. Ainsi, l'utilisation du CO₂ dans l'industrie ainsi que la séquestration industrielle ne relève pas seulement du secteur de l'énergie.

- (b) Entourant de part et d'autre les mesures d'actions possibles, sont représentés les **instruments politiques**.

- Sur la partie droite sont indiqués les instruments de **politiques nationales** s'inscrivant dans la lutte contre l'augmentation de l'effet de serre. Par exemple, pour la France, ce sont ceux que l'on trouve dans les Plans Nationaux de Lutte contre le Changement Climatique (PNLCC). La couleur rouge utilisée indique qu'ils concernent plus directement le domaine de l'énergie.

La figure a été épurée dans un souci de lisibilité mais nous aurions pu donner, à titre d'illustration, des exemples plus précis de ces mesures politiques et leurs liens plus directs avec les domaines d'action (cadres centraux). Ainsi, le recourt aux énergies renouvelables qui relève du « transfert énergétique » aurait pu être illustré par la directive européenne** « relative à la promotion de l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables sur le marché intérieur de l'électricité » du 27 septembre 2001 (voir deuxième partie, § 1.2.2.). Le domaine d'action « amélioration de l'efficacité énergétique » peut aussi s'illustrer par la directive européenne de 1996 « relative à la prévention et à la réduction intégrée de la pollution » qui reconnaît le rendement énergétique comme critère de détermination de la meilleure technologie possible (voir encore deuxième partie, § 1.2.2.). Autre exemple, l'accord de 1998 que

* On rappelle que nous avons donné à « séquestration industrielle » le sens suivant : le CO₂ séquestré provient de sources concentrées : centrales de production d'énergie à partir de combustibles fossiles ou autres unités industrielles de grande taille. Le CO₂ est « industriel » dans le sens où il subit des manipulations (séparation, transport, injection).

** On rappelle également que l'Union européenne est une Partie à la Convention Climat. Ainsi, les instruments politiques mis en place en Europe relèvent bien de la catégorie *politiques* « à domicile » ou « domestiques ». Le titre « Politiques nationales » a été conservé car l'UE ne constitue qu'une exception à la règle *une partie = une nation*.

la Commission européenne a conclu avec l'industrie automobile visant à réduire les émissions de CO₂ de 25 % pour les nouvelles voitures particulières entre 1995 et 2008 (fixation d'une norme) illustre la mesure « technologies propres ». Hors domaine énergie, nous pouvons également citer les mesures politiques du volet agriculture et forêts du PNLCC qui sont d'ordre divers : augmentation des aides au boisement des terres agricoles, développement de l'utilisation du bois dans la construction, etc. (MIES, 2002). Bien sûr ces instruments politiques illustrent directement le domaine d'action « gestion des terres » (conservation / fixation / substitution).

La future directive européenne sur les marchés de permis d'émission ainsi que la mise en place de cet instrument dans différents pays (Royaume-Uni) sont également des outils utilisés par les gouvernements pour faciliter la mise en application des « mesures de maîtrise du CO₂ atmosphérique » (voir fig. 56). Enfin, nous pouvons citer les outils développés par les gouvernements pour innover, progresser : ils donnent les moyens indispensables aux activités de R&D qui couvrent un large spectre de secteurs d'application.

L'ensemble de ces instruments de politiques nationales constituent dans le cadre des accords internationaux relatifs au changement climatique (convention climat, protocole de Kyoto) ce que l'on appelle les instruments mis en oeuvre « à domicile » dits encore « domestiques ».

- Dans la partie gauche de la figure sont représentés les **instruments politiques à l'échelle internationale** et qui relèvent donc des accords pris entre les parties dans le cadre de la convention Climat. Ici, les instruments ont une appellation propre : mécanismes de flexibilité. Ils comprennent les projets de protection du climat mis sur pied dans d'autres pays industrialisés (Joint Implementation, JI, activité conjointe) ou dans des pays en développement (Clean Development Mechanism, CDM, mécanisme pour un développement propre) ainsi que l'échange international de droits d'émissions (International Emissions Trading, IET).

Activité conjointe et mécanisme pour un développement propre sont des mécanismes de projet qui permettent d'obtenir des réductions d'émissions certifiées.

Ces unités de réduction d'émissions ainsi obtenues ainsi que les droits d'émission en excès dont bénéficient certains états, comme la Russie par exemple, peuvent ensuite être échangées sur le marché international.

Mais on oublie parfois que ces instruments sont encore virtuels. L'ampleur des enjeux est immense, c'est pourquoi les réunions annuelles de la Conférence des Parties se sont soldées par des négociations serrées quant à la stricte définition et aux conditions de mise en œuvre de ces mécanismes (voir deuxième partie, § 2.3.). Ces instruments ont cependant été testés lors de la « Phase pilote de Mise en Œuvre Conjointe » à laquelle nous allons notamment nous intéresser maintenant.

3.2. APPROCHE TRANSVERSALE : BILAN DU CARBONE ÉVITÉ ET/OU SÉQUESTRÉ

La communauté internationale s'est fixé un objectif clair : « stabiliser [...] les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche

toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique » (article 2 de la convention). Pour y parvenir, elle s'est donnée des instruments. De leurs côtés, les pays ont mis en place des politiques adaptées afin de respecter leurs engagements de réduction des émissions.

Maintenant qu'est dressée la scène du changement climatique ou, en quelque sorte, le « cadre théorique », nous allons voir comment, dans la pratique, les actions sont réalisées et les résultats qui ont d'ores et déjà pu être obtenus, ce qui correspond à la phase opérationnelle.

Dans un premier temps, nous allons nous intéresser aux actions menées dans le cadre de la « phase pilote » de mise en œuvre conjointe, puis nous dresserons un rapide bilan des politiques menées en France et en Europe (la nature de ces politiques a été abordée en deuxième partie, § 1.2.).

Alors que nous avons privilégié jusqu'à présent une approche verticale (définition des différentes mesures de maîtrise du CO₂ atmosphérique prises une à une, définition des instruments politiques), notre analyse sera maintenant transversale dans le sens où elle intègre à la fois instruments et mesures. Cette approche permet de dresser un état des lieux de l'utilisation de tel ou tel instrument pour telle ou telle mesure de maîtrise du CO₂ atmosphérique. Il permet également de montrer comment les instruments peuvent être utilisés pour progresser dans ce dossier, que ce soit en termes de « CO₂ évité » que de « CO₂ séquestré »*.

3.2.1. Mécanismes de projets : les enseignements de la « phase pilote » de la MOC

D'après la FAO, environ **200 projets** (tous domaines d'action confondus) ont été mis en œuvre pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (FAO, 2002).

Nous avons déjà présenté le contexte de la « phase pilote » ainsi que les projets spécifiquement liés à gestion des terres (voir deuxième partie, § 2.3.). Ces derniers ne représentent en fait qu'une minorité parmi l'ensemble des projets réalisés.

Nous l'avons vu, les motivations de ces projets sont diverses. Outre l'acquisition d'une expérience pour la mise en place des mécanismes de projets lesquels permettront d'obtenir des crédits d'émission (contrairement à ceux de cette phase pilote), elles relèvent de considérations notoriétales (le projet est alors un vecteur de communication) ou économiques (conquête de nouveaux marchés).

Sur ces projets, environ 77 % (155 projets) ont été officiellement enregistrés auprès du Secrétariat de la Convention Climat (Base de données de l'UNFCCC non datée mais consultée en octobre 2002).

Les pays les plus fortement impliqués sont la Suède (52 projets), les États-Unis (45 projets) et les Pays-Bas (25 projets). En 2002, la France comptabilise pour son compte seulement 5 projets (dont 2 partagés avec d'autres pays investisseurs). Pour qui concerne les pays accueillant les projets, outre les Pays Baltes (plus d'une

* À noter que cette approche nous oblige cependant à sortir du cadre strict du CO₂ et à considérer donc des quantités d'équivalent CO₂.

cinquantaine de projets, essentiellement suédois), la Fédération de Russie et le Costa Rica sont les pays les plus engagés dans ce mécanisme.

Le secrétariat de la Convention a regroupé les projets selon huit catégories :

- « Afforestation »,
- « Agriculture »,
- « Energy Efficiency »,
- « Forest Preservation »,
- « Forest Reforestation »,
- « Fuel Switching »,
- « Fugitive Gas Capture »,
- « Renewable Energy ».

Globalement, on peut donc considérer 5 principaux domaines d'action : les projets liés à la **gestion des terres** : 20 projets, les projets d'**efficacité énergétique** : 61 projets, les projets portant sur les **énergies renouvelables** (ENR) : 54 projets, les projets de **Fuel switching** : 11 projets et les projets visant à limiter les **fuites de GES** (méthane le plus souvent) : 9 projets (fig. 57).

Au total, ce sont plus de **120 millions de teqC** qui devraient être évitées ou séquestrés grâce à ces projets (tabl. 14). Les projets liés à la gestion des terres permettent de « gagner » environ 44 MteC soit près de 39 % du carbone total évité et séquestré grâce aux projets*. Parmi ces 44 MteqC, seulement 4 MteqC environ sont strictement séquestrés (catégories « boisement » et « reboisement »), les autres relèvent en effet de mesures de prévention et génèrent donc des quantités de « CO₂ évité » (tabl. 14).

Type d'activité	Nb projets	GES évités / fixés (teqCO ₂)	GES évités / fixés (teqC)	% GES évités/ fixés
Boisement (Afforestation)	4	4 916 625	1 342 239	1,09
Reboisement (Reforestation)	5	9 572 482	2 613 287	2,13
Agriculture	2	3 068 588	837 724	0,68
Préservation des forêts	9	143 267 956	39 112 152	31,88
Total gestion des terres	20	160 825 651	43 905 402	38,78
Efficacité énergétique	61	51 530 459	14 067 815	11,47
Fuel Switching	11	8 870 687	2 421 698	1,97
Énergies renouvelables	54	38 619 831	10 543 214	8,60
Limitation des fuites de GES	9	189 545 863	51 746 021	42,18
TOTAL	155	449 392 491	122 684 150	100

Tabl. 14 - Quantités de gaz à effet de serre évitées ou séquestrées dans les projets AIJ (d'après la base de données de l'UNFCCC - non datée : <http://maindb.unfccc.int/aij/>).

Il est à signaler qu'il existe parfois de légères variations par rapport à la liste globale datée du 12/02/02 (<http://unfccc.int/program/coop/aij/aijproj.html>). À noter que 12 des 155 projets ne sont pas renseignés pour ce qui concerne la quantité de GES évitée ou séquestrée.

* Les chiffres donnés ici peuvent faire apparaître des différences avec les chiffres donnés au chapitre « séquestration du carbone dans les écosystèmes terrestres » (Projets réalisés ou en cours : état des lieux - Deuxième partie, § 2.3.1.). Elle s'explique par le fait que nous ne considérons ici que les projets officiellement enregistrés auprès du secrétariat à la Convention.

LES MESURES DE MAITRISE DU CO₂ ATM.

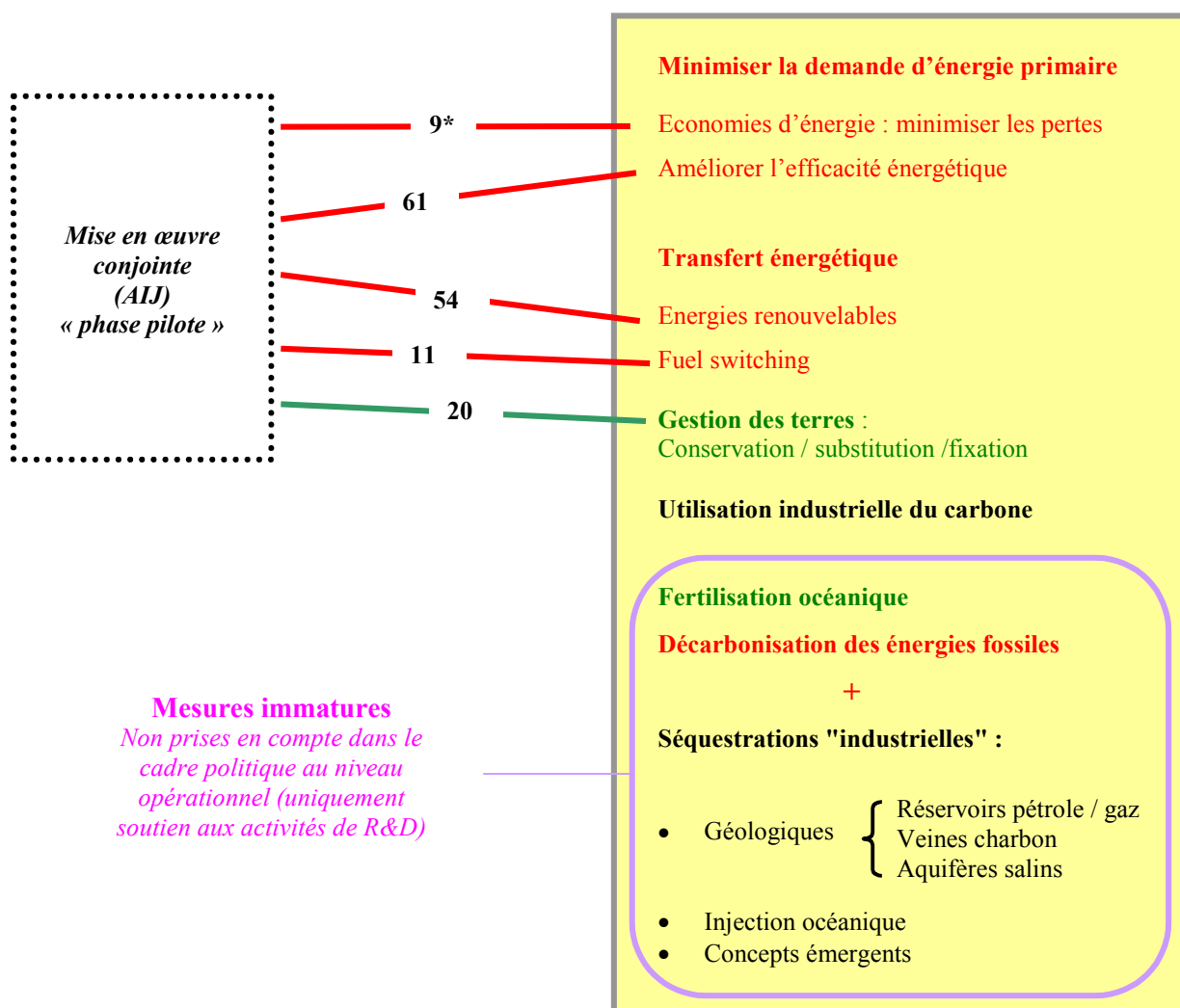


Fig. 57 - Les différents projets réalisés dans le cadre de la « phase pilote » de mise en œuvre conjointe (* : nous avons choisi d'attribuer les 9 projets classés "Fugitive Gas Capture" à la catégorie "mesures d'économie d'énergie").

Tous les autres projets sont liés à l'énergie. En effet, les projets de la catégorie « limitation des fuites de GES » sont relatifs au transport de combustibles fossiles (pipelines de gaz naturel). Ces derniers qui ne représentent pourtant que 9 projets (sur 155) sont responsables de 42 % du CO₂ total (évité et séquestré).

On constate un impact assez limité des projets liés au transfert énergétique (fuel switching et énergies renouvelables) qui représentent 42 % des projets réalisés (65 projets) et seulement un peu plus de 10 % des quantités de CO₂ séquestré et évité.

La durée des projets considérés est très variable (fourchette de 1 à 60 ans). Elle est en général plus limitée pour les projets liés à l'énergie où elle ne dépasse guère 30 ans (la majorité des projets sont prévus pour 10 à 20 ans). Certains projets LULUCF peuvent atteindre jusqu'à 60 ans.

3.2.2. Politiques nationales de lutte contre le changement climatique : premiers bilans et perspectives

Tout plan national de lutte contre le changement climatique (entendu au sens large donc incluant le PECC) s'applique à évaluer les mesures qu'il contient en terme d'impact sur les émissions de CO₂ et plus largement de GES. La principale question étant le respect des engagements : **les mesures sont-elles suffisantes pour atteindre les objectifs pris à Kyoto ?**

À courte échéance, la référence qui permet d'estimer l'efficacité de politiques et mesures menées pour lutter contre les émissions de gaz à effet de serre est le scénario du laisser-faire (business as usual scenario).

Pour les États-Unis, on estime qu'un tel modèle adopté pour la consommation énergétique conduirait, d'ici 2012 et dans le cadre des objectifs de Kyoto, à atteindre jusqu'à la valeur de 30 % de réduction des émissions par rapport aux niveaux de 1990 (Glazebrook, 2001).

Pour ce qui concerne la France, on peut se baser sur un scénario énergétique tendanciel à l'horizon 2020 (Giraud P.N., 1999) réalisé en complément des travaux publiés en septembre 1998 par le « groupe Énergie 2010-2020 » du Commissariat au Plan. Ce scénario permet de mesurer l'ampleur des efforts à accomplir pour atteindre un objectif de stabilisation en 2010 au niveau de 1990 des émissions de CO₂ d'origine énergétique : il faudrait économiser 24,5 Mt de carbone (90 Mt CO₂), soit 19 % des émissions tendancielles.

Partant d'un tel scénario, l'incidence de telle ou telle mesure sur les émissions de CO₂ reste difficile à évaluer. Même *a posteriori*, lorsque l'on constate une baisse des émissions, les experts peinent à l'imputer à une mesure spécifique. Ainsi, si l'on a pu constater en 1999 en Europe une baisse de 7 % des émissions de CO₂ dues à la consommation d'énergie par rapport à l'année 1990, ce qui montre que les plans mis en place dans les différents pays de l'UE et par la Communauté ont porté leurs fruits, il reste difficile de se prononcer sur les causes réelles de cette baisse (CITEPA, 2001b).

a) Le cas français

En 1999, selon un rapport préparatoire à la mise en place du dernier PNLCC, les mesures de maîtrise des émissions d'ores et déjà appliquées dans le cadre des plans nationaux successifs n'auraient représentées que 15 % des efforts requis pour stabiliser les émissions de GES en France d'ici 2008-2012 (Lepeltier S., 1999). Par ailleurs, la mise en œuvre des mesures décidées (non encore appliquées) au cours des années 90 ne représenterait que 25 à 30 % des efforts requis.

Cependant, la dernière communication nationale prévoit un certain nombre de mesures supplémentaires (voir deuxième partie, § 1.2.1.) dont les résultats attendus sont, pour ce qui concerne le CO₂ énergétique à l'échéance de 2010, un gain de 29 Mt. Ce qui conduirait au total, en prenant en compte les mesures existantes, à **68 Mt de CO₂ évité** par rapport à une projection sans mesure (scénario du laisser-faire) (fig. 58).

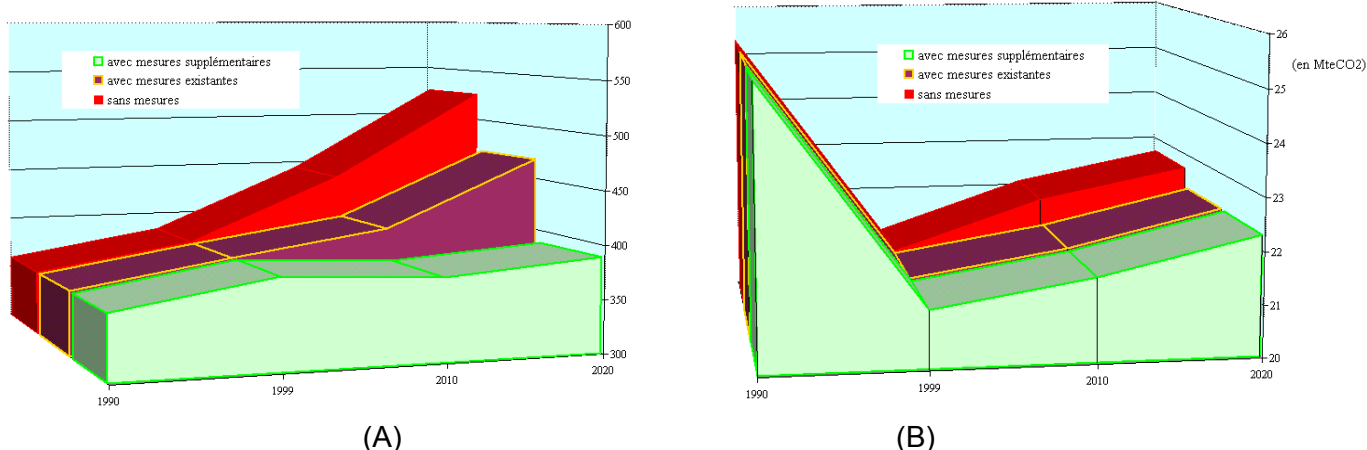


Fig. 58 - Projection des effets attendus en 2010 et 2020 des mesures existantes et supplémentaires du PNLC pour le CO₂ énergétique (A) et non énergétique (B).

(La projection « sans mesures » inclue les mesures prises avant 1990 qui ont été appliquées avant 2000 comme le développement nucléaire. Pour plus de détails voir deuxième partie, § 1.2.1.).

Ces chiffres seraient respectivement de 58 Mt et **138 Mt de CO₂** à l'horizon 2020. En revanche, il n'existe aucune mesure supplémentaire pour ce qui concerne le CO₂ non énergétique pour lequel on estime que les mesures existantes devraient autoriser un gain de 0,5 Mt de CO₂ en 2010 (fig. 58).

Les projections indiquent que même les mesures supplémentaires prévues ne parviendront pas à ramener nos émissions de CO₂ (énergétique et non énergétique) en 2010 au niveau qu'elles avaient en 1990 : on devrait atteindre 398,4 Mt de CO₂ émis contre 385,4 en 1990. Cependant, l'engagement de Kyoto concerne l'ensemble des gaz à effet de serre et, dans ce cas, l'objectif devrait être atteint grâce aux efforts réalisés sur les émissions de CH₄, N₂O et des gaz purement industriels HFC, PFC et SF₆. Selon les projections, grâce à l'ensemble des mesures adoptées, on devrait, en 2010, émettre 519 Mteq CO₂ contre 545 en 1990.

b) Le cas européen

Les émissions de GES dans l'Union européenne ont décliné d'environ 4 % entre 1990 et 2000 et on peut donc considérer que l'UE se trouve à mi-chemin de l'objectif fixé à Kyoto.

Cependant, les projections réalisées montrent que, en l'absence de mesures supplémentaires par rapport à celles déjà mises en œuvre ou en préparation, les émissions en Europe devraient se stabiliser au mieux à leur niveau de 1990 (CE, 2001b). Il resterait donc un écart de 8 %, **soit 340 Mteq CO₂**, à combler grâce à de nouvelles actions. Dans un rapport intermédiaire de juin 2001, les groupes d'experts ont recensé quelques 40 mesures envisageables (voir deuxième partie, § 1.2.2.) dont le potentiel de réduction des émissions dépasserait les 600 Mteq CO₂. Pour le moment, l'impact du premier train de mesures présenté par la Commission (PECC, communication du 23 octobre 2001) est évalué à **122 à 178 Mteq CO₂**.

Par ailleurs, au cours du deuxième semestre 2002, la Commission révisera la décision relative à un mécanisme de surveillance des émissions de CO₂ et des autres gaz à

effet de serre dans la Communauté pour tenir compte des exigences de notification prévues dans le protocole de Kyoto (COP6 de Bonn, Art. 5.1) et de « pouvoir évaluer de manière plus précise et régulière les progrès réalisés en matière de réduction des émissions, afin de respecter les engagements pris par la Communauté au titre de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (UNFCCC) et du Protocole de Kyoto ».

Mécanisme de surveillance des émissions de CO₂ et des autres gaz à effet de serre

1. La décision établit un mécanisme destiné à surveiller, dans les États membres, toutes les émissions anthropogéniques de gaz à effet de serre non réglementés par le Protocole de Montréal et évaluer les progrès réalisés dans ce domaine en vue de respecter les engagements pris par la Communauté concernant les changements climatiques.
2. Les États membres conçoivent, publient et mettent en œuvre des programmes nationaux en vue d'une part, de limiter ou réduire les émissions anthropiques par leurs sources, et d'autre part d'intensifier l'absorption par leurs puits de tous les gaz à effet de serre non réglementés par le Protocole de Montréal afin de contribuer :
 - à la stabilisation du niveau des émissions de CO₂ d'ici l'an 2000 aux niveaux de 1990 ;
 - au respect par la Communauté de son engagement de réduire toutes ses émissions de gaz à effet de serre non réglementés par le Protocole de Montréal au titre de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et du Protocole de Kyoto ;
 - à la surveillance transparente et précise des progrès effectifs et envisagés par les États membres.
3. Les programmes nationaux doivent contenir :
 - l'évaluation de l'incidence des politiques et mesures sur les émissions et les absorptions, et leur intégration dans les projections pour le CO₂ et les autres gaz à effet de serre ;
 - des informations sur les émissions de gaz suivants : le monoxyde de carbone (CO), l'oxyde d'azote (NOx), les composés organiques volatils autres que le méthane, les oxydes de soufre.En ce qui concerne le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O), les hydrocarbures fluorés (HFC), les hydrocarbures perfluorés (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF₆), les États membres doivent également fournir les informations suivantes :
 - les chiffres des émissions anthropiques pour les années de référence ;
 - des inventaires des émissions anthropiques par ses sources et de l'absorption par ses puits ;
 - le détail des politiques et mesures nationales mises en œuvre ou prévues depuis l'année de référence et contribuant à réduire les émissions de gaz à effet de serre.
4. Les États membres transmettent chaque année à la Commission, au plus tard le 31 décembre :
 - les données concernant les émissions anthropiques des 6 gaz énumérés à l'annexe A du Protocole de Kyoto et leur absorption par les puits au cours de l'année ;
 - leurs dernières projections pour la période 2008-2012 et, autant que possible pour 2005.
5. La Commission évalue les programmes des États membres afin de vérifier si les progrès réalisés dans l'ensemble de la Communauté sont suffisants pour respecter les engagements pris au niveau international.

Synthèse des décisions du 24 juin 1993, (93/389/CEE) et du 26 avril 1999 (99/296/CE)

Ce mécanisme, initialement adopté en 1993 (Décision 93/389/CEE du Conseil, du 24 juin 1993, [Journal officiel L 167 du 09 juillet 1993]) avait déjà fait l'objet d'une proposition de révision (décision 99/296/CE du Conseil, du 26 avril 1999 [Journal officiel L 117 du 05 mai 1999]).

Cette nouvelle révision devrait permettre d'accroître la fiabilité du système de surveillance communautaire afin qu'il soit possible d'évaluer assez tôt dans quelle mesure les États membres se conforment à leurs objectifs respectifs dans le cadre de l'accord de « partage des charges ».

Pour le moment, le dernier rapport d'évaluation de ce mécanisme (CCE, 2001d) confirme la nécessité d'efforts supplémentaires pour réduire les émissions de GES en Europe et met particulièrement en exergue le secteur des transports dont les

émissions ont particulièrement augmenté et pour lequel les projections indiquent une hausse de 30 % d'ici 2010.

Ce cri d'alarme est repris dans un récent rapport de l'Agence Européenne de l'Environnement qui dénonce des dérives actuelles et qui se montre sceptique quant à la capacité de l'UE à respecter ses engagements (EEA, 2002a et 2002b).

c) Conclusion

Les mesures décidées à l'intérieur d'un pays (ou de l'UE) correspondent aux actions domestiques qui doivent être mis en œuvre par les pays signataires de la Convention Climat et du Protocole de Kyoto. Malgré les progrès réalisés, les résultats escomptés sont incertains et il reste très probable que l'objectif global d'une réduction de 5,2 % des émissions de GES ne puisse être atteint en 2008 par la seule application de ces plans nationaux.

Pourtant, si l'on s'en tient aux travaux des experts du GIEC, une stabilisation des concentrations atmosphériques à 450 ppmv nécessiterait, après 2012, des réductions d'émission dans les pays de l'Annexe I bien supérieurs aux engagements de Kyoto (GIEC, 2001). Il est donc clair que, pour être efficace, la lutte contre l'augmentation de l'effet de serre nécessitera un effort considérable sur le long terme. Beaucoup d'espoirs sont fondés sur les mécanismes de flexibilité qui, en appui aux mesures domestiques, devraient aider les pays à se rapprocher de leurs objectifs grâce à un abaissement des coûts impliqués.

Ces divers instruments (à l'échelle nationale et internationale) sont passés en revue dans le volumineux volume Mitigation du troisième rapport d'évaluation de GIEC (GIEC, 2001). L'outil central utilisé par les experts est le groupe de scénarios post-SRES (scénarios d'intervention : voir fig. 33 - première partie, § 2.3.). Ainsi, la plupart des scénarios introduisent des taxes sur le carbone ou des contraintes sur les niveaux d'émission. Les plus récents permettent également de quantifier le bénéfice potentiel des permis d'émission.

Au-delà des strictes mesures politiques, les experts du GIEC tentent principalement d'estimer le potentiel de réduction des émissions de GES aux horizons 2010 et 2020, relatifs aux **développements technologiques** dans différents secteurs d'activité : bâtiment, transport, industrie, agriculture, déchets et énergie. Pour 2010, il se situerait, au total, aux environs de **1,9-2,6 Gt d'équivalent carbone par an** (ann. 4). À titre comparatif, les scénarios SRES prévoient, à la même échéance de 2010, une fourchette d'émission comprise entre 11,5 et 14 GteqC. On constate que, globalement, le potentiel est très important et la principale barrière est, d'abord et avant tout, économique*.

Pour ce qui concerne plus spécifiquement le secteur énergétique, les mesures incluses dans les estimations sont limitées à la production d'électricité mais prennent en compte l'ensemble des options que nous avons décrites : efficacité énergétique, fuel switching, énergies renouvelables ainsi que l'option visant à s'affranchir des émissions de CO₂ dans l'utilisation des combustibles fossiles. Le potentiel de réduction des émissions estimé est, au total, de 50 à 150 MteqC par an pour 2010 (ann. 4). L'option de séquestration industrielle (« CO₂ capture from coal » et « CO₂ capture from gas », voir

* Une analyse détaillée des coûts des mesures d'intervention est fournie dans le rapport du GIEC (GIEC, 2001).

ann. 4) aurait, selon les experts du GIEC, un potentiel inférieur à 40 MtC/an pour 2010 et situé entre 40 et 100 MtC/an à partir de 2020.

CO₂ séquestré versus potentiels de séquestration

Le tableau 15 permet de comparer quelques chiffres en termes de CO₂ effectivement séquestré (ou en cours de séquestration à travers des projets déjà initiés) et de CO₂ potentiellement séquestrable.

Pour ce qui concerne les actions sur les écosystèmes forestiers, 4 MtC seraient séquestrés (ou séquestrés à l'accomplissement complet des projets, ce qui peut représenter jusqu'à 60 ans) pour les projets enregistrés au secrétariat de la Convention et environ 32 MtC pour l'ensemble des projets (données du GIEC et de la FAO). La quantité séquestrable par an n'est pas explicitement estimée par le GIEC. Ce dernier estime en effet la totalité du carbone séquestrable et évitable (ie toutes mesures de conservation, substitution, fixation) pour les années 2010 et 2020 – voir ann. 4 – qui serait, pour chacun des deux écosystèmes forêts et sol, de 50 à 100 Mt/an. Quant au potentiel absolu de séquestration, il serait de l'ordre de quelques dizaines de milliers de millions de tonnes (10s Gt : voir deuxième partie, § 2.3.1.).

Il reste difficile d'estimer le carbone effectivement séquestré à ce jour dans les opérations de séquestration industrielle. Nous avons vu qu'elles sont actuellement inférieures à 2 Mt/an (5 Mt CO₂ pour l'EOR et 1 MtCO₂ pour Sleipener, voir deuxième partie - § 2.2.5.). Il se situe probablement entre 10 et 20 MtC. Le GIEC estime que la capture/séquestration du CO₂ énergétique (ann. 4) aurait un potentiel inférieur à 40 MtC/an pour 2010 et serait comprise entre 40 et 100 MtC/an à partir de 2020. En revanche, le potentiel absolu de séquestration se situerait entre plusieurs centaines de milliers de million de tonnes de carbone et plusieurs millions de million de tonnes (100s à 1000s GtC, voir deuxième partie, § 2.2.5.) et ce même en excluant l'option d'injection dans l'océan qui fait débat. La marge de manœuvre est très importante.

Option de séquestration	CO ₂ séquestré*	Origine	Potentiel réalisable (GIEC)		Potentiel absolu
			2010	2020	
Écosystèmes forestiers	4	Projets phase pilote MOC	Non estimé	Non estimé	10 000s
	32	Tous projets (sources : FAO, GIEC)			
Séquestration industrielle	10 - 20	Opérations d'EOR et injection en aquifère (1 opération)	<40/an	40-100/an	100 000s à 1 000 000s

Tabl. 15 - Comparaison des quantités de CO₂ séquestré (opérations en cours ou déjà réalisées) et potentiels de séquestration en en MtC (n.é = non estimé).

* Les deux options ne peuvent être directement comparées car pour la séquestration industrielle il s'agit de CO₂ effectivement séquestré alors que dans le cas des écosystèmes forestiers, il s'agit du CO₂ qui sera séquestré à l'issue des projets déjà initiés soit dans quelques dizaines d'années.

Remarque : Les données disponibles ne permettent pas de réaliser des comparaisons du même ordre pour ce qui concerne les mesures préventives sur l'énergie. À titre indicatif, on pourra retenir que :

- le carbone évité (ou qui le sera) dans les projets - réalisés ou en cours - de la phase pilote de la MOC s'élève à environ 62 Mt ;
- le GIEC estime à 50-150 Mt par an le carbone évitable en 2010 par des mesures sur l'énergie (production d'électricité) mais ce chiffre comprend aussi le CO₂ capturé et séquestré ;
- les mesures du PNLCC (existantes et supplémentaires) sur le CO₂ (toutes origines énergétiques) évité pourraient s'élever en 2010 à environ 18 MtC).

À l'heure actuelle, cette option n'a pas véritablement sa place parmi les instruments politiques, que ce soit au niveau national ou international. Seule mesure notable, des dotations de plus en plus importantes, notamment aux États-Unis, pour les actions de R&D dans ce domaine spécifique (voir ann. 3). Bien qu'il soit pour le moment exclu que cette option ouvre un droit direct à des crédits d'émissions (contrairement à la séquestration dans les forêts, même si, pour cette dernière option, le cadre d'application est toujours en discussion), on constate que c'est bien une mesure

politique nationale, en l'occurrence une taxe sur le CO₂ en Norvège, qui a permis à l'opération Sleipner (injection de CO₂ dans un aquifère profond en mer du Nord, voir deuxième partie, § 2.2.2.) de voir le jour. Il est certain que des mesures de ce type seront décisives dans le développement futur des options de séquestration industrielle. Les gouvernements qui se heurtent aux pressions des industriels rechignent souvent à les mettre en œuvre (Abandon du projet français de l'écotaxe sur l'énergie, voir deuxième partie, § 1.2.1.). Cependant, la prise en compte des problèmes environnementaux dans les politiques industrielles, notamment dans les grands groupes qui s'engagent de plus en plus dans des actions volontaires, pourrait également favoriser l'essor des options de séquestration.

3.3. UN PROBLÈME RÉCURRENT : ÉVALUER ET CONTRÔLER

Dans le contexte de la Convention Climat des Nations Unies et du Protocole de Kyoto, la qualité de l'analyse des données d'émissions et le mode de restitution de ces données revêtent une importance capitale. Les quelques éléments ci-dessous en donnent une illustration :

- les parties se sont engagées à des réductions chiffrées d'émissions qui doivent être vérifiables ;
- lorsque les pays souhaitent mettre en place des politiques adaptées pour respecter leurs engagements, ils doivent être à même de mesurer leurs impacts potentiels, ce qui nécessite donc de pouvoir se baser sur des évaluations rigoureuses ;
- les entreprises, qui sont ensuite soumises à ces instruments ont, elles aussi, des comptes à rendre aux autorités nationales dont elles dépendent ;
- enfin, l'octroi de crédits prévus par les mécanismes de flexibilité, sont également conditionnés par une évaluation fiable et transparente des « émissions évitées ».

Pour ce qui concerne l'évaluation des émissions annuelles des Parties à la Convention, des outils spécifiques, les guides méthodologiques du GIEC, ont été prévus pour la réalisation des inventaires (voir première partie, § 2.2.). Mais qu'en est-il des autres cas ? L'évaluation et le contrôle des émissions est un problème récurrent qui fait actuellement l'objet de nombreux travaux. Parmi les moyens pouvant être mis en œuvre, l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) et des variantes de cet outil connaissent aujourd'hui un fort développement (eg. : Grotz S. et Rubik, F., 1997). Il était donc important qu'il figure dans un rapport dont l'objectif est de présenter les éléments clefs du dossier « changement climatique ».

3.3.1. Un outil possible d'évaluation : l'Analyse de Cycle de Vie

a) Définition de l'ACV

Ces dernières années, alors que l'environnement devient un sujet croissant de préoccupation, différents outils ont été développés pour faciliter l'intégration de la dimension environnementale, notamment à l'échelle de l'entreprise. Certains de ces outils de management environnemental s'appliquent davantage aux sites alors que d'autres sont axés sur les produits au sens large du terme (ce peut être un procédé ou un service). C'est dans cette dernière approche qu'a été mis au point, au début des années 1990, un outil spécifique : l'analyse du cycle de vie (ACV). Pour en donner une courte définition, nous pouvons nous référer à la description que le WBCSB (World Business Council on Sustainable Development ; Conseil économique mondial sur le

développement durable) en a donné dans son rapport de 1996 « Environmental assesement, a business perspective » (cité dans Ch. Brodhag, 2001) :

« L'analyse de cycle de vie (ACV) est un **outil utilisé pour évaluer les effets associés à un produit, procédé ou une activité**. L'ACV débute par la définition d'un but, d'objectifs et d'unités fonctionnelles. Elle se poursuit par l'identification et la qualification des entrées et sorties d'énergie et de matière. Les données obtenues sont utilisées pour évaluer l'impact de l'usage et des rejets de ces énergies et matières dans l'environnement, et ainsi **évaluer systématiquement et mettre en œuvre les opportunités d'obtenir une amélioration pour l'environnement**. Une ACV couvre l'ensemble du cycle de vie d'un produit incluant tous les emballages, procédés et activités. Cela inclut l'extraction et la mise en œuvre des matières premières ; production, transport et distribution ; utilisation/réutilisation/réparation ; recyclage ; et le traitement final. Mais dans une ACV la définition de l'objectif et de la portée sont critiques et l'effort se déroule dans ce cadre. **L'ACV fournit des données qui permettent de juger de l'impact environnemental des produits et des services, et d'identifier les améliorations à toutes les étapes du cycle de vie** ».

Parmi les sorties de matière figurent bien sûr l'ensemble des rejets gazeux dans l'atmosphère et donc les différents gaz à effet de serre. Dans la détermination des différents impacts associés au produit à toutes les étapes de son cycle de vie, c'est à dire, selon l'expression consacrée, du « berceau à la tombe » (cradle to grave), est donc inclus le PRG (pouvoir de réchauffement global, voir première partie, § 1.1.). Il est donc évident que cet outil trouve une place de choix dans la problématique du changement climatique.

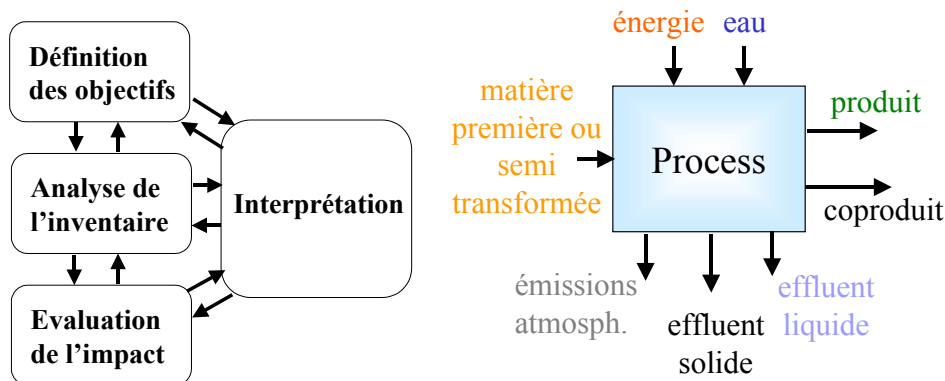
L'Analyse du Cycle de Vie

L'Analyse du Cycle de Vie est un outil d'aide à la décision.

Elle recense et quantifie, tout au long du cycle de vie des produits, les flux physiques de matière et d'énergie associés aux activités humaines, en évalue les impacts potentiels puis interprète les résultats obtenus en fonction de ses objectifs initiaux. Le terme « produit » est à entendre au sens large : il désigne un produit au sens strict ou un service. Dans certains cas, l'analyse peut se limiter à un procédé ou à une filière de traitement particulière.

L'ACV est une méthode standardisée : les principes et cadre sont donnés par la norme **ISO 14040**.

La méthodologie de l'Analyse du Cycle de Vie est articulée en quatre étapes bien distinctes mais interdépendantes car, tout au long de l'étude, de fréquents retours sont nécessaires, ce qui rend la démarche générale itérative.



1. L'ACV débute par la définition de l'objectif et du champ d'étude

Chaque Analyse du Cycle de Vie est construite pour répondre à des questions précises. La définition des objectifs et du champ de l'étude conditionne donc les choix méthodologiques de chaque étape (inventaire, évaluation des impacts, interprétation) et par voie de conséquence les résultats : l'ACV est « goal-dependant ». Cette première étape se précise de manière itérative au fur et à mesure de l'avancée de l'analyse. On retrouvera, par exemple, la définition des frontières de l'étude, la définition des fonctions du (ou des) produit(s), l'exigence de la qualité des données nécessaires à l'analyse de l'inventaire dans la norme **ISO 14041**.

2. Elle se poursuit par l'analyse de l'inventaire : identification et qualification des entrées et sorties d'énergie et de matière

Dans un premier temps, l'unité fonctionnelle est définie, unité à laquelle sera rapporté l'ensemble des flux représentatifs de la fonction du produit ou service étudié. On détermine alors les systèmes qui s'y rattachent ainsi que ses frontières. Les flux de matière et d'énergie entrant et sortant sont ensuite quantifiés. On constitue ainsi l'inventaire (anciennement appelé « écobilan »). L'inventaire constitue un véritable travail de comptabilité analytique des flux.

Les limites initialement fixées peuvent être élargies et la qualité des données redéfinies.

Le recueil et le traitement des données se font conformément à la définition des objectifs comme le précise la norme **ISO 14041** « Définition des objectifs et du champs de l'étude - analyse de l'inventaire ».

3. Les données obtenues sont utilisées pour évaluer l'impact de l'usage et des rejets de ces énergies et matières dans l'environnement, et ainsi évaluer systématiquement et mettre en œuvre les opportunités d'obtenir une amélioration pour l'environnement.

La démarche ACV s'efforce de rendre l'évaluation aussi objective que possible en traduisant des flux quantifiables et mesurables. Cette étape a pour but de traduire les consommations et les rejets recensés lors de l'inventaire en impacts environnementaux (effet de serre, trou dans la couche d'ozone, smog, acidification, eutrophisation, toxicité...).

Pour cela, ces flux sont classés dans différentes catégories d'impact pour lesquels ils participent.

Dans un deuxième temps, ces ensembles de flux sont caractérisés, à partir d'indicateurs, en impacts environnementaux. Le choix des catégories d'impact et des indicateurs associés se font en relation avec les objectifs et les systèmes étudiés.

Ces opérations (choix, classification et caractérisation) sont définies comme obligatoires par la norme **ISO 14042**.

D'autres opérations facultatives peuvent être effectuées selon l'objectif poursuivi : la pondération (à chaque impact est affecté un poids, puis les différents impacts sont agrégés pour obtenir une note finale), la normalisation (résultats ramenés à des valeurs de référence, par exemple les impacts d'un habitant pendant un jour).

4. L'ACV se termine par l'interprétation

L'interprétation a pour objectif d'analyser les résultats et d'expliquer les limites de l'inventaire et/ou de l'évaluation des impacts, afin de fournir des recommandations de manière la plus transparente possible.

Elle met en avant les points forts et les points faibles d'un système et permet la connaissance des paramètres et des étapes sensibles. Ceci ouvre des perspectives en matière d'actions correctives et de diminutions des impacts.

Comme le précise la norme **ISO 14043**, cette étape s'appuie sur l'identification des points significatifs de l'inventaire et de l'évaluation des impacts du cycle de vie accompagnée de différents contrôles : contrôle de sensibilité des hypothèses retenues (indicateurs, frontière...), contrôle de la complétude et de la cohérence sur le cycle de vie ou entre plusieurs options.

Source : ADEME

b) Illustration dans le cadre des mécanismes de projets

Tout projet commence par une première étape d'analyse de l'existant avec son extrapolation dans le futur : quelle sera ma situation demain si je continue avec le modèle actuel ? La réponse à cette question passe par la construction d'un scénario de base ou scénario de référence (baseline). Ce n'est qu'avec cette phase d'analyse qu'il sera possible, ensuite, d'évaluer avant de le mettre en œuvre, les effets potentiels du projet.

Cela est d'autant plus vrai dans le cadre des projets CDM puisqu'ils vont générer de nouveaux droits d'émissions, contrairement aux projets JI*. Ils doivent être soumis à un cycle strictement défini avec des exigences et des procédures de contrôle rigoureuses : ces hypothèses (scénario de référence et évaluation du potentiel de CO₂ évité) doivent être authentifiées par un organe de contrôle indépendant.

Les réductions effectivement réalisées sont vérifiées et certifiées par un organe de contrôle privé. Les procédures sont donc assez complexes et font intervenir plusieurs acteurs et instances. Pour des détails sur cette question, on peut se reporter au site internet de la Convention Climat qui a développé un dossier sur le MDP et son cadre institutionnel.

De nombreux projets de conservation... pas toujours très rigoureux

La large représentation des projets de conservation est due à l'idée répandue que ces projets sont relativement simples à mettre en place (simple achat de parcelles), peu coûteux car sans réel transfert de technologie, et rapportant de nombreux « crédits d'émission » vu les surfaces concernées. De plus l'additionnalité environnementale de ceux-ci semble évidente. Toutefois cette idée générale tend à être de moins en moins claire, que ce soit au niveau des coûts ou au niveau de l'additionnalité des projets. En effet, on se rend compte aujourd'hui que l'additionnalité de ces projets n'est plus aussi évidente lorsque l'on considère les risques de pertes associées élevés de ces projets. De plus, en considérant la durée de vie des projets (44 ans en moyenne d'après le GIEC), il semble que les coûts nécessaires à la réalisation et à la pérennité de ceux-ci soient bien plus importants qu'il n'y paraisse.

Des projets prévus sur un terme aussi long doivent en effet limiter les risques de réversibilité (entretien, surveillance). De même, cette durée de vie élevée implique des scénarios de référence solides et donc une approche sérieuse générant des coûts supplémentaires.

L'élaboration des scénarios de référence a été faite le plus souvent par les promoteurs des projets (Moura-Costa *et al.*, 2000). Dans ce cas, deux problèmes ont été soulevés : la crédibilité des résultats et la transparence. En effet, l'intérêt des promoteurs est d'établir un scénario de référence le plus élevé possible en terme d'émissions de CO₂ afin que l'additionnalité du projet soit importante, leur objectif étant d'obtenir le plus de crédits d'émission possible (Tipper et de Jong, 1998). Dans ce cas-là, la diffusion des informations concernant la méthodologie adoptée par les promoteurs a été très limitée, voire nulle. On peut d'ailleurs noter que les méthodologies élaborées dans cette situation n'ont pas été vérifiées (GIEC, 2000a).

Ce manque de transparence entraîne par ailleurs un autre problème. Dans la mesure où des informations sur le développement d'un projet ne sont pas disponibles, il devient très difficile de réaliser des projets similaires, ce qui va à l'encontre d'un des objectifs de la Convention.

Lorsque les projets ont été réalisés par des gouvernements, comme le projet Olafo au Guatemala ou le projet du Burkina Faso, les scénarios de référence ont été définis par des agences affiliées aux gouvernements, des instituts de recherche ou des universités. Cependant, ceci n'a pas empêché le manque de transparence de la méthodologie appliquée pour la définition des scénarios de référence (Dixon, 1999).

Pour pallier le manque de transparence et à la crédibilité douteuse des scénarios de référence, des méthodologies ont été établies par des organismes indépendants, ou tierce partie. Les bureaux nationaux AIJ comme celui du Costa Rica ont établi des scénarios de référence, notamment pour le projet PAP (Protected Area Project) regroupant les anciens projets CARFIX et BIODIVERSIFIX.

D'autres organismes indépendants, tels les cabinets d'audit (SGS Forestry, par exemple) ou des organismes de contrôle (Winrock International, par exemple) qui évaluent les crédits d'émission à allouer, ont élaboré ou réévalué des scénarios de référence. De cette manière, la crédibilité des scénarios de référence se voit renforcée même si la transparence n'est pas toujours de mise, excepté dans le cas des bureaux nationaux AIJ. C'est d'ailleurs à ce niveau que le secteur privé s'est le plus manifesté au cours de la phase pilote, les cabinets d'évaluation « poussant comme des champignons » (Dixon, 1999).

FAO, 2002

* On rappelle que les projets JI se caractérisent par le fait que les pays dans lesquels ils sont réalisés, disposent également d'un quota d'émissions selon le Protocole de Kyoto. Ainsi, les réductions d'émissions réalisées via le projet sont déduites du budget du pays hôte et créditées à l'investisseur.

L'examen de l'additionnalité (voir deuxième partie, § 2.3.) des réductions d'émissions obtenues dans le cadre d'un projet MDP suppose de disposer d'informations précises et quantifiées. Or, sur ce point, la « phase pilote » a mis en exergue d'importants problèmes méthodologiques quant aux bénéfices réels en terme de « CO₂ évité ». L'encadré ci-dessous qui cible les projets de conservation dans la gestion des terres en est une illustration.

L'expérience montre donc que l'évaluation des projets se heurte à deux éléments : « la crédibilité des résultats » et « la transparence ». Comme le souligne P. Cornut (1999), « Le MDP est pénalisé par le biais systématique affectant l'évaluation des réductions d'émissions revendiquées. Ce biais systématique peut être rattaché à la problématique du passager clandestin : dans le cadre de la prévention du risque climat, chaque acteur peut avoir intérêt à faire semblant d'agir, et laisser ainsi supporter le coût de la prévention à ceux qui agissent réellement ».

Pour remédier à ces problèmes et faciliter les contrôles postérieurs, un mode standardisé de présentation des projets semble incontournable. À ce jour, les règles restent à définir mais une approche de type analyse du cycle de vie semblerait particulièrement bien adaptée dans ce contexte.

D'une part, l'ACV est une méthode **standardisée** (norme X30-300) reconnue à l'échelle internationale, un atout certain puisque les projets réalisés dans le cadre des mécanismes de flexibilité impliquent des acteurs d'origines très variées (relevant du secteur public ou privé, de pays différents avec des degrés de développement économique très disparates). D'autre part, la transparence est l'un de ses principes fondateurs. Par exemple, les indices utilisés doivent être employés de façon transparente : origine, validité, existence ou non d'autres indices. Lorsque plusieurs indices internationalement reconnus existent, le choix de l'indice employé doit toujours être justifié.

De plus, il n'est pas acquis que si un projet apporte ponctuellement un gain en terme d'émission de CO₂, il ne génère pas, par ailleurs, des pertes associées dans un secteur non pris en compte dans l'évaluation. Ce problème est celui du « déplacement de pollution ». Une ACV réalisée de façon rigoureuse permettrait d'écarter ce risque. Cela est vrai pour le CO₂ mais aussi pour d'autres polluants.

Ainsi, quand les émissions évitées de CO₂ sont évaluées pour un projet, certaines conséquences involontaires, par exemple la génération d'autres polluants qui résulterait des modifications des technologies employées (fuel switching notamment), peuvent être omises. Alors que la réduction des émissions peut être l'objectif prioritaire, l'approche peut ne pas être durable dans le sens où elle se focalise sur un seul impact environnemental. L'ACV peut alors permettre de déterminer si la stratégie adoptée a bien un impact global minimal sur l'environnement.

Une approche de type ACV a d'ailleurs été utilisée dans une douzaine de projets AIJ du WBCSD en Amérique Latine (Delaney T., 2001). Cependant, s'il n'existe pas au préalable des bases de données fiables et complètes, la mise en pratique de cet outil est un travail de très longue haleine mobilisant des moyens humains et financiers considérables peu compatibles avec un régime efficace de mise en œuvre du MDP. On peut, à ce propos, citer P. Cornut (1999) : « La mise en place d'un régime MDP robuste aura inévitablement un coût. Celui-ci devra être financé par les participants à

travers le prélèvement d'une taxe assise sur les projets. Si la mise en place de dispositifs de contrôle se traduit par des coûts de transaction trop élevés, les investisseurs seront plus réticents à s'engager ». Ce qui est vrai pour le dispositif de contrôle l'est aussi pour le montage du projet. Tout l'enjeu est de trouver un compromis entre rigueur et coût.

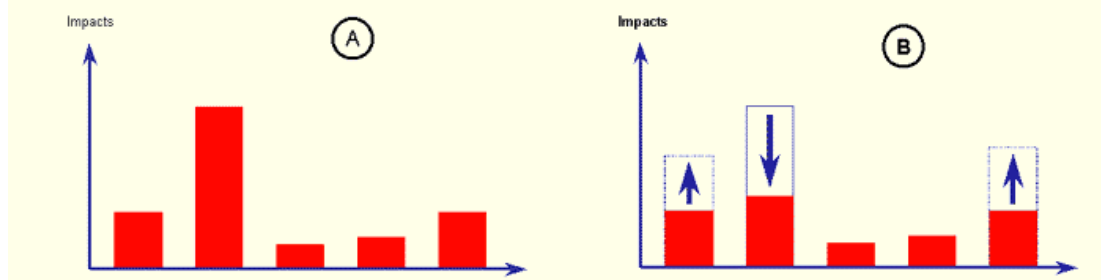
"Illustration de la notion de déplacements de pollutions"

Exemple :

L'analyse environnementale d'un produit met en évidence que l'impact majeur est généré lors de la fabrication. **(A)**

L'une des solutions envisagées permet de réduire significativement l'impact lié à la fabrication. Toutefois, cette même solution augmente les impacts liés à l'acquisition des matières premières et à la valorisation finale du produit. **(B)**

La question est alors de savoir si les gains environnementaux obtenus lors de la fabrication sont ou non supérieurs aux dégradations qui en découlent lors des étapes d'acquisition des matières premières et de valorisation finale du produit.



Source : ADEME

Le mode d'évaluation et de contrôle des projets s'inscrivant dans la lutte contre le changement climatique n'est pas encore défini. C'est un domaine encore en friche où interviennent un grand nombre d'acteurs, ce qui rend particulièrement difficile la lisibilité du paysage actuel.

c) Illustration dans le cadre des politiques publiques et industrielles

Afin de respecter leurs engagements de réduction d'émission à la Convention Climat, les pays examinent les mesures possibles puis mettent en place des instruments adaptés. Pour cela, il est indispensable, pour les décideurs, de procéder à une phase d'évaluation. Une fois ces instruments en vigueur, les entreprises vont devoir s'y soumettre et mettre alors en place des plans de réduction d'émissions adaptés à l'atteinte des objectifs fixés, soit par elles-mêmes (engagements volontaires) soit par l'autorité nationale (normes) (fig. 59).

Parce qu'elle permet de donner une vision globale des impacts générés par des produits ou procédés, déclinée selon différentes simulations, l'analyse du cycle de vie fournit des **éléments d'aide à la décision aux politiques publiques et industrielles**. Des choix dans les filières de valorisation des déchets ou des critères d'écoabellisation des produits sont des illustrations de ces décisions publiques où l'outil ACV est mis en pratique avec succès (site de l'ADEME , <http://www.ademe.fr/>).

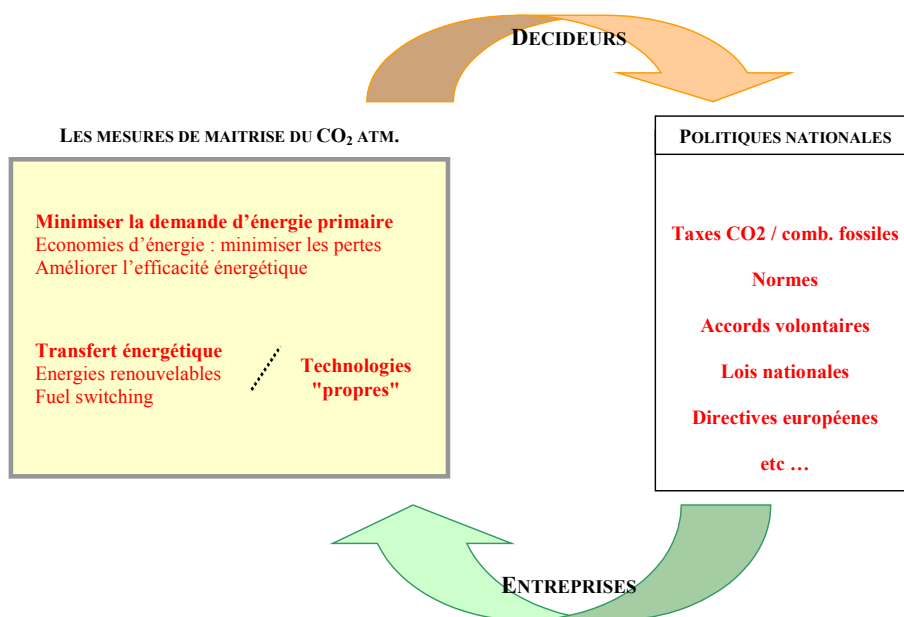


Fig. 59 - Mesures de lutte contre le changement climatique et instruments politiques « domestiques ».

De la même manière, les exemples sont nombreux de l'utilisation de l'ACV dans les choix politiques relatifs à l'énergie et donc à la problématique du changement climatique. En déterminant où peuvent être attendus les plus grands bénéfices en terme d'émissions, et plus généralement de pollutions, il est ensuite possible de décider des instruments qui seront les mieux à même de favoriser une technique ou un procédé plutôt qu'un autre (par exemple, taxer un produit ou en défiscaliser un autre).

La figure 60 illustre comment l'ACV permet de comparer deux types de centrales thermiques, au charbon et au gaz naturel, en terme d'impact « réchauffement global » (voir aussi par exemple : Spath P.M. et Mann M.K., 2000).

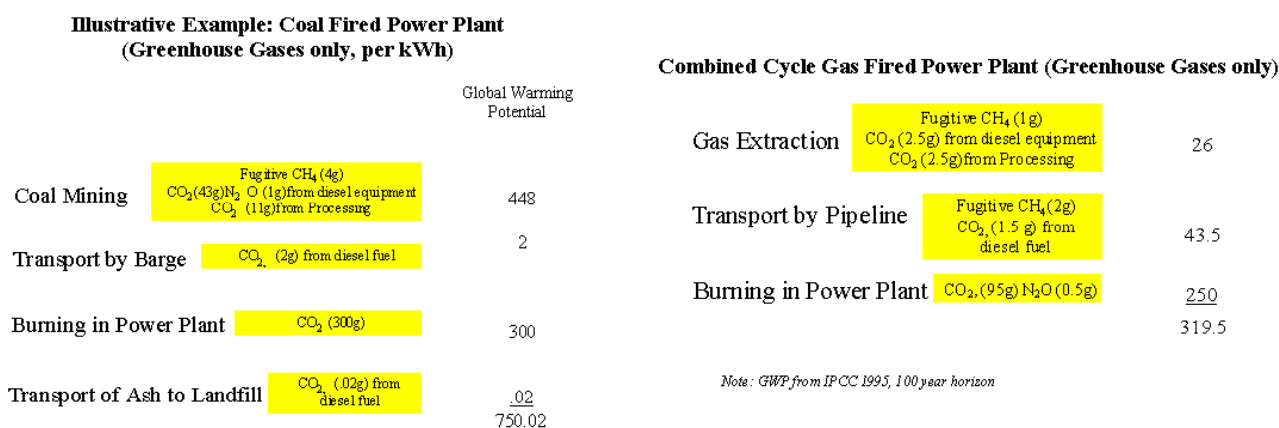


Fig. 60 - Comparaison de l'impact « réchauffement global » pour deux types de centrales au charbon et au gaz naturel (source : Delaney T., 2000).

Les cas où l'on a recouru à l'ACV sont très nombreux dans le domaine de l'énergie (OCDE & Nuclear Energy Agency, 2002). Beaucoup de travaux sont réalisés pour évaluer de nouvelles technologies, comme les piles à combustibles (eg. : Pehnt M., 2002), et déterminer leurs impacts en terme de changement climatique.

Comme dans le cadre des mécanismes de projets que nous venons de traiter, l'ACV peut également s'avérer très utile pour détecter les éventuelles conséquences involontaires qui seraient générées par le remplacement d'un procédé ou d'un produit par un autre qui semblait, *a priori*, moins nocif en terme d'émissions de gaz à effet de serre. Une illustration de ce cas est l'étude ACV menée pour les Départements américains à l'Énergie et à l'Agriculture par la société PriceWaterHouse Coopers (DOE & DOA, 1998). L'objectif de l'étude était de comparer les impacts environnementaux de deux types de combustibles, l'un étant un biodiesel fabriqué à partir de soja et l'autre un diesel classique (pétrole). Toute la chaîne depuis l'extraction des produits jusqu'à leur utilisation finale a été prise en compte, conformément au principe de l'ACV. Les résultats ont montré que, si du point de vue des émissions de CO₂, le biodiesel s'avérait plus performant, il générerait en revanche des émissions plus fortes de NOx, un élément critique pour la qualité de l'air urbain.

Une vision exhaustive des impacts potentiels d'un produit ou d'un procédé permet de faciliter et d'optimiser, dans une démarche de développement durable, le processus décisionnel que ce soit au niveau du politique ou de l'industriel.

Lorsqu'il y a comparaison entre deux procédés ou produits dont les impacts sont de natures trop différentes, l'analyse du cycle de vie peut perdre de sa pertinence. Plusieurs méthodes de normalisation des impacts ont été proposées (voir encadré ACV) mais elles peuvent rapidement trouver leurs limites. Comment, en effet, comparer les impacts « pluie acide », « changement climatique », ou « prolifération de déchets nucléaires » ? Ces questions revêtent des dimensions politiques, culturelles, voire émotionnelles, qui ne peuvent que nuire à l'objectivité requise dans une étude comparative (Furuholt E., 2002).

Certaines entreprises qui se sont engagées dans une diminution de leurs émissions de CO₂ pour différentes motivations : se mettre en conformité en regard d'une norme spécifique, éviter une taxe, répondre à un engagement volontaire qu'elles auraient pris, ou, dans l'avenir, pour acquérir des crédits d'émissions, peuvent faire le choix de réaliser une analyse du cycle de vie. L'outil présentant une grande souplesse, ces entreprises peuvent aisément l'adapter à l'objectif plus spécifique qu'elles visent (choix des frontières du système, par exemple).

C'est le cas de certaines grandes industries comme BP ou Alcan Aluminium qui cherchent, au niveau mondial, à améliorer leur efficacité énergétique. Cependant, c'est là un projet ambitieux qui n'est pas à la portée de tous.

Conclusion

Vu sur le plan théorique, en dehors de toute considération économique, l'ACV est un outil extrêmement attractif de par le potentiel d'amélioration qu'il offre, que ce soit dans le cadre d'un projet (AIJ mais bientôt MDP ou IJ) ou dans celui de l'évaluation d'un choix de politique publique ou industrielle. Cependant, les importants moyens qu'il implique constituent son principal facteur limitant. Si les grosses entités telles qu'une agence nationale peuvent y avoir recouru conjointement avec d'autres outils d'évaluation, la complète généralisation de l'ACV n'est certainement pas réaliste.

Une dynamique est en train de se mettre en place pour améliorer le rendement coût/efficacité de cet outil dans les multiples applications qu'il trouve dans le dossier « changement climatique ». Ainsi, une série d'initiatives, notamment de la part de l'ISO (International Organisation for Standardisation) mais également d'autres organisations, visent à mieux adapter les procédures et permettent de conserver l'esprit de l'ACV (transparence, exhaustivité, standardisation...) tout en rendant plus facile sa mise en œuvre.

3.3.2. L'ACV adaptée à la lutte contre le changement climatique : un outil plus performant

a) Les travaux de l'ISO (International Organisation for Standardisation)

Depuis 1997, l'ISO travaille activement à l'adaptation et à la promotion des différentes normes environnementales dans la problématique du changement climatique (Delaney T., 1999, 2000 et 2001). Elle a créé pour cela des groupes spécifiques, AHGCC (Ad Hoc Groupe on Climate Change) et CTTF (Climate Technology Task Force), ce dernier dépendant du comité technique TC207 (management environnemental).

La portée de la normalisation dans le domaine environnemental a fait de l'ISO un acteur indispensable dans les efforts internationaux visant à traiter du changement climatique. Le TMB [nldr Technical Management Board] a créé un groupe ad hoc (AHGCC) chargé spécifiquement d'agir en tant que point focal pour les interactions entre l'ISO et le secrétariat de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et l'Initiative technologie et climat (CTI) de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) et de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques). L'AHGCC a compilé une base de données préliminaire de normes ISO potentiellement applicables aux changements climatiques.

Cette base de données fait référence à 17 comités techniques et 37 sous-comités et groupes de travail, dont les activités peuvent être utiles pour des applications liées au changement climatique. Actuellement, l'accent est surtout placé sur l'évaluation du rôle potentiel de l'ISO dans le développement d'approches normalisées visant à établir des lignes directrices relatives aux gaz à effet de serre, et en matière de surveillance, de mesure et de vérification.

Extrait du rapport annuel 2001 de l'ISO

ISO TC207 Climate Technology Task Force (CTTF) has evaluated the potential relevance of the ISO standards to the issue of global climate change and they are now actively promoting the use of the standards by parties involved in the UNFCCC activities. With respect to LCA the CTTF noted that "in particular, ISO 14041, the Life Cycle Inventory standard, can assist organizations in measuring greenhouse gas emissions and other environmental impacts. It may be used to establish a baseline of greenhouse gas emissions for a product system to benchmark environmental improvements or to evaluate alternatives. This can be done for the whole system but also broken down by unit process (e.g., electricity production or transportation). Specifically the CTTF report noted that the standard can be used to:

- Develop quantitative inventories of the greenhouse gas emissions associated with a product system;
- Develop quantitative inventories of the greenhouse gas emissions of the unit processes that make up a product system (e.g. electricity production, transportation);
- Provide data and information to identify which unit processes have the greatest use of energy and the greatest emissions;
- Identify energy efficiency improvement opportunities and other options to reduce greenhouse gas emissions;
- Provide data and information to evaluate the effect of new energy efficient technologies on the overall environmental profile (i.e. taking into considerations system-wide trade-offs).

Source : K. Brady, 2000

Le groupe CTTF travaille actuellement à la préparation de deux nouveaux fascicules consacrés, d'une part, à l'applicabilité des différents standards ISO 14000 dans la problématique effet de serre au niveau organisationnel et, d'autre part, à une synthèse d'études de cas (Delaney T., 2001).

L'ISO est ainsi fortement impliquée dans la course à l'établissement de guides méthodologiques normalisés pour mesurer, surveiller et vérifier les émissions de gaz à effet de serre. Mais d'autres organisations (agences gouvernementales, ONG ou syndicats de producteurs) participent également activement à cet objectif.

b) Les guides méthodologiques d'évaluation des émissions

Les guides (ou protocole) d'évaluation des émissions sont des outils, d'une utilisation plus simple, qui fonctionnent sur le principe d'une ACV. Il en existe aujourd'hui un grand nombre qui permettent d'évaluer les émissions effectivement générées par une entreprise puis, le cas échéant, de construire un scénario de référence et un plan de réduction des émissions lorsqu'il existe un objectif d'amélioration. À titre d'illustration, nous allons présenter l'un des derniers-nés de ces guides, le Greenhouse Gas Protocol.

- **Le Greenhouse Gas Protocol (GHP)**

Le WRI (World Resources Institute) et le WBCSD ont uni leurs efforts pour mettre au point un outil visant à aider les entreprises à comptabiliser leurs émissions de gaz à effet de serre (WBCSB & WRI, 2001).

En effet, les guides du GIEC, s'ils sont relativement performants au niveau d'un pays, ne sont pas adaptés au fonctionnement d'une entreprise. Utilisés dans ce cadre, ils ne permettent que le calcul des émissions dites « directes » (fig. 61) et rendent difficile l'évaluation des émissions en amont et en aval qui sont pourtant liées aux différentes opérations (« émissions indirectes »).

Le Greenhouse Gas Protocol

C'est à cette tâche d'harmonisation que se sont attelés bénévolement près de 600 personnalités de nationalités diverses, industriels, fonctionnaires, universitaires, représentants d'associations. Le travail, effectué sous l'égide de l'ONU a pris trois ans. Le résultat est une méthode comptable intitulée « greenhouse gas protocol » qui a été testée chez neuf grandes entreprises volontaires et présentée le 23 octobre dernier [nldr 2001] à Washington au siège du World Resources Institute et trois jours après à Bruxelles. Tout comme les normes de comptabilité financière IAS (international accounting standards) elle sera accessible gratuitement.

Son principe détaillé est déjà décrit sur le site internet qui lui est dédié. L'un des problèmes les plus délicats qui se posent dès le départ est de définir le champ géographique et institutionnel à l'intérieur duquel les émissions vont être comptabilisées. En d'autres termes, de quelles émissions une entreprise donnée doit-elle être tenue comme responsable ou se considérer comme telle ?

Le GGP commence donc par préciser les « frontières organisationnelles » en distinguant l'entreprise elle-même, les filiales qu'elle contrôle (plus de 50 % du capital), les filiales où elle exerce une influence significative (participation de 20 à 50 % au capital) et les autres.

L'entreprise peut alors aboutir à deux types de comptabilisation : un « total sous contrôle » qui comptabilise à 100 % les émissions de l'entreprise, des filiales contrôlées et des filiales sous influence et à 0 % celles des autres ; un « total proportionnel » qui comptabilise les émissions de l'entreprise à 100 % et celles des filiales au prorata de la participation à leur capital. Le premier est sans aucun doute le plus utile pour l'action, mais le second peut amener des réflexions sur de nouveaux types de coopération entre entreprises.

La seconde question immédiate porte sur la nature des émissions à comptabiliser et le GGP distingue ici les émissions directes et indirectes et indique trois niveaux d'intégration.

Le **niveau 1** concerne la production d'électricité, de vapeur et de chaleur sur le site, les consommations des procédés, les transports de matériaux, produits, déchets et personnels effectués, par des véhicules appartenant à l'entreprise et les émissions fugitives (fuites de gaz ou de fluide frigorigène, par exemple).

Au **niveau 2**, on ajoute les émissions correspondant à l'électricité, la vapeur ou la chaleur, achetée par l'entreprise à l'extérieur. Si l'entreprise produit de l'énergie qu'elle vend à l'extérieur, elle ne doit pas soustraire les émissions correspondantes (mais le cas de la cogénération, plus délicat, n'est pas totalement réglé).

Au **niveau 3**, on intègre les émissions consécutives à l'activité de l'entreprise, mais générées par d'autres entreprises : déplacements professionnels et déplacements maison-travail du personnel, transports des matériaux, produits et déchets, sous-traitance, émissions des déchets à l'extérieur du site, émissions lors de l'utilisation des produits fabriqués par l'entreprise, émissions relatives aux matières premières importées. Dans certains secteurs, les émissions liées à l'utilisation ultérieure du produit revêtent une très grande importance, par exemple pour l'électroménager ou l'automobile. Un sèche-linge, par exemple, émet 20 fois plus de gaz carbonique à l'usage que lors de sa fabrication (calcul effectué sur la base du parc de production américain).

Les concepteurs de la méthode recommandent aux entreprises d'effectuer l'intégration au moins jusqu'au niveau 2. Ils reconnaissent que la prise en compte des niveaux 2 et 3 conduit à une double comptabilisation de certaines émissions entre l'entreprise et ses fournisseurs et clients et que celle-ci devra être évitée pour le bon fonctionnement du marché des permis d'émission (la directive européenne IPPC ne tient compte elle aussi que du niveau 1). Cependant, il est indiscutable que les émissions comptabilisées au niveau 2 sont logiquement imputables à l'entreprise qui consomme l'énergie achetée et qu'elle a des moyens d'action directs pour les réduire. Par ailleurs, la prise en compte du niveau 3 peut conduire comme évoqué plus haut à des idées d'actions et de coopérations nouvelles et fructueuses à l'échelle globale, celle de l'effet de serre.

Troisième question essentielle, celle du temps. L'entreprise devra choisir une année de référence pour laquelle elle dispose de toutes les données nécessaires et le GGP indique comment, ensuite, elle pourra tenir compte de ses changements de périmètre ou d'activité. Le reste du document répond à de multiples autres questions : comment identifier les sources, calculer les émissions, les consolider au niveau d'un groupe ; comment contrôler la qualité et la fiabilité des données ; comment les faire contrôler par un organisme extérieur ; comment présenter les résultats.

Extrait d'un article paru dans ENERGIE PLUS, 15 novembre 2001

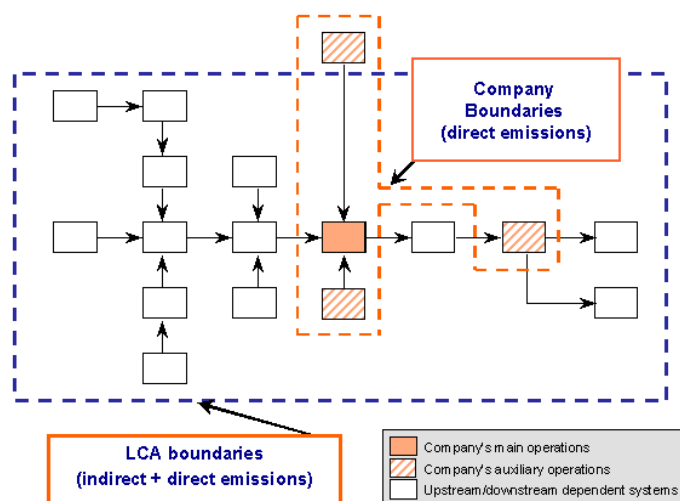


Fig. 61 - Émissions directes et indirectes d'une entreprise (Source : B. Glazebrook, 2001).

La méthode développée dans le Greenhouse Gas Protocol est maintenant largement utilisée. Ainsi, un outil de calcul intitulé CaliGES (Calcul en ligne de Gaz à Effet de Serre) a été développé par la société PricewaterhouseCoopers pour permettre aux entreprises de faire, en ligne, une première évaluation de leurs émissions. Par ailleurs, l'ADEME a confié à Jean-Marc Jancovici, un ingénieur-conseil indépendant, la réalisation d'un outil similaire (voir sur le site : <http://www.manicore.com/>).

Le principe appliqué est exactement celui d'une ACV, à ceci près que seul l'impact « réchauffement global » est pris en compte, c'est-à-dire que la comptabilité des émissions se limite à tout ce qui se rapporte aux gaz à effet de serre, mais seulement à cela. Le risque est donc celui que nous avons déjà mentionné : la création d'une nuisance subséquente d'un autre ordre.

- **Fiabilité des guides méthodologiques d'estimation des émissions de gaz à effet de serre**

L'une des approches possibles pour juger de la fiabilité de ces outils en plein développement est de comparer les résultats obtenus selon l'utilisation de l'un ou l'autre de ces guides. À titre d'illustration, nous allons considérer le cas de l'industrie pétrolière, qui, comme nous l'avons vu (deuxième partie, § 2.2.2.) est un acteur très impliqué dans la course à la réduction des émissions de gaz à effet de serre (Nordrum S. *et al.*, 2002a et 2002b).

L'API (American Petroleum Institute) a été à l'initiative de la création d'un groupe de travail (API Compendium) pour examiner les différentes méthodologies existant à l'heure actuelle pouvant être utilisées pour mesurer les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur pétrolier. Pour prendre connaissance de façon plus détaillée des méthodes adoptées pour la comparaison, on pourra se référer à une récente publication de l'API (Ritter K. *et al.*, 2002). Outre son propre outil, ont été étudiés les guides ci-dessous :

- Canadian Association of Petroleum Producers (CAPP), Global Climate Change Voluntary Challenge Guide ;
- Canadian Industrial Energy End-Use Data and Analysis Centre (CIEEDAC) ;
- Exploration and Production Forum (E&P Forum), Methods for Estimating Atmospheric Emissions from E&P Operations;
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories ;
- Regional Ass. of Oil and Natural Gas Cies in Latin America and the Caribbean (ARPEL), Atmospheric Emissions Inventories Methodologies in the Petroleum Industry ;
- UK Emissions Trading Scheme (UK ETS) ;
- U.S. EPA, Emission Inventory Improvement Program (EIIP) ;
- World Resources Institute/World Business Council for Sustainable Development (WRI/WBCSD), Greenhouse Gas Protocol.

Les résultats des comparaisons montrent comment peuvent apparaître de fortes disparités, allant jusqu'à 40 % des émissions totales, sur l'évaluation des émissions lorsqu'on se base sur différentes méthodologies (fig. 62). Ces différences proviennent

du fait que certaines sources d'émission ne sont pas prises en compte, ou le sont de façon différente d'un guide à l'autre. Ces comparaisons quantitatives mettent le doigt sur certaines lacunes et permettent une amélioration continue de ces outils.

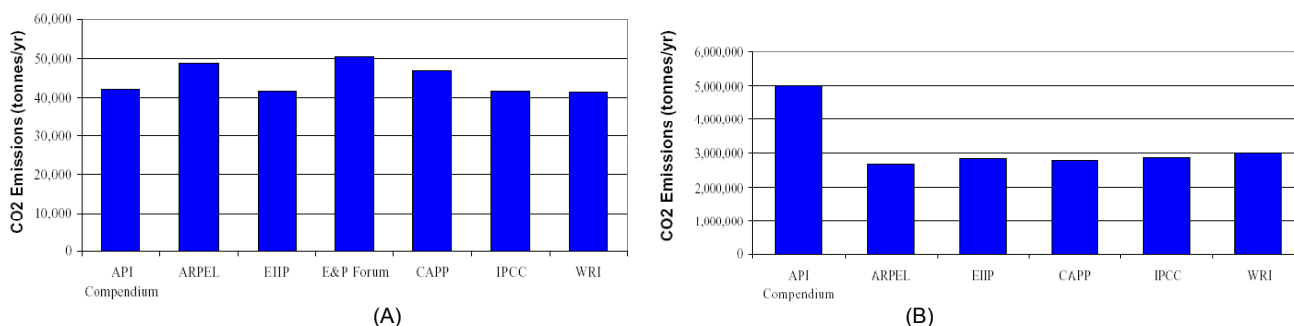


Fig. 62 - Émissions de CO₂ estimées par différents guides méthodologiques dans le cas : (A) d'un champ de production pétrolier (320 puits, 6 100 barils/jour) et (B) d'une raffinerie traitant 250 000 barils/jour (source : Ritter K. et al., 2002).

L'évaluation rigoureuse des émissions de GES constitue l'une des principales pierres d'achoppement du dossier « changement climatique ». Les outils développés par le GIEC et la CCNUCC ont déjà permis des progrès notables dans la réalisation des inventaires nationaux (voir première partie - § 2.2.3. et 2.2.4.). En revanche, l'évaluation des émissions et la définition des procédures de contrôle au niveau des projets ou des entreprises est un domaine qui accuse encore d'importantes lacunes. Une dynamique est en place comme en témoigne la multiplication des publications sur cette problématique et le développement de sessions dédiées dans les grandes conférences* relatives au changement climatique.

* Par exemple, l'*International Emission Inventory conference* ou la session « Technology/Systems for the Measurement, Monitoring and Verification of Carbon Emissions » de la *Second National Conference on Carbon Sequestration*.

Conclusion

Malgré les espoirs fondés par certains sur l'issue de la Conférence de Johannesburg de 2002, le Protocole de Kyoto n'est, à ce jour, toujours pas entré en vigueur. Pourtant, s'il a le mérite de fixer des objectifs contraignants qui doivent permettre d'impulser des changements dans nos façons de produire et de consommer, il ne peut être qu'une première étape pour la réduction des émissions des gaz à effet de serre et des objectifs plus vastes à long terme seront nécessaires. Il revient à la communauté internationale et plus particulièrement les pays du Nord, qui, s'ils sont les premiers responsables, sont clairement les mieux armés pour agir, de développer une gamme complète de moyens pour réduire et maîtriser les teneurs atmosphériques de CO₂ ou du moins rompre leur progression exponentielle.

Les changements d'affectation des terres et l'utilisation des combustibles fossiles constituant ensemble l'écrasante majorité des émissions anthropiques de CO₂, les principales mesures de lutte contre le changement climatique relèvent de ces deux domaines.

Les mesures peuvent être préventives et leur évaluation s'opère ainsi en terme de « CO₂ évité » : il s'agit principalement de réduire la consommation d'énergie et d'améliorer l'efficacité dans la conversion ou l'utilisation de l'énergie ; d'opérer un transfert depuis des énergies fortement émettrices de CO₂ à des énergies générant peu ou quasiment pas d'émissions (énergies renouvelables) ; d'agir dans le domaine de l'utilisation des terres pour limiter les émissions propres de ce secteur (c'est-à-dire de conserver les stocks existants de carbone) ou celles dues aux à l'utilisation des combustibles fossiles (substitution énergétique ou matériaux).

Il est également possible d'agir en aval sur les émissions que l'on n'est pas en mesure d'éviter grâce à des mesures que l'on pourrait qualifier de curatives. Ces mesures que l'on évalue en terme de « CO₂ séquestré » ou de « CO₂ fixé » visent à augmenter les réserves de carbone organique des forêts, des sols et des océans (séquestration dans la biomasse) ou à capturer puis stocker le flux de CO₂ issus de sources concentrées.

L'étendue que peut prendre le recours à l'une ou l'autre de ces mesures dépend de nombreux facteurs incluant les objectifs des réduction des émissions, les coûts, les ressources énergétiques disponibles, les impacts environnementaux ainsi que des facteurs sociaux.

Les mesures sur les forêts

Dans le dossier du changement climatique, le rôle des forêts est loin d'être négligeable. Elles contribuent fortement aux émissions de CO₂ lorsqu'elles sont détruites ou endommagées que cela soit dû à des facteurs naturels ou anthropiques. En revanche, lorsqu'elles sont gérées de façon durable, elles peuvent représenter un service important en matière de lutte contre l'augmentation de l'effet de serre en éliminant une partie du carbone présent dans l'atmosphère et en le stockant dans la biomasse et les sols. D'autre part, les produits ligneux peuvent offrir une alternative intéressante aux combustibles fossiles sans impact négatif sur l'environnement.

La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et le Protocole de Kyoto confirment ce rôle des forêts. Cependant, les négociations internationales sur le changement climatique relatives aux forêts sont loin d'être terminées et évoluent rapidement. La durabilité et l'évaluation de l'impact des projets forestiers suscitent encore de nombreuses questions. Certains sont sceptiques et font valoir que le puits biosphérique présente des risques dans le sens où, à la suite de perturbations trop importantes, les écosystèmes terrestres et les sols en particulier pourraient, à moyen terme, devenir des sources de CO₂. Au-delà de cette question sujette à débat, il apparaît que, de toutes les actions possibles, ce sont surtout les activités de conservation des stocks de carbone qui constitueraient la stratégie la plus efficace contre le changement climatique.

Pour ce qui concerne plus spécifiquement le rôle donné à la foresterie dans le cadre du Mécanisme de Développement Propre (MDP) prévu dans le Protocole de Kyoto, on constate également d'importantes divergences d'opinions. Les détracteurs de l'inclusion de la foresterie estiment que les mesures visant à encourager la fixation du carbone risquent de conduire à des investissements excessifs dans des activités forestières à l'échelle industrielle, ce qui pourrait porter atteinte à la biodiversité et avoir un impact négatif sur le plan social. Les partisans arguent au contraire que le MDP est l'instrument privilégié pour concilier lutte contre le changement climatique et développement durable. Le surcroît de valeur économique qui serait attribué aux forêts grâce aux projets réalisés pourrait relancer les efforts d'aménagement des forêts. Quoiqu'il en soit, les pays en développement espèrent beaucoup de la mise en œuvre de ce mécanisme, en termes de transfert de fonds et de technologies.

Mesures préventives sur l'énergie

La problématique de l'énergie reste cependant la question centrale du dossier du changement climatique puisque la part des émissions dues à l'utilisation des combustibles fossiles est en augmentation constante et représente aujourd'hui 80 % des émissions mondiales de CO₂.

Augmenter la part des énergies non fossiles permettrait de diminuer d'autant les émissions liées à la consommation d'énergie. Cependant, l'étendue que peut prendre ce type de mesures est influencée par de nombreux facteurs qui vont bien au-delà de leurs strictes performances techniques.

Pour ce qui concerne le nucléaire, la Conférence des Parties de Bonn (COP 6-bis) demandent aux pays de s'abstenir d'utiliser des unités de réduction des émissions générées par ce type d'installation pour remplir leurs engagements. En revanche, les pays peuvent utiliser ce moyen dans le cadre de leur politique domestique pour limiter leurs émissions nationales et atteindre les objectifs de Kyoto. Le choix très marqué du nucléaire en France, bien qu'ayant été réalisé dans un souci d'indépendance énergétique indépendamment de considérations liées aux émissions de CO₂, permet aujourd'hui à notre pays d'être en très bonne place parmi nos partenaires européens. Mais pour ce qui concerne les décennies à venir, il est aujourd'hui difficile d'identifier clairement la position des gouvernements à ce sujet. Le développement du nucléaire comme réponse au changement climatique est une question qui soulève en effet de nombreuses controverses où la perception du citoyen tient une place prépondérante.

Les énergies renouvelables ne possèdent pas un tel handicap mais la marge de manœuvre est moins importante du fait des objectifs de production à réaliser. Le développement des énergies renouvelables en Europe est l'un des piliers de la politique de l'Union en terme de lutte contre le changement climatique. La directive européenne de 2001 relative à la promotion de l'électricité produite à partir de sources d'énergies renouvelables sur le marché intérieur de l'électricité qui prévoit d'accroître la part des énergies renouvelable de 6 % actuellement à 12 % dans la consommation d'énergie en Europe est l'un des instruments phares de cette politique. Des difficultés sont cependant à craindre dans sa mise en application. En effet, bien que bénéficiant globalement d'une opinion publique favorable, le développement effectif des énergies renouvelables se heurte de façon récurrente au phénomène du NIMBY (not in my backyard) qui se traduit par un rejet des populations locales comme, par exemple, pour les champs d'éoliennes.

Le transfert vers des énergies plus pauvres en carbone donc générant moins d'émissions de CO₂ est une solution intermédiaire qui est aujourd'hui largement mise en application. Le remplacement du charbon par du gaz naturel s'accompagne par exemple d'une importante réduction des émissions de CO₂. Il faut savoir que le gaz naturel est une ressource fossile plus difficile à exploiter et à transporter que le pétrole brut. Pour cette raison, le marché du gaz est resté longtemps limité et l'industrie pétrolière avait souvent recours au brûlage en torche (flaring) dans les opérations d'exploitation. Aujourd'hui, dans une conjoncture économique plus favorable et grâce à une meilleure intégration de la dimension environnementale, le gaz naturel est de plus en plus valorisé commercialement. Il pénètre progressivement tous les secteurs de consommation énergétique que ce soit la production de chaleur ou, plus récemment, les transports. Toutefois, le secteur d'expansion le plus significatif est la production d'électricité. Ainsi, pour l'ensemble des nouvelles centrales, il domine les autres combustibles et représente, pour l'année 2000, deux tiers des projets réalisés.

Au delà du choix du type d'énergie, une maîtrise de la demande apparaît essentielle. De très gros progrès peuvent être réalisés dans le domaine des économies d'énergies ou de l'amélioration de l'efficacité énergétique. S'il en est besoin, les projets réalisés dans le cadre de la phase pilote de mise en œuvre conjointe (précurseur des mécanismes de projets) et notamment les quantités estimées de « CO₂ évité » par ce biais sont la démonstration du fort potentiel de ce type d'actions. Les objectifs ambitieux des plans de réduction d'émissions des entreprises (accords volontaires) qui reposent en grande partie sur ces mesures montrent également que la marge de manœuvre est importante dans ce domaine. Il est évident que ces mesures possèdent un bon rapport coût/efficacité qui leur vaut d'ailleurs d'être baptisées mesures « sans regret » dans le Plan National français de Lutte contre le Changement Climatique (PNLCC).

Ce sont les pays développés qui sont les premiers concernés par ce type de mesures. Ils disposent d'une énergie abondante et facile, ce qui occasionne de nombreux gaspillages. La sobriété énergétique doit être l'objectif premier notamment en s'orientant vers une économie moins consommatrice de matières et plus riche en services comme le préconise le PNLCC. Selon les termes de ce dernier, il sera nécessaire dans l'avenir de « *vendre non seulement de l'énergie, des transports et du bâtiment, mais aussi les moyens d'en user plus modérément. L'enjeu d'une telle évolution dépasse de très loin les seuls pays industrialisés. Parmi les « transferts de*

technologie » qui seront nécessaires vis-à-vis des pays en développement, cette ingénierie de services jouera à l'avenir un rôle essentiel ».

Les mesures de capture et de stockage du CO₂

Les technologies sont d'ores et déjà disponibles pour capturer et stocker du CO₂ dans le sous-sol et diverses expériences, parfois anciennes, menées à travers le monde ont montré que la séquestration géologique du CO₂ était bel et bien réalisable, une idée également confortée par l'existence de nombreux gisements naturels de CO₂. Cependant, ce n'est que récemment que cette option a été sérieusement considérée comme méthode potentielle de réduction des émissions de CO₂ dans l'atmosphère. Son importance tient dans un double constat : (1) les combustibles fossiles, qui sont les plus accessibles des sources d'énergie disponibles, dominent aujourd'hui très largement le paysage énergétique (85 % des besoins commerciaux en énergie au niveau mondial sont délivrés par les combustibles fossiles) et (2) la demande en énergie primaire des pays en développement devrait être multipliée par un facteur 3 à 5 d'ici 2050. Quelle que soit l'opinion que l'on puisse avoir à ce sujet, il apparaît donc peu réaliste de croire à un recul des énergies fossiles à court terme qui serait suffisamment important pour ramener le CO₂ atmosphérique à des teneurs sans incidence sur le climat. L'option de « décarbonisation » des combustibles fossiles avec capture et stockage du CO₂ - qui relève du concept dit de « zéro émission » - apparaît pour beaucoup séduisante dans le sens où elle permet de concilier développement économique et lutte contre le changement climatique.

L'enjeu est considérable, tout particulièrement au regard du charbon puisque le principal frein à son développement réside dans son potentiel de nuisance sur l'environnement, notamment en terme de changement climatique. En parvenant à diminuer, voire à supprimer, les émissions de CO₂ liées à ce combustible, il pourrait retrouver ses lettres de noblesse et faciliter considérablement l'accession au développement des pays les plus pauvres. On doit aussi considérer les énergies non conventionnelles (huiles lourdes et extra-lourdes, bitumes, schistes bitumineux, hydrates de gaz) qui ont un potentiel énorme en terme de quantités disponibles et qui présentent l'avantage d'une répartition mondiale plus équilibrée que ne le font les ressources conventionnelles. Grâce à ce concept de décarbonisation, elles pourraient également accéder à une place de choix et répondre au problème de l'épuisement des réserves de pétrole et de gaz naturel auquel nous serons confrontés à plus ou moins brèves échéances.

Par ailleurs, la décarbonisation de combustibles fossiles et production associée d'hydrogène ouvre également la voie à des économies d'émissions considérables. Nouveau vecteur énergétique, l'hydrogène pourrait en effet alimenter des unités de tailles plus réduites, voire être utilisé à l'échelle domestique, où la récupération des effluents n'est pas envisageable (quantité et concentrations trop limitées en CO₂). La décarbonisation couplée à l'utilisation de piles à hydrogène constitue donc peut-être, aux côtés des énergies renouvelables, l'une des solutions énergétiques des prochaines décennies.

Pour le moment, l'option de capture et stockage du CO₂ pourrait d'ores et déjà s'appliquer aux centrales de production d'énergie (charbon et gaz principalement) qui représentent à elles seules près d'un tiers des émissions mondiales de CO₂ anthropique. Cependant, elle pourrait également être avantageusement mise en œuvre

dans d'autres types d'installations industrielles. Dans la production d'azote ou le traitement du gaz naturel par exemple, les procédés impliqués nécessitent déjà une séparation du CO₂. La plupart de ce CO₂ est, pour le moment, renvoyé dans l'atmosphère et pourrait donc être facilement récupéré à des fins de stockage.

Cependant, de nombreux problèmes doivent encore être résolus avant de pouvoir affirmer que cette stratégie peut être généralisée et devenir un instrument efficace de lutte contre le changement climatique.

Comme on l'a vu, l'intégration des projets forestiers dans le MDP se heurte aux problèmes de fuites (leakage) et de non permanence qui induisent des difficultés dans la définition des directives pour mesurer et contrôler les quantités de « CO₂ séquestré » ou de « CO₂ évité » et donc dans l'octroi de crédits d'émission. Afin d'éviter que des problèmes du même ordre ne se posent dans l'avenir pour la séquestration du CO₂ des sources concentrées, de gros efforts en matière de recherche et développement et une très étroite coopération internationale sont indispensables. La politique de l'UE en matière de R&D met en bonne place les projets sur la capture et la séquestration du CO₂ notamment dans le 6^e Programme Cadre de Recherche et Développement (PCRD). Par ailleurs, la mise en place de « l'Espace Européen de la Recherche » devrait stimuler et favoriser une meilleure synergie des compétences.

Le stockage par injection dans l'océan profond qui consiste à accélérer un processus naturel est une option intellectuellement satisfaisante. Cependant, en raison de ses impacts potentiels sur les écosystèmes marins, cette option rencontre un écho très défavorable de la part du public qui rend peu probable son développement futur comme stratégie de lutte contre le changement climatique.

En revanche, la multiplication de projets pilotes avec des premiers résultats encourageants font de l'alternative géologique une solution très prometteuse pour l'avenir. Elle tient en trois options : les réservoirs d'hydrocarbures (gaz et pétrole) qui ne sont plus productifs ou en phase de déclin ; les veines de charbon non exploitables et les aquifères profonds. Dans les deux premières, l'injection de CO₂ se solde par la récupération d'un produit valorisable commercialement ce qui permet de compenser tout ou partie des coûts de capture et séquestration. En marge des méthodes de séquestration par injection dans le sous-sol ou l'océan pour lesquels, même si de nombreuses incertitudes demeurent, de grandes avancées ont d'ores et déjà été réalisées, il existe d'autres concepts, encore embryonnaires, qui pourraient être amenés à se développer à moyen terme. Un intérêt croissant est notamment porté aux processus chimiques et biogéochimiques dans la conversion du CO₂ en produits stables et/ou valorisables (eg. carbonates, méthane).

Bien qu'il existe de fortes incertitudes quant aux capacités exactes de stockage des principales options de séquestration, il demeure un point essentiel : les potentiels sont très importants et pourraient couvrir largement les objectifs visés dans la lutte contre le réchauffement climatique.

Le principal frein au développement de ces mesures reste aujourd'hui les coûts impliqués qui sont élevés même lorsqu'il existe une valeur ajoutée à l'opération de séquestration. Outre une baisse des coûts de capture qui constituent la principale pierre d'achoppement mais pour lesquels d'importants progrès technologiques peuvent

encore être réalisés, des mesures politiques incitatives ou répressives pourraient nettement favoriser la pénétration des méthodes de séquestration.

Certains redoutent que le recours à la séquestration, que ce soit dans le domaine de la foresterie ou du stockage de CO₂ dans le sous sol, comme moyen d'atteindre les objectifs de réduction des émissions ne s'effectue au détriment des mesures préventives visant à réduire les émissions à la source. Des procédures strictes de contrôle au niveau des projets ou des entreprises semblent nécessaires. Dans le même temps, d'importantes avancées devront être réalisées dans l'évaluation rigoureuse des émissions, un domaine en forte progression mais qui accuse encore d'importantes lacunes.

Il est clair aujourd'hui que ce n'est qu'en associant prévention et traitement ou, en d'autres termes, en cumulant « CO₂ évité » et « CO₂ séquestré » que l'on pourra espérer atteindre une stabilisation des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère et écarter ainsi le risque d'un bouleversement climatique de grande ampleur.

Remerciements

L'écriture de ce rapport a bénéficié de l'aide d'un grand nombre de personnes qui sont ici remerciées pour leurs conseils et les documents qu'elles ont mis à ma disposition et tout particulièrement Mathieu Glachant (ENSMP), Estelle Vial (Pricewaterhouse Coppers), Carole Mégevand (Eco Carbone), Anne-Christine Aycaguer (BP) et Jean-Marc Jancovinci.

Ce manuscrit a bénéficié de la relecture attentive de Philippe Jean-Baptiste (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, CEA). Qu'il soit ici remercié pour le temps qu'il y a consacré. Ses remarques et corrections ont permis d'améliorer la qualité de ce rapport.

Je tiens également à remercier toute l'équipe de l'ISIGE ainsi qu'Isabelle Czernichowski, Christian Fouillac et André Levassor qui ont encadré la mission professionnelle réalisée au BRGM dans le cadre du Mastère Ingénierie et Gestion de l'Environnement.

Enfin, je trouve ici l'occasion d'exprimer toute ma gratitude à Jacques Boulègue et Marc Javoy de l'Institut de Physique du Globe de Paris. C'est aux conseils et au soutien reçus de leur part que je dois aujourd'hui la pleine réalisation de mon projet professionnel.

Bibliographie

- Adams E.E., Caulfield A.J., Herzog H.J., Auerbach D.I. (1997) - 'Impacts of reduced pH from ocean CO₂ disposal: sensitivity of zooplankton mortality to model parameters' Waste Management 17: p. 375-380.
- AED (2002) - « Le site sur les changements climatiques » : <http://www.aed-dmf.com/climat/pro/geolo.htm>
- AGA (American Gas Association) (1999) - Survey of underground storage of natural gas in the United States and Canada. Catalog No. XU9901, Washington, D.C., U.S.A.
- Arnold F.H. *et al.* (2000) - www.che.caltech.edu/faculty/fha
- Austin, D., Goldemberg J., Parker G. (1998) - Contributions to Climate Change: Are Conventional Metrics Misleading the Debate? <http://www.wri.org/cpi/notes/metrics.html>
- Aycaguer A.Ch., Lev-On M., Winer A.M. (2001) - Reducing Carbon Dioxide Emissions with Enhanced Oil Recovery Projects: A Life Cycle Assessment Approach. Energy & Fuels 2001, 15, p. 303-308.
- Bacastow R.B., Dewey R.K. (1996) - 'Effectiveness of CO₂ sequestration in the post-industrial ocean' Energy Convers. Mgmt. 37: p. 1079-1086.
- Barns D.W., Edmonds J.A. (1990) - An evaluation of the relationship between the production and use of energy and atmospheric methane emissions. U.S. Department of Energy, Washington D.C., DOE/NBB-0088P.
- Batjes N.H. (1999) - Management options for reducing CO₂ concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil. Report n° 410 200 031 (1999), Dutch National Research Program on Global Air pollution and Climate Change.
- Bass S., Dubois O., Moura Costa P., Pinard M., Tipper R., Wilson C. (2000) - Rural livelihood and carbon management. IIED Natural Resources Issues Paper No. 1. IIED, Londres.
- Baumer M. (1987) - Agroforesterie et Desertification. ICRAF/CTA.
- Beecy D.J., Ferrell F.M., Carey J.K. (2000) - "The Potential Role of Geologic Storage and Carbon Dioxide in a Sustainable Fossil Fuels Future," Preprints, vol. 45, No. 4, p. 777-781, ACS National Meeting, Washington, D.C., Aug. 23, 2000.

- Beecy D. J., Ferrell F. M., Carey J. K. (2001) - Biogenic Methane: A Long-Term CO₂ Recycle Concept. Proceedings of the First National Conference on Carbon sequestration.
http://www.fetc.doe.gov/publications/proceedings/01/carbon_seq/5a1.pdf
- Benson R., Davis T. (1999) - 4-D, 3-C seismic put to task in CO₂ huff-and-puff pilot. American Oil and Gas Reporter, February, p. 87-94.
- Berner E.K., Berner R.A. (1996) - Global Environment. Prentice-Hall, Upper Saddle River, 2^e éd., 365 p.
- Bilbaut F. (2002) - Hydrates de méthane : vers une ré-évaluation du risque de changement climatique ?, *Environnement et Techniques*, mai 2002, n° 216.
- Blok K., Williams R.H., Katofsky R.E., Hendriks C.A. (1997) - Hydrogen production from natural gas, sequestration of recovered CO₂ in depleted gas wells and enhanced natural gas recovery, *Energy*, 22(2,3), p. 161-168.
- Bond G.M., Egeland G., Brandvold D.K., Medina M.G., Stringer J. (1999) - "Enzymatic Catalysis and CO₂ Sequestration". *World Resource Review*, vol. 11, no. 4, p. 603-619.
- Bond G.M., Stringer J., Brandvold D.K., Sinsek F.A., Medina M., Egeland G. (2000) - "Development of Integrated System for Biomimetic CO₂ Sequestration Using the Enzyme Carbonic Anhydrase" in ACS Preprints, Division of Fuel Chemistry, vol. 45, No. 4, p. 713, 220th ACS Natl. Meeting, Aug. 23, 2000, Washington, D.C.
- Bourques P.A. (1997-2001) -
<http://www.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/rechauffement.planetaire.html>
- Brady K. (2000) - LCA and Global Climate Change - Solving the Measurement Puzzle. International Conference & Exhibition on Life Cycle Assessment: Tools for Sustainability. April 25-27, 2000, Arlington, Virginia.
<http://www.iere.org/InLCA/session1.htm>
- Brodhag Ch. (2001) - Glossaire du Mécanisme pour un développement propre : traductions anglais/français et définitions. <http://www.agora21.org/bibliotheque.html>
- Brown S., Sathaye J., Cannel M., Kauppi P. (1996) - Management of forests for mitigation of greenhouse gas emissions. In R.T. Watson, M.C. Zinyowera et R.H. Moss, édés. Climate change 1995, impacts, adaptations and mitigation of climate change: scientific-technical analyses. Report of Working Group II, Assessment Report, IPCC, p. 773-797. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni.
- Budwill K., Beaton A., Bustin M., Muehlenbachs K., Gunter W.D. (2002) - Methanogenic Activity on Coal and Sequestered CO₂ for Enhanced Coalbed Methane Recovery. Proceedings of GHGT-6. <http://www.rite.or.jp/GHGT6/>.
- CCE (1996) - Livre vert pour une stratégie communautaire. Énergie pour l'avenir : les sources d'énergie renouvelables. COM (96) 576, Nov. 1996.
<http://europa.eu.int/en/record/green/gp9611/ensumfr.htm>

- CCE (1999) - Communication de la Commission au Conseil et au Parlement européen – « Préparation de la mise en œuvre du Protocole de Kyoto ». COM(1999)230, du 19 mai 1999.
- CCE (2000a) - Annonce du lancement du Programme européen sur le changement climatique.
http://www.environment.fgov.be/Root/tasks/atmosphere/klim/pub/eu/com/00-87&88pers_fr.pdf
- CCE (2000b) - Livre vert sur l'établissement dans l'Union européenne d'un système d'échange de droits d'émission des gaz à effet de serre (Bruxelles, le 8.3.2000).
http://europa.eu.int/eur-lex/fr/com/gpr/2000/com2000_0087fr01.pdf
- CCE (2001a) - Livre vert. Vers une stratégie européenne de sécurité d'approvisionnement énergétique (COM 2000 0769 (01)). Luxembourg : Office des publications officielles des Communautés européennes. 111 p. - 21 x 29,7 cm. ISBN 92-894-0320-9.
http://europa.eu.int/eur-lex/fr/com/gpr/2000/com2000_0769fr.html
ou http://europa.eu.int/comm/energy_transport/fr/lpi_lv_fr1.html.
- CCE (2001b) - Communication de la Commission sur la mise en œuvre de la première étape du programme européen sur le changement climatique. Bruxelles, le 23.10.2001 COM(2001) 580 final.
http://europa.eu.int/eur-lex/fr/com/pdf/2001/com2001_0580fr01.pdf
- CCE (2001c) - Livre Blanc - La politique européenne des transports à l'horizon 2010 : l'heure des choix. COM 2001 0370 (01). Luxembourg: Office des publications officielles des Communautés européennes. 128 p. - 21 x 29,7 cm. ISBN 92-894-0342-X.
Disponible sur : http://europa.eu.int/eur-lex/fr/com/wpr/2001/com2001_0370fr.html
ou http://europa.eu.int/comm/energy_transport/fr/lb_fr.html
- CCE (2001d) - Rapport de la Commission au Parlement européen et au Conseil au titre de la décision 93/389/CEE du Conseil, modifiée par la décision 99/296/CE relative à un mécanisme de surveillance des émissions de CO₂ et des autres gaz à effet de serre dans la Communauté. Bruxelles, le 30 novembre 2001, COM(2001) 708 final.
- Chisholm S. W. (1992) - "What Limits Phytoplankton Growth?" *Oceanus* 35 (3): p. 36-46.
- CITEPA (2000) - Calcul des émissions dans l'air: principes méthodologiques généraux, 30 mai 2000.
- CITEPA (2001a) - Inventaire des émissions de gaz à effet de serre en France au titre de la Convention cadre des Nations Unies sur le changement climatique. Réf. CITEPA 492 / Convention MATE 26 / 2001 décembre 2001.
- CITEPA (2001b) - Lutte contre l'effet de serre : où en est-on ? Rapports d'inventaire (1990-1999) de l'Agence Européenne de l'Environnement et de l'Environment Protection Agency (USA), CITEPA – Études Documentaires n° 140 (DQC – septembre 2001).

- CITEPA (2002) - Émissions dans l'air en France, métropole. Substances impliquées dans le phénomène d'accroissement de l'effet de serre (mise à jour 18 avril 2002). http://www.citepa.org/emissions/nationale/Ges/Emissions_FRmt_GES_avr02.pdf
- Chadwick A., Holloway S., Riley N. (2001) - Deep subsurface CO₂ sequestration - a viable greenhouse mitigation strategy. *Geoscientist*, vol. 11, No 2, Feb. 2001, p. 4-5.
- CLIMAP (1981) - Seasonal reconstructions of the Earth's surface at the Last Glacial maximum. *Geol. Soc. Am. Map Chart Ser. MC-36*.
- Coale K.H., Johnson K.S., Fitzwater S.E., Gordon R.M., Tanner S., Chavez F.P., Ferioli L., Sakamoto C., Rogers P., Millero F., Steinberg P., Nightingale P., Cooper D., Cochlan W.P., Landry M.R., Constantinou J., Rollwagen G., Trasvina A., Kudela R. (1996) - 'A massive phytoplankton bloom induced by an ecosystem scale iron fertilisation experiment in the equatorial Pacific Ocean' *Nature* 383: p. 495-501.
- Commission AMPERE (2000) - Rapport de la Commission pour l'Analyse des Modes de Production de l'Électricité et le Redéploiement des Énergies (AMPERE) au Secrétaire d'État à l'Énergie et au Développement durable (Belgique). http://mineco.fgov.be/energy/index_fr.htm
- Cornut P. (1999) - Procédure de contrôle et de certification dans le cadre du MDP. Fiche n° 5 d'une série de 30 fiches réalisées pour le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement - 1999 et 2000. <http://atlas.conseil.free.fr/cadres.html>
- Cox P.M., Betts R.A., Jones C.D., Spall S.A., Totterdell I.J. (2000) - Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 408, p. 184-187.
- Delaney T. (1999) - Application of environmental management standards to climate change. *First Environment*. <http://www.ghgprotocol.org/docs/application.pdf>.
- Delaney T. (2000) - ISO 14000 Series of Standards and their application to Global Climate Change. Presented to the Canadian Bar Association Continuing Legal Education Committee. <http://www.ghgprotocol.org/docs/iso1400.ppt>
- Delaney T. (2001) - Climate Change and ISO Activities. Presented to the SES Conference, August 13, 2001. <http://www.ses-standards.org/library/01proceedings/DelaneyBT.pdf>
- Deneux, M. (2002) - L'évaluation de l'ampleur des changements climatiques, de leurs causes et de leur impact prévisible sur la géographie de la France à l'horizon 2025, 2050 et 2100 - Rapport de M. Marcel Deneux, sénateur (13 février 2002) - Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, rapport d'information 224. Tome I : Rapport : <http://www.senat.fr/rap/r01-224-1/r01-224-1.html>. Tome II : Auditions : <http://www.senat.fr/rap/r01-224-2/r01-224-2.html>
- DGEMP (1999) - Les scénarii énergétiques mondiaux à l'horizon 2020 : analyse comparative. http://www.industrie.gouv.fr/energie/prospect/f1e_pros.htm

- Dixon R.K., Andrasko K.J., Sussman F.G., Lavinson M.A., Trexler M.C., Vinson T.S. (1993) - Forest sector carbon offset projects: near-term opportunities to mitigate greenhouse gas emissions. *Water, Air, and Soil Pollution*, 70: p. 561-577.
- Dixon R.K. (1999) - The U.N. Framework Convention on Climate Change. Activities Implemented Jointly (AIJ) Pilot: Experiences and Lessons learned. Kluwer Academic Publishers. Pays-Bas. 422 p.
- Doctor D., Molburg J.C., Brockmeier N.F., Thimmapuram P. (2001) - Transporting Carbon Dioxide Recovered from Fossil-Energy Cycles. In Proceedings of the 5th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, ed. Williams D, Durie B, Mc Mullan P., Paulson C & Smith A, p. 567-571, Collingwood, Australia, CSIRO.
- DOE (U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy) (1999a) - Carbon Sequestration - Research and Development. U.S. Department of Energy, December 1999 Report. http://www.fe.doe.gov/coal_power/sequestration/reports/rd/index.shtml
- DOE (1999b) - Environmental benefits of advanced Oil and Gas Exploration and Production Technology, Washington, D.C., October 1999.
- DOE & DOA (1998) - Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus. NREL/SR-580-24089 UC Category 1503. A Joint Study Sponsored by: U.S. Department of Agriculture and U.S. Department of Energy, Final Report, May 1998. http://www.ott.doe.gov/biofuels/lifecycle_pdf.html
- Douglas B.C. (1997) - Global sea level rise: a redetermination. *Surv. Geophys.* 18, p. 279-292.
- Drange H., Haugan P.M. (1992) - 'Carbon dioxide sequestration in the deep ocean: the possibility of injection in shallow water' *Energy Convers. Mgmt.* 33, p. 697-704.
- Duclerc S. (2002) - Séquestration géologique du CO₂ et analogues naturels : l'exemple des gisements de Bravo Dome (USA) et Caroline (Australie). Rapport de Maîtrise, Université de Nantes, juin 2002.
- Dufresne J.L., Friedlingstein P., Berthelot M., Bopp L., Ciais P., Fairhead L., Le Treut H., Monfray P. (2002) - Effects of climate change due to CO₂ increase on land and ocean carbon uptake. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (10).
- Duplessy J.C. (2001) - État des connaissances et incertitudes sur le changement climatique induit par les activités humaines; Scientific basis and uncertainties of human induced climate change, Comptes-rendus de l'Académie des Sciences – série IIA. *Eath and Planetary Science*, vol. 333, Issue 12, p. 765-773.
- Dyson F.J. (1977) - Can we control the carbon dioxide in the atmosphere? *Energy*, 2: p. 287-291.

- EEA (1999) - L'environnement dans l'Union européenne à l'aube du XXI^{ème} siècle, Environmental assessment report No 2 Prepared in collaboration with a large number of individuals in EEA, EIONET and other institutions. Published by EEA (European Environment Agency) , 446 p.
<http://reports.eea.eu.int/92-9157-202-0/fr/eu98fr.pdf>
- EEA (2001) - Annual European Community Greenhouse Gas Inventory 1990-1999, Submission to the Secretariat of the UNFCCC, Technical Report, April 2001, European Environment Agency.
- EEA (2002a) - "Environmental signals 2002".
http://reports.eea.eu.int/environmental_assessment_report_2002_9/en
- EEA (2002b) - Energy and environment in the European Union : Environmental issue report No 31. Prepared by: AEA Technology Environment, Published by EEA (European Environment Agency), 68 p.
http://reports.eea.eu.int/environmental_issue_report_2002_31/en/eni-env.pdf
- Falkowski D.G. (1997) - 'Evolution of the nitrogen cycle and its influence on the biological sequestration of CO₂ in the ocean'. *Nature* 387: p. 272-274.
- Falloux F. (1998) - De nouvelles perspectives pour l'Afrique après la Conférence de Kyoto. *Le Courrier de l'Environnement*. 34, INRA Éd.
- FAO (2001) - Situation des forêts du monde. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome 2001
<http://www.fao.org/docrep/003/y0900f/y0900f00.htm>
- FAO (2002) - Département des forêts. Programme forêts et changement climatique les instruments de la convention-cadre sur les changements climatiques et leur potentiel pour le développement durable de l'Afrique. Mars 2002. Document de travail. FOPW/02/1. <http://www.fao.org/DOCREP/004/Y4000F/Y4000F00.HTM>
- Ferry J.G. (1992) - "Biochemistry of methanogenesis," *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology*, vol. 27(6), p. 473-503.
- Fuhrman J.A., Capone D.G. (1991) - Possible biogeochemical consequences of ocean fertilisation. *Limnol. Oceanogr.*, 36, p. 1951-1959.
- Furuholt E. (2002) - Life cycle analysis as basis for evaluating environmental impacts of energy production. Pges 103-110 dans « Externalities and Energy Policy : The Life Cycle Analysis Approach » : Workshop proceedings, Paris, France, 15-16 novembre 2001 (OCDE & Nuclear Energy Agency) - ISBN 92-64-18481-3.
<http://www.nea.fr/html/ndd/reports/2002/nea3676-externalities.pdf>
- GIEC (1996a) - Climate Change 1995. Impacts. Adaptation and Mitigation of Climate Change : Scientific-Technical Analyses.
- GIEC (1996b) - Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Lignes directrices révisées du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre). <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.htm>

- GIEC (2000a) - Land use, land-use change, and forestry. Dans R.T. Watson, I.R. Noble, B. Bolin, N.H. Ravindranath, D.J. Verardo et D.J. Dokken, éd. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni.
- GIEC (2000b) - Emissions Scenarios. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (Eds.) Cambridge University Press, U.K. p. 570. Summary for Policymakers, IPCC, Geneva, Switzerland. p 20. <http://www.ipcc.ch/pub/sres-f.pdf>
- GIEC (2001) - Third assessment report : Climate Change 2001, Cambridge University Press, U.K. 4 volumes :
- The Scientific Basis (http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/index.htm)
 - Avec Summary for Policymakers (SPM) (<http://www.ipcc.ch/pub/spm22-01.pdf>)
 - et Technical Summary (TS) (<http://www.ipcc.ch/pub/wg1TARtechsum.pdf>),
 - Impacts, Adaptation & Vulnerability (http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg2/index.htm)
 - Avec Summary for Policymakers (<http://www.ipcc.ch/pub/wg2SPMfinal.pdf>)
 - et Technical Summary (<http://www.ipcc.ch/pub/wg2TARtechsum.pdf>),
 - Mitigation (http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg3/index.htm)
 - avec Summary for Policymakers (<http://www.ipcc.ch/pub/wg3spm.pdf>)
 - et Technical Summary (<http://www.ipcc.ch/pub/wg3TARtechsum.pdf>)
 - Synthesis Report (<http://www.ipcc.ch/pub/SYRtechsum.pdf>)
 - ou http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/syr/index.htm)
- Giraud P.N. (1999) - Un scénario énergétique tendanciel pour la France à l'horizon 2020. http://www.cerna.ensmp.fr/Documents/PNG_AnnalesEnergie.pdf
- Glazebrook B. (2001) - A Life Cycle Approach to Greenhouse Gas Mitigation Strategies¹.
- GCSI (1999) - Soil carbon sinks potential in key countries, Final report 14 may 1999 for National Climate Change Sinks Issues Table. http://www.nccp.ca/NCCP/pdf/Soil_Carbon_Sinks-Final_Report-05-2000.pdf
- Goff F., Guthrie G., Counce D., Kluk E., Bergfeld D., Snow M. (1997) - Preliminary Investigations on the Carbon Dioxide Sequestering Potential of Ultramafic Rocks. Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory; LA-13328-MS; 1997.
- Goldberg P.M., Chen Z.Y., O'Connor W., Walters R., Lackner K., Ziock H. (2000) - "CO Mineral Sequestration Studies". Paper presented at GlobeEx 2000, August 2000, Las Vegas, NV.
- Goldberg Ph., Chen Z.Y., O'Connor W., Walters R., Ziock H. (2001) - CO₂ Mineral Sequestration Studies in US. Proceedings of the First National Conference on Carbon sequestration. http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/01/carbon_seq/6c1.pdf
- Grotz S., Rubik F. (1997) - "The application of Life-Cycle-Assessment - an overview and some experiences". In EEMA, No. 2. <http://www.jrc.es/projects/lca/docs/Eema1.pdf>

¹ Document n'étant plus actuellement accessible en ligne. Contacter l'auteur du rapport.

- Gunter B. (2002). Alberta Research Council (ARC) Enhanced Coalbed Methane (ECBM) Recovery Project in Alberta, Canada. *Presentations from the First International Forum on Geologic Sequestration of CO₂ in Deep, Unmineable Coalseams (Coal-Seq I), Houston, March 14 & 15, 2002.*
http://www.coal-seq.com/Forum_I.htm
- Gunter W.D., Perkins E.H., McCann T.J. (1993) - "Aquifer Disposal of CO₂ rich gases: Reaction Design for Added Capacity." *Energy Conversion and Management*, 34, p. 941-948.
- Gunter W., Chalaturnyk R., Scott J. (1998a) - Monitoring of aquifer disposal of CO₂: experience from underground gas storage and enhanced oil recovery. Eliasson B. *et al.*, ed. *Greenhouse Gas Control Technologies*, Elsevier, p. 151-156 (dans *séq géol.*).
- Gunter W.D., Wong S., Cheel D.B., Sjostrom G. (1998b) - Large CO₂ Sinks: Their Role in the Mitigation of Greenhouse Gases from an International, National (Canadian) and Provincial (Alberta) Perspective, *Applied Energy* 61, p. 209-227.
<http://www.arc.ab.ca/extranet/cct/abstractGunter1998elsevier.pdf>
- Hatamian H. (1997) - Air Emissions in Upstream Petroleum Operations; Proceedings of the SPE/UKOOA European Environmental Conference, Aberdeen, Scotland, April 15-16, 1997; SPE 37834; Society of Petroleum Engineers: Richardson, TX, 1997.
- Haugan P.M., Drange H. (1996) - Effects of CO₂ on the ocean environment. *Energy Convers. Mgmt.* 37, p. 1019-1022.
- Herzog H.J. (1999) - The economics of CO₂ capture. In *Greenhouse Gas Control Technologies*, ed. B Eliasson, PWF Riemer and A Wokaum, 101-6, Oxford, Elsevier Science Ltd.
- Herzog H.J. (2001a) - Workshop on Carbon Sequestration Science: Economics. Proceedings of Workshop on Carbon Sequestration Science. May 22-24, 2001.
http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/01/carbon_seq_wksp/herzog_eco.pdf
- Herzog H.J. (2001b) - Workshop on Carbon Sequestration Science : Ocean carbon sequestration. Proceedings of Workshop on Carbon Sequestration Science. May 22-24, 2001.
http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/01/carbon_seq_wksp/Herzog_ocean.pdf
- Herzog H.J. (2001c) - Workshop overview. Proceedings of Workshop on Carbon Sequestration Science. May 22-24, 2001.
http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/01/carbon_seq_wksp/Herzog_overview.pdf
- Herzog H., Caldeira K., Adams E. (2001d) - "Carbon Sequestration via Direct Injection" In *Encyclopedia of Ocean Sciences*, eds. J.H. Steele, S.A. Thorpe, and K.K. Turekian, Vol. 1, p. 408-414, Academic Press, London, UK.

- Holloway S. (2002) - Underground sequestration of carbone dioxide - a viable greenhouse gas mitigation option. Proceedings of the 5th International symposium on CO₂ Fixation and the Efficient Utilization of Energy, Tokyo, Japan.
- Houghton R.A. (1999) - The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850-1990. *Tellus*, 50B, p. 298-313.
- Houghton R.A., Skole D.L., Nobre C.A., Hackler J.L., Lawrence K.T., Chomentowski W.W.H. (2000) - Annual fluxes of carbon from deforestation, and regrowth in the Brazilian Amazon. *Nature*, 403, p. 301-304.
- Hulme M., Osborne T.J., Johns T.C. (1998) - Precipitation sensitivity to global warming: comparison of observations with HadCM2 simulations. *Geophys. Res. Lett.* 25, p. 3379-3382.
- IEA (International Energy Agency) (1999) - Natural gas information 1998.
- IEA (2000) - The Road from Kyoto Current CO₂ and Transport Policies in the IEA. <http://www.iea.org/books/studies/2000/kyoto2000.pdf>
- IEA/OCDE (2001a) - Dealing with Climate Change: Policies and Measures in IEA Member Countries – 2001 Édition, Paris (France).
- IEA (2001b) - World energy outlook, 2001 – 2001 Édition, Paris (France).
- IEA (2001c) - Putting carbon back in the ground. Rapport spécial du programme GHG de l'IEA. Compilé par J. Davison, P. Freund, and A. Smith. ISBN 1-898373-28-0. Disponible sur <http://www.ieagreen.org.uk/>
- IEA (2001d) - Biofixation of CO₂ with Microalgae. "Greenhouse Issues" - Number 53, March 2001.
- IEA (2001e) - Biofixation with Microalgae for greenhouse gas abatement. Report on a workshop to discuss future research collaboration, 22-23 January 2001, Rome. Report number PH4/1, March 2001.
- IEA (2002a) - CO₂ Emissions from Fuel Combustion 1971-1999 (2002 Edition).
- IEA (2002b) - Ocean storage of CO₂. Compilé par W.G. Ormerod, P. Freund, and A. Smith. Révisé par J. Davison. 2nd ed. (revised) March 2002. ISBN 1-898373-30-2. Disponible sur <http://www.ieagreen.org.uk/>
- INRA (2002) - Contribution à la lutte contre l'effet de serre : Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Expertise scientifique collective réalisée par l'INRA à la demande du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable. Octobre 2002. ISBN 2-7380-1054-7. 334 p. <http://www.inra.fr/actualites/rapport-carbone/rapport-carbone-inra.pdf>
- Jancovinci J.M. (2002) - <http://www.manicore.com/documentation/serre/ozone.html>

- Jean-Baptiste Ph., Ciais Ph., Orr J., Ducroux R. (2001) - Séquestration du CO₂ : faisabilité et coût. Rapport CEA, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement. Réf. CEA-R-5989. ISSN 0429-3460. 70 p.
- Jessen K., Sam-Olibale L., Kavscek A, Orr F.M. (2001) – “Increasing CO₂ storage in Oil Recovery”, First National Conference on Carbon Sequestration, sponsored by the National Energy Technology Laboratory, Washington, DC, May 14-17. http://pangea.stanford.edu/PetEng/supric/publications/increasing_co2_storage.pdf
- Jones P.D., New M., Parker D.E., Martin S., Rigor I.G. (1999) - Surface air temperature and its changes over the past 150 years. *Rev. Geophys.* 37, p. 173-199.
- Knutzen J (1981) - ‘Effects of decreased pH on marine organisms’. *Marine Pollution Bulletin*, 12: p. 25-29.
- Koide H. (1999) - “Prospect of Geological Sequestration of CO₂ for Greenhouse Gas Mitigation and Natural Gas Recovery”. *International Journal of the Society of Materials Engineering for Resources*, Vol. 7, No. 1.
- Koide H., Yamazaki K. (2000) - “Subsurface CO₂ Disposal with Enhanced Gas Recovery and Biogeochemical Carbon Recycling” presented at the 2000 AAPG International Conference and Exhibition, October 2000.
- Kojima T., Nagamine A., Ueno N., Uemiya S. (1997) - “Absorption and Fixation of Carbon Dioxide by Rock Weathering”. Proceedings of the Third International Conference on Carbon Dioxide Removal, Cambridge Massachusetts, September 9-11, 1996, Energy and Conservation Management, 38 Suppl, p. S461-S466.
- Kump L.R, Kasting J.F., Crane R.G. (1999) - The Earth System. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 351 p.
- Kurpick P., Kurpick U., Huth A. (1997) - The influence of logging on a Malaysian dipterocarp rain forest: a study using a forest gap model. *Journal of Theoretical Biology*, 185: p. 47-54.
- Lackner K.S., Wendt C.H., Butt D.P., Joyce E.L., Sharp D.H. (1995) - Carbon dioxide disposal in carbonate minerals: *Energy* 20: p. 1153-1170.
- Lal R., Kimble J., Cole V.C., Follett R. (1998) - The Potential of U.S. Cropland to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect. Ann Arbor Press, Ann Arbor, Michigan.
- Lepeltier S. (1999) - Maîtriser les émissions de gaz à effet de serre : quels instruments économiques ? Rapport d'information 346 (98-99) - Délégation du Sénat pour la planification. <http://www.senat.fr/rap/r98-346/r98-346.html>
- Levassor A. (2002) - La séquestration des émissions industrielles de CO₂. Rapport d'étude EDF/ADEME/ARMINES.
- Liro C.R., Adams E.E., Herzog H.J. (1992) - ‘Modelling the release of CO₂ in the deep ocean’. *Energy Convers. Mgmt.* 33: p. 667-674.

- Lorenson T.D., Kvenvolden K.A., Hostettler F.D., Rosenbauer R.J., Martin J.B., Orange D.L. (2000) - "Hydrocarbons associated with fluid venting processes in Monterey Bay, California". United States Geological Survey.
- Mackenzie F.T. (1998) - Our Changing Planet - An introduction to Earth Science and global environmental change. Prentice-Hall, Upper Saddle River, 2^e éd., 486 p.
- Marchetti C. (1977) - 'On geoengineering and the CO₂ problem' *Climate Change* 1: p. 59-68.
- Marland G., Andres R.J., Boden T.A., Johnston C., Brenkert A. (1998) - Global, regional and national CO₂ emissions estimates from fossil fuel burning, cement production and gas flaring: p. 1751-1995, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- Martin J.H., Coale K.H., Johnson K.S., Fitzwater S.E., Gordon R.M., Tanner S., Hunter C.N., Elrod V.A., Nowicki J.L., Coley T.L., Barber R.T., Lindley S., Watson A.J., Van Scoy K., Law C.S., Liddicoat M.I., Ling R., Stanton T., Stockel J., Collins C., Anderson A., Bidigare R., Ondrusek M., Latasa M., Millero F.J., Lee K., Yao W., Zhang J.Z., Friederich G., Sakamoto C., Chavez F., Buck K., Kolber Z., Greene R., Falkowski P., Chisholm S.W., Hoge F., Swift R., Yungel J., Turner S., Nightingale P., Hatton A., Liss P., Tindale N.W. (1994) - Testing the iron hypothesis in ecosystems in the equatorial Pacific Ocean, *Nature* 371: p. 123-129, 1994.
- Masuda S. (1998) - "The CO₂ Ocean Sequestration Project in Japan" presented at the Fourth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Interlaken, Switzerland, August 30-September 2, 1998.
- Mégevand C. (1998) - Les programmes forestiers. Un moyen de lutte efficace contre le réchauffement global. Mémoire INA - PG, Paris.
- Mégevand C. (2001) - Fixation de carbone pour lutter contre l'effet de serre : analyse économique et politique. Rapport de DEA Économie de l'Environnement et des Ressources Naturelles. Université de Paris X-Nanterre.
- MIES (2001) - Troisième Communication Nationale à la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques.
<http://www.effet-de-serre.gouv.fr/fr/savoir/3CN.htm>
- Moritis G.(2000) - EOR Survey: EOR weathers low oil prices. *Oil and Gas Journal*, March 20, p. 39-61.
- Moritis and Guntis (1998) - 1998 worldwilde EOR Survey. *Oil and Gas Journal*, April 20, p. 49-77.
- Murray C.N., Visintini L., Bidoglio G., Henry B. (1996) - Permanent Storage of Carbon Dioxide in the marine environment: the solid CO₂ penetrator. *Energy Convers. Mgmt.* 37: p. 1067-1072.

- Nabuurs G.J., Mohren G.M. (1993) - Carbon fixation through forestry activities. IBN Research Report 93/4. Face Institute for Forestry and Nature Research, Arnhem-Wageningen, Pays-Bas.
- Nakamura T., Senior C., Olaizola M., Cushman M., Masutani S. (2001) - Capture and Sequestration of CO₂ From Stationary Combustion Systems by Photosynthesis of Microalgae. Proceedings of the First National Conference on Carbon sequestration. http://www.fetc.doe.gov/publications/proceedings/01/carbon_seq/5a3.pdf
- Nilsson S., Shopfhauser W. (1995) - The carbon sequestration potential of a global afforestation program. *Climatic Change*, 30, p. 249-257.
- Noble R.A., Henk Jr. F.N. (1998) - "Hydrocarbon charge of a bacterial gas field by prolonged methanogenesis: an example from the East Java Sea, Indonesia". *Organic Geochemistry*, vol. 29, p. 301-314.
- Nordrum S., Lee A. (2002a) - Development of a Corporate-wide Process for Estimating Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Oil and Gas Industry Operations. 11th Annual Emissions Inventory Conference, 16-18 april 2002, Atlanta, Georgia. <http://www.epa.gov/ttn/chief/conference/ei11/ghg/nordrum.pdf>
- Nordrum S., Lee A., Callahan G. (2002b) - Implementation of a corporate-wide process for estimating energy consumption and greenhouse gas emissions from oil and gas industry operations. Proceedings of GHGT-6. <http://www.rite.or.jp/GHGT6/>
- OCDE & Nuclear Energy Agency. (2002) - Externalities and Energy Policy: The Life Cycle Analysis Approach". Workshop proceedings, Paris, France, 15-16 novembre 2001. ISBN 92-64-18481-3. <http://www.nea.fr/html/ndd/reports/2002/nea3676-externalities.pdf>
- O'Connor W.K. (1998) - "Investigations into Carbon Dioxide Sequestration by Direct Mineral Carbonation". Presentation at Second Meeting of Mineral Sequestration Working Group, November 3, 1998, Albany Research Center, Albany, Oregon.
- OGP (2000) - Flaring and venting in the oil & gas exploration & production industry: an overview of purpose, quantities, issues, practices and trends. Report No. 2.79/288. January 2000. <http://www.ogp.org.uk/pubs/288.pdf>
- Ohsumi T. (1993) - Prediction of solute carbon dioxide behaviour around a liquid carbon dioxide pool on deep ocean basins. *Energy Convers. Mgmt.* 34: p. 1059-1064.
- Oldenburg C.M., Benson S.M. (2001) - Carbon Sequestration with Enhanced Gas Recovery : Identifying Candidate Sites for Pilot Study ; Proceedings of First National Conference on Carbon Sequestration, 14-17th may 2001. http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/01/carbon_seq/2a4.pdf
- Orr J.C., Sarmiento J.L. (1992) - Potential of marine macroalgae as a sink for CO₂: constraints from a 3-D general circulation model of the global ocean, *Water, Air and Soil Pollution*, 64: p. 405-421.

- Ozaki M. (1997) - CO₂ injection and dispersion in mid-ocean by moving ship. *Waste Management* 17: p. 369-373.
- Ozaki M., Sonada K., Fujioka Y., Tsukamoto O., Komatsu M. (1995) - Sending CO₂ into deep ocean with a hanging pipe from a floating platform. *Energy Convers. Mgmt.* 36: p. 475-478.
- Pagnier H. et Van Bergen F. (2002). CO₂ storage in coal – The RECOPOL project. *Presentations from the First International Forum on Geologic Sequestration of CO₂ in Deep, Unmineable Coalseams (Coal-Seq I), Houston, March 14 & 15, 2002.*
http://www.coal-seq.com/Forum_1.htm
- Pehnt M. (2002) - Life Cycle Assessment of Fuel Cell Systems. In *Erscheint in Fuel Cell Handbook, Volume 3 – Fuel Cell Technology and Applications*, J. Wiley.
<http://www.ifeu.de/verkehr/seiten/Fuel%20Cell%20Handbook%20Chapter%20mit%20Kopfzeile.pdf>
- Peterson T.C., Gallo K.P., Livermore J., Owen T.W., Huang A., McKittrick D.A. (1999) - Global rural temperature trends. *Geophys. Res. Lett.* 26- p. 329-332.
- Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davisk M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Y., Lorius C., Pe'pin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M. (1999) - Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, vol. 399, p. 429-436.
- Plouchart G. (2001) - Évaluation des émissions de CO₂ des filières énergétiques conventionnelles et non conventionnelles de carburants à partir de ressources fossiles (étude publiée par le Commissariat général du Plan).
- Poertner H.O., Reipschlag A. (1996) - Ocean disposal of anthropogenic CO₂: physiological effects on tolerant and intolerant animals. In: *Ocean Storage of Carbon Dioxide. Workshop 2 - Environmental Impact*, IEA Greenhouse Gas R&D Programme, ISBN 1-898373-13-2.
- Poore D., Burgess P., Palmer J., Rietbergen S., Synnott T. (1989) - No timber without trees. Sustainability in the tropical forest. Étude pour l'OIBT. Earthscan, Londres.
- Reeve D.A., Global Change Strategies International Inc. (2000) - Le captage et le stockage des émissions de dioxyde de carbone. Préparé par contrat RNCAN (NRCan-00-0195) - Bureau de recherche et de développement énergétiques, Ressources naturelles Canada, Ottawa (Ontario), Canada (22 p.).
- Reeves S.R. (2001) - Geological Sequestration of CO₂ in Deep, Unmineable Coalbeds: An Integrated Research and Commercial-Scale Field Demonstration Project, Society of Petroleum Engineers, SPE 71749.
http://www.coal-seq.com/Proceedings/SPE_71749.pdf

- Revelle R., Suess H.E. (1957) - Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO₂ during the past decades. *Tellus* 9: p. 18-27.
- Rice D.D., Claypoal G.E. (1981) - Generation Accumulation, and Resource Potential of Biogenic Gas, *AAPG Bulletin*, vol. 65, p. 5-25.
- Riedacker A. (1991) - Effet de serre et pays en développement. *Bulletin Africain*, 2, p. 20-39.
- Ritter K., Lev-On M., Nordrum S., Shires T. (2002) - Development of a consistent methodology for estimating greenhouse gas emissions from oil and gas industry operations, 11th Annual Emissions Inventory Conference, 16-18 april 2002, Atlanta, Georgia. <http://www.epa.gov/ttn/chief/conference/ei11/ghg/ritter.pdf>
- Robinson D.A. (1999) - Northern Hemisphere snow cover during the satellite era. In: Conf. Polar Met. and Ocean., American Meteorological Society, Boston, Dallas, TX, p. 255-260.
- Roh Y., Phelps T.J., McMillan A.D., Lauf R.J. (2001) - Utilization of Biomineralization Processes with Fly Ash for Carbon Sequestration. Proceedings of the First National Conference on Carbon sequestration. http://www.fetc.doe.gov/publications/proceedings/01/carbon_seq/5a2.pdf
- Sapre A. (1999) - Climate Change: Voluntary Actions by the Oil and Gas Industry; American Petroleum Institute: Washington, D.C.
- Sarmiento J.L., Orr J.C. (1991) - Three dimensional ocean model simulations of the impact of Southern Ocean nutrient depletion on atmospheric CO₂ and ocean chemistry. *Limnol. Oceanogr.*
- Sarmiento J.L. (1993) - "Ocean Carbon Cycle", *C&E News*, 71 (May 31): p. 30-43.
- Schoell M., Muehlenbachs K. *et al.* (2001) - "Natural Sites of Bio-Conversion of CO₂ and Hydrocarbons in the Subsurface: San Juan Basin and Michigan Basin". Submitted to AAPG 2001 National Conference, Denver.
- Scott A.R. (1999) - "Improving coal gas recovery with microbially enhanced coalbed methane". *Coalbed Methane: Scientific, Environmental, and Economic Evaluations*, July 1999, p. 89-111.
- Seifritz W. (1990) - CO₂ disposal by means of silicates. *Nature* 345 : p. 486.
- Singh K.D. (1993) - Évaluation des ressources forestières : pays tropicaux. *Unasyuva*, 44(174): p. 10-19.
- Sist P., Nolan T., Bertault J.G., Dykstra D. (1998) - Harvesting intensity versus sustainability in Indonesia. *Forest Ecology and Management*, 108: p. 251-260.

- Spath P.M., Mann M.K. (2000) - Life Cycle Assessment of a Natural Gas Combined-Cycle Power Generation System. National Renewable Energy Laboratory. <http://www.nrel.gov/docs/fy00osti/27715.pdf>
- Stevens S., Fox C. (2001) - McElmo Dome and other natural CO₂ deposits: analogs for geologic sequestration. In Proceedings of the 5th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, ed. Williams D., Durie B., Mc Mullan P., Paulson C. & Smith A., Collingwood, Australia, CSIRO.
- Stevens S.H., Gale J. (2000) - "Geologic CO₂ Sequestration May Benefit Upstream Industry", *Oil and Gas J.*, May 15, p. 40-44, 2000.
- Stevens S., Vello A., Kuuskraa Gale J. (2001) - Sequestration of CO₂ in depleted oil and gas fields : Global capacity, costs and barriers. In Proceedings of the 5th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, ed. Williams D., Durie B., Mc Mullan P., Paulson C. & Smith A., Collingwood, Australia, CSIRO.
- Socolow R. (1997) - Fuels Decarbonization and Carbon Sequestration: Report of a Workshop; PU/CEES Report No. 302; Princeton University Press: Princeton, NJ. http://www.princeton.edu/_ceesdoe
- Steinberg M (1984) - An Analysis of Concepts for Controlling Atmospheric Carbon Dioxide, DOE/CH/00016-1, Brookhaven National Laboratory, Brookhaven, NY.
- Suess E., Bohrman G., Greinert J., Lausch E. (1999) - Le méthane dans les océans. *Pour la Science*, No 264 - octobre 1999.
- Taber J.J., Martin F.D., Seright R.S. (1997a) - "EOR Screening Criteria Revisited - Part 1: Introduction to Screening Criteria and Enhanced Recovery Field Projects," Soc. Pet. Eng. Res. Eng., Aug, p. 189-198.
- Taber J.J., Martin F.D., Seright R.S. (1997b) - "EOR Screening Criteria Revisited-Part 2: Applications and Impact of Oil Prices," Soc. Pet. Eng. Res. Eng., Aug, p. 199-205.
- Tait J.H. (1997) - Integrated Process for Coalbed Brine and Methane Disposal, Proceedings of the Natural Gas Conference "Emerging Technologies for the Natural Gas Industry". http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/97/97ng/ng97_pdf/NGP5.PDF
- TOTALFINAELF (2001) - Rapport annuel Environnement-Sécurité. http://www.environnement.totalfinaelf.com/menuA/rapport_env_tfe_fr_2001_envirnement.pdf
- U.S. Department of State (2002) - U.S. Climate Action Report 2002, Washington, D.C., May 2002. The United States of America's Third National Communication Under the United Nations Framework Convention on Climate Change. <http://www.epa.gov/globalwarming/publications/car/>
- Van der Burgt M.J., Cattle J., Boutkan V.K. (1992) - Carbon dioxide disposal from coal-based IGCC's in depleted gas fields, *Energy Convers. Mgmt.*, 33 (5-8), p. 603-610.

- Vignes J.L., André G., Kapala F. (1997-1998) - Données industrielles, économiques, géographiques sur les principaux produits chimiques, métaux et matériaux. 7^e éd. <http://www.sfc.fr/>
- Wackowski R. (1997) - Rangely Weber sand unit CO₂ Project. The 2nd CO₂ Oil Recovery Forum, October 29-30, New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, New Mexico, U.S.A.
- Wawersik W.R. *et al.* (2001) - Terrestrial sequestration of CO₂: an assessment of research needs. *Advance in Geophysics*, vol 43, p. 97-177.
- Whelan J.K (2000) - "Buried treasure, recharging oil and gas reservoirs in the Gulf of Mexico", *Geotimes*, p. 14-18, January 2000.
- Whiticar M.J., Faber E., Schoell M. (1986) - "Biogenic methane formation in marine and freshwater environments: CO₂ reduction vs. acetate fermentation - Isotope evidence". *Geochemica et Cosmochemica Acta*, vol. 50, p. 693-709.
- Wong S., Gunter W. D., Law D., Mavor M.J. (2001) - Economics of flue gas injection and CO₂ sequestration in coalbed methane reservoirs. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, ed. Williams D., Durie B., Mc Mullan P., Paulson C. & Smith A., Collingwood, Australia, CSIRO.
- WBCSB (1996) - Environmental assessment, a business perspective. <http://www.wbcds.org/newscenter/reports/1996/environmental-assessment.pdf>
- WBCSB & WRI (2001) - The Greenhouse Gas Protocol a corporate accounting and reporting standard. World Business Council for Sustainable Development and World Resources Institute, September 2001. ISBN 2-940240-18-3. <http://www.ghgprotocol.org/standard/ghg.pdf>

ANNEXE 1

Variations climatiques et concentrations en CO₂ de l'atmosphère depuis le début de l'ère primaire

Auteur : Bourque P.A. (1997-2001)
(<http://www.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/histoire.cycles.html>)

Le Phanérozoïque : les derniers 544 millions d'années

L'histoire des cycles biogéochimiques et des grands changements climatiques est beaucoup mieux connue qu'aux temps précédents. La raison tient dans une bien meilleure connaissance des séquences sédimentaires, dans l'abondance et la diversité des fossiles qui aident à comprendre les paléomilieus et à dater plus facilement les couches géologiques et à la résolution beaucoup plus fine des datations, le tout permettant de mieux comprendre la paléogéographie et son évolution dans le temps.

On peut résumer ainsi l'histoire climatique du Phanérozoïque :

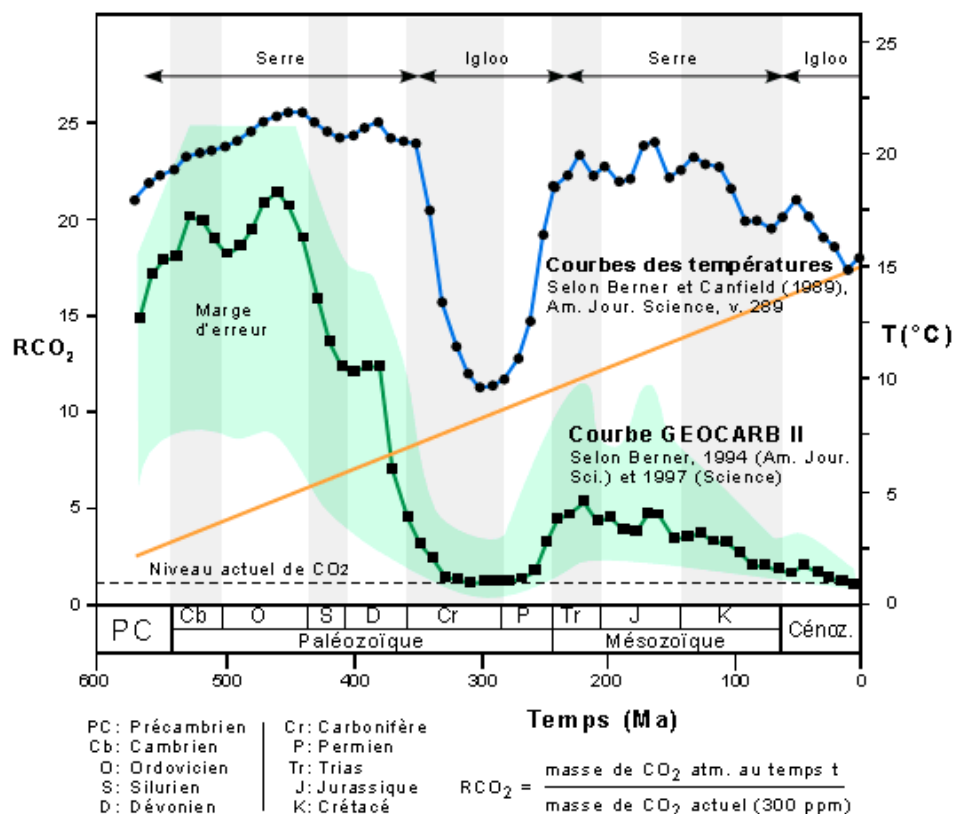
- la première demie du Paléozoïque (Cambrien à Dévonien ; de -544 à -360 Ma) fut une période de planète-serre ;
- la seconde demie du Paléozoïque et le tout début du Mésozoïque (Carbonifère, Permien et tout début Trias : de -360 à -240 Ma) ont constitué la 3^e période de planète-igloo ;
- le gros du Mésozoïque (-240 à -65 Ma) fut un retour à une période de planète-serre ;
- le Cénozoïque (-66 Ma à aujourd'hui) amorça la 4^e période de planète-igloo sur laquelle nous vivons présentement.

Le diagramme qui suit présente les variations de la teneur en CO₂ atmosphérique durant le Phanérozoïque. Il s'agit de la courbe connue sous le nom de GEOCARB II, basée sur un modèle mathématique et analytique établi par Robert A. Berner en 1994 (Am. Jour. Science) et 1997 (Science). On y voit le nombre et la répartition des points qui ont servi à construire la courbe, ainsi que la marge d'erreur reliée à la méthode. RCO₂ exprime une proportion, c'est-à-dire le nombre de fois le niveau actuel du CO₂ atmosphérique (soit 300 partie par million, valeur d'avant l'ère industrielle). Exemple : à l'Ordovicien, le niveau de CO₂ a été jusqu'à 22 fois plus élevée que juste avant l'ère industrielle.

Deux courbes des températures de surface se superposent à cette courbe, l'une (la droite orangée) calculée uniquement en fonction de la variation dans le temps de l'intensité du rayonnement solaire, sans tenir compte de la présence de CO₂, l'autre (bleue) calculée en tenant compte de la variation temporelle de l'intensité du rayonnement solaire, couplée aux teneurs en CO₂ atmosphérique (effet de serre).

Les faits saillants de la courbe du CO₂ durant les quelques derniers 600 Ma sont les suivants :

- la concentration atmosphérique de CO₂ fut plus élevée dans la première demie du Paléozoïque qu'elle ne le fut pour les derniers 400 Ma ;
- le Carbonifère-Permien a connu une chute drastique du niveau de CO₂ atmosphérique ;
- après cette chute, les niveaux de CO₂ ne sont jamais remontés à leur position du début du Paléozoïque ;
- les niveaux de CO₂ baissent progressivement depuis le Trias, avec une accélération à partir du Cénozoïque.



La forte concentration de l'atmosphère en CO₂ durant la période du Cambrien au Dévonien est due au fait que l'activité de la tectonique des plaques était assez élevée, entraînant un dégazage en CO₂ par les volcans, et que le captage du CO₂ atmosphérique était limité. En fait, le seul puits de carbone significatif à cette époque était relié au processus de l'altération superficielle des silicates continentaux qui, par captage du CO₂ atmosphérique, conduisait au stockage du carbone dans le CaCO₃ des sédiments et roches sédimentaires marines. La production biologique primaire était pratiquement limitée à la vie marine à cette époque et par conséquent le volume de matière organique pouvant être stocké était peu important.

C'est l'avènement des plantes vasculaires à racines et la colonisation de vastes surfaces continentales à la fin du Dévonien qui a sérieusement modifié le décor et accéléré le stockage du carbone, de deux manières. D'abord par l'action des racines des plantes vasculaires qui accélèrent l'altération chimique des silicates en profondeur dans les sols et captent ainsi le CO₂ atmosphérique, libérant une quantité de produits beaucoup plus grande que précédemment et augmentant substantiellement le stockage du carbone dans les sédiments et roches sédimentaires marines. Puis, cette végétation terrestre a produit une énorme quantité de matière organique qui est venue s'accumuler dans les marécages et les zones côtières marines. Les décomposeurs (bactéries, champignons) capables d'oxyder cette nouvelle matière organique (entre autres les lignines) n'étaient pas encore apparus sur terre à cette époque; ils ne viendront que plus tard, au Mésozoïque. En effet, l'oxydation de la lignine dans la biosphère actuelle est assurée par les champignons supérieurs dont les plus anciens fossiles connus remontent au Trias. Ce qui fait que ces matières se sont accumulées, ont été progressivement transformées en charbon et ont constitué un véritable tonneau

des Danaïdes, un puits de carbone sans fond. Le Carbonifère-Permien contient le gros des réserves en charbon de la Planète. De là cette chute drastique du niveau de CO₂ à la fin du Dévonien et le maintien d'un bas niveau tout au long du Carbonifère-Permien.

À la fin du Permien-début du Mésozoïque, c'est la Pangée. Les surfaces continentales sont vastes, car le niveau marin est bas. Le puits de carbone de l'altération superficielle fonctionne encore bien. Mais le début du Mésozoïque est une période de forte activité tectonique : c'est la fragmentation de la Pangée et l'ouverture de l'Océan Atlantique. Le dégazage au niveau des dorsales et des volcans de zone de subduction est intense et émet une grande quantité de CO₂. Le niveau de CO₂ atmosphérique se reconstruit, mais ne reviendra pas à son niveau de la première demie du Paléozoïque. L'altération continentale à travers les pluies acides et les racines des plantes va continuer à agir comme puits de carbone, mais les nouveaux décomposeurs des végétaux terrestres vont contribuer à diminuer énormément le stockage du carbone sous forme de charbon.

À partir de -80 Ma, on note une chute significative du niveau de CO₂ atmosphérique. On sait qu'il y a une nette diminution de l'activité tectonique aux dorsales médio-océaniques à partir de ce moment, ce qui aurait diminué les émissions de CO₂ reliées au dégazage par les volcans. Cependant, cette diminution de l'activité tectonique n'est sans doute pas suffisante pour expliquer la chute plus importante à partir de -30 Ma. Une hypothèse récente relie cette chute à la collision de l'Inde avec l'Asie. Cette collision a créé une gigantesque chaîne de montagnes, l'Himalaya, avec au nord des terrains surélevés, le plateau du Tibet. Les nouveaux reliefs de la chaîne auraient offert des surfaces rocheuses facilement érodables et altérables chimiquement, contribuant efficacement au captage du CO₂. En même temps, le soulèvement du plateau tibétain aurait favorisé les grandes pluies saisonnières (mousson) et fourni l'eau nécessaire à l'altération chimique au front de l'Himalaya. Ce serait là un autre exemple de l'implication de la tectonique des plaques dans un des grands cycles biogéochimiques. Finalement, les glaciations des deux derniers Ma (Pléistocène) ont contribué au captage du CO₂ atmosphérique et son piégeage dans les sédiments marins en offrant à l'altération chimique de plus grandes surfaces continentales durant les périodes de bas niveaux marins (jusqu'à -135 mètres).

Il y a une corrélation assez évidente entre la courbe des variations des niveaux de CO₂ et celle des variations des températures. Le rôle du CO₂ en tant que gaz à effet de serre apparaît bien démontré ici. Si les températures du Mésozoïque se retrouvent au même niveau que celles de la première demie du Paléozoïque pour une teneur atmosphérique en CO₂ bien inférieure, c'est qu'il y a eu, au Mésozoïque, une augmentation dans l'intensité du rayonnement solaire (courbe orangée).

Un événement climatique important qui n'a pas été détecté par le modèle de la courbe des températures est une brève période de glaciation qui eut lieu à la fin de l'Ordovicien. Cette glaciation est bien documentée par la présence de dépôts glaciaires (tillites) sur les masses continentales qui se situaient à l'époque au pôle sud (voir carte paléoclimatique du milieu et fin Ordovicien de Scotese à <http://www.scotese.com/mlordcli.htm>). Elle est aussi fort probablement responsable d'une des cinq grandes extinctions de masse.

La troisième période de planète-igloo a conduit à un âge glaciaire important, les glaciations permienne. Celle-ci nous sont connues par les nombreux dépôts glaciaires

permiens qui ont été répertoriés sur la grande masse continentale qu'était la Pangée, principalement dans l'hémisphère sud, du pôle jusqu'à la frontière entre les zones tempérée et tropicale (voir carte paléoclimatique du Permien de Scotese à <http://www.scotese.com/epermcli.htm>). On se souviendra que la distribution de ces dépôts a été utilisée par Alfred Wegener comme l'un des arguments appuyant l'idée d'une ancienne Pangée et de la dérive des continents.

Finalement, la 4^e période de planète-igloo s'est amorcée avec le Cénozoïque, et sa première grande glaciation (le stade glaciaire Nébraskien) a débuté il y a 2 Ma. Nous vivons depuis dans ce Grand Âge Glaciaire. Il y a fort à parier que nous sommes présentement dans un stade interglaciaire attendant une prochaine englaciation..., à moins que nos émissions accélérées de CO₂ atmosphérique amène un réchauffement si important qu'il mettra fin à cette 4^e période de planète-igloo et amorcera une nouvelle période de planète-serre !

Voir aussi : <http://www.scotese.com/sitemap.htm>. (série de cartes paléogéographiques et paléoclimatiques pour tout le Phanérozoïque).

ANNEXE 2

IEA GHG Implementing agreement

Co-operative programme on Technologies Relating to Greenhouse Gases Derived from Fossil Fuel Use

Web Site: www.ieagreen.org.uk
End of Term: November 2006
Chairman: Mr. K. Thambimuthu, Canada, kelly.thambimuthu@nrcan.gc.ca
Project Director: Mr. P. Freund, CRE Group Ltd. UK, paul@ieagreen.demon.co.uk
Next meeting: 17/18 April 2002, Amsterdam, The Netherlands
Desk Officer: giorgio.symbolotti@iea.org

Ongoing work:

- **Annex 1: Assessment of Technology Options**

Participants:

Country	Contracting Party	Annex		
		1		
Australia,	ESAA - Electricity Supply Association	X		
Belgium,	Geological Survey of Belgium	X		
Canada	CANMET Natural Resources Canada	X		
Denmark	Danish Ministry of Energy, Energy Agency	X		
European Commission	European Commission	X		
Finland	Ministry of Trade and Industry	X		
France	ADEME	X		
Japan,	NEDO	X		
Korea	KEPRI Environment Research Group	X		
Netherlands	NOVEM	X		
New Zealand	Government of New Zealand	X		
Norway	Government of Norway	X		
Spain	CIEMAT	X		
Sweden	NUTEK	X		
Switzerland	ABB Corporate Research	X		
United Kingdom	Department of Trade and Industry	X		
United States	US Dept. of Energy	X		
IEA Non Member Countries				
Venezuela	Ministerio de Energia y Minas	X		
Operating Agent (OA)	CRE Group Ltd.,			

Status and Perspectives

The IEA GHG R&D Programme is the leading international collaborative programme on technologies for reducing the greenhouse gas emissions. It delivers understanding of the role of the technology in restraining GHG emissions. The Programme also identifies targets for development and demonstration, and facilitates the progress of such a work. In addition, the Programme disseminates the knowledge to public opinion and decision-makers so as to enable decisions on mitigation options to be taken with the best available information. The main product is a series of expert reports on a range of subjects, including carbon management and other mitigation options, non-CO₂ GHG, and analysis of the full fuel cycle. Each study is reviewed by outside experts providing an assessment of the quality of the work as well as further insights into the topic under study. Recently, a 10th Anniversary Report (1991-2001) has been published which summarised the main findings of a ten-years activity.

The GHG R&D Programme is a cost sharing implementing agreement with a widely established and recognised activity and periodic publications. Sponsorships are provided by several international companies including RWE (Germany), BP (UK), EPRI, ExxonMobil and ChevronTexaco (US), Shell International (Netherlands), EniTecnologie (Italy), Alstom Power Technology AG (Belgium), and Total-Fina-Elf (France).

ANNEXE 3

Activités de recherche et développement dans le domaine de la capture et séquestration industrielle du CO₂

Extrait du rapport « Vision for the 21st century : Zero émissions Technologies for Fossil Fuel » - Technology status report, Final Draft, IEA (2002)

Appendix I: R&D Visions

Various countries are active in the field of zero emissions technologies for fossil fuels. The following is an effort to summarize some of those activities but is by no means a comprehensive list. Additional work must be done to compile a thorough overview.

IEA GHG R&D Programme

The IEAGHG is the leading international collaborative programme on technologies for reducing GHG emissions from use of fossil fuels. IEAGHG conducts technical and engineering evaluations of technology options as well as identifying targets for development and demonstration and then facilitating the progress of such work. It disseminates the knowledge gained so as to enable decision on mitigation technology to be taken with best available information.

IEAGHG was established in 1991 and has since conducted almost 90 separate investigations of technologies. The results form the basis for much of the current understanding and literature on the potential for CO₂ capture and storage as a measure to mitigate climate change.

The IEAGHG is established under the terms of an Implementing Agreement from the IEA. There are currently 16 countries plus the European Commission that support the IEAGHG, along with 8 major industrial companies as sponsors. IEA GHG supports a number of collaborative efforts with industry and governments as found throughout this Appendix.

Saline Aquifer CO₂ Storage (SACS)

The Statoil operated Sleipner Field in the North Sea is the first case of industrial scale CO₂ storage in the world. CO₂ is being injected into the Utsira formation, a thick saltwater-bearing sandstone at a depth of approximately 1 kilometer below the sea bottom. SACS does careful monitoring of the behavior of the CO₂ storage facility. In addition to demonstrating the long term feasibility of CO₂ storage in the Sleipner field, the project will also produce a "best practice" manual for CO₂ disposal by monitoring and verifying existing models. To date, approximately one million tonnes of CO₂ are stored in the formation. The SACS project investigates the Utsira Formation and surrounding strata utilizing repeated three-dimensional (3-D) seismic reflection surveys. The CO₂ "bubble" around the Sleipner CO₂ injection well in the Utsira formation was large enough

and in such concentrations by September 1999 (three years after initial injection) to be monitored by a 4D "Time Lapse" seismic survey. Before the project commenced, it was debated among geophysicists whether CO₂ could be monitored by standard seismic surveys. Expectations changed after the first geological analysis, reservoir simulations and seismic modeling done by the SACS project partners in spring 1999. A major shift in the budget was then made, reducing the volume of geoscience work and moving forward the second seismic survey to the summer 1999. Geochemical work has been hampered by scarcity of sample material. A core from Utsira sand and pore water has been used in initial short and long term laboratory experiments and the data is still being processed.

SACS was formed by a consortium of energy companies, research institutes and the EU Commission with support from national authorities in Norway, Denmark, Netherlands, France and the U.K. Project partners and funders include: Statoil, IEA GHG EU Energie Programme, BP Amoco, Norsk Hydro, Exxon-Mobil, Vattenfall, TotalFinaElf, the geological surveys of Denmark, France and the U.K., Sintef Petroleum Research, IFP (France), and NITG-TNO (The Netherlands). Statoil and IEA GHG provide international co-ordination and project facilitation.

Contact: Tore Torp, Statoil Research Center, Trondheim Norway, Ph. 47 7358 4181; E-mail: tat@statoil.com

European Potential for Geological Storage of CO₂ from Fossil Fuel Combustion (GESTCO)

GESTCO's principal objective is to provide a major contribution to atmospheric CO₂ reductions that will ensure a stable, affordable and environmentally acceptable supply of energy for all of Europe. In order to meet that objective, GESTCO is currently evaluating the CO₂ subsurface storage potential in four principal geological storage types that are known to exist in several regions throughout Europe, including: onshore/offshore saline aquifers with or without lateral seal; low enthalpy geothermal reservoirs; deep methane-bearing coalbeds and abandoned coal and salt mines, and exhausted or near exhausted hydrocarbon structures. Through various case studies of these geological types in different countries, GESTCO will: produce detailed geological data for each area; evaluate the significance of all possibilities for alternative uses of the subsurface; evaluate the impact of any leak that

may occur; define the location of potential storage areas relative to large point sources (power plants and major industrial sources) of CO₂; conduct reservoir simulations of each potential storage area; make an economic evaluation of the storage potential in each area, and conduct economic comparison of CO₂ free electricity production cost from conventional and renewable energy sources. This information will be utilized to create realistic scenarios that can help determine the cost of CO₂ avoided and/or the increase in cost of electricity generation. A dedicated decision support system can then be developed so that users can evaluate site specific source/storage options and cost estimates.

The main project participants include: the geological surveys of Denmark, Great Britain, The Netherlands, France, Belgium, Norway, Germany and Greece, which work jointly within the EuroGeoSurveys Association. Private sector participation includes Ecofys (NL), Vito Engineering (B), Greek National Power Corporation, French Geothermal Company, and the National Oil Company of Denmark. Funding is provided from the European Union 5th Framework Programme for Research and Development. GESTCO also leverages its efforts by participating in the SACS project and IEA GHG R&D Programme.

Contact: Niels Peter Christensen, GESTCO Project Manager, Ph. 45 28 114 21 53; E-mail: NPC@GEUS.DK
Web: www.nitg.tno.nl/eurogeosurveys/projects/GestcoWebv/

CO₂NET

CO₂NET is the European technology-networking programme for CO₂ sequestration into geological storage. CO₂NET is working to establish and build a European Thematic Network of experienced organisations and individuals to facilitate co-operation between these organisations and, in particular, European-funded CO₂ projects. The Thematic Network will enhance the performance and impact of the projects and increase awareness of European activities and fast track the developing technologies to meet emissions reduction demands. CO₂NET's initial partners are IEA-GHG, Technology Initiatives Ltd., the European Commission, BP and the British Geological Survey. The EU Energie-funded projects: *Saltine Aquifer CO₂ Storage (SACS)*, managed by Statoil and *European Potential for Geological Storage of CO₂ from Fossil Fuel Combustion (GESTCO)*, managed by the Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS), and are also founding members.

The Weyburn (CO₂) Monitoring Project
Facilitated by the International Energy Agency (IEA), coordinated by the British Geological Survey (BGS) and managed by PanCanadian Resources, the Weyburn Monitoring Project is a joint collaboration among research groups from the U.K., U.S., Canada, Denmark and Italy. (See project description under Canada.)

Natural Analogues to the Storage of CO₂ in the Geological Environment (NASCENT)

The NASCENT project is a three-year research study of CO₂ accumulations as analogues for geological storage and sequestration of anthropogenic CO₂ emissions. An understanding of natural analogues is crucial to ascertaining the long-term chemical impact of CO₂ storage, as water-rock-gas interactions may affect CO₂ storage capacity over time. The project focuses on the porosity and permeability of host formations, the integrity of caprock, ground stability, and quality of ground water in overlying aquifers. The NASCENT project is a European Commission supported project that commenced in February 2001 and will run for 3 years. The project co-ordinators are the British Geological Survey and partners include: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Germany); Bureau de Recherches Géologiques et Minières (France); Institute of Geology and Mineral Exploration, (Greece); Magyar Állami Földtani Intézet (Hungary); Netherlands Institute of Applied Science (The Netherlands); Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen University of Technology and Università "La Sapienza" di Roma. Also collaborating in the project are: BP; IEA Greenhouse Gas R&D Programme and Statoil. The NASCENT project is collaborating with two other projects undertaking research on natural occurrences of CO₂. These projects are: The NACS Project led by Advanced Resources International of the USA and The GEODISC Project in Australia.

Recovery and Utilisation of Carbon Dioxide (RUCADI)

RUCADI is a network of 35 partners representing European universities and industry to consider and promote uses of carbon dioxide such as technological uses as well as chemical and biological.

CO₂ Capture Project (CCP)

The CO₂ Capture Project (CCP), formed in 2000, is an international effort funded by nine of the world's leading energy companies that places an emphasis on collaboration and partnership with governments, industry, NGO's and other stakeholders. The project seeks to develop new technologies to reduce the cost of capturing and sequestering CO₂. The CCP is working to accomplish this objective by: performing benchtop R&D (engineering studies, computer modeling, laboratory experiments) to prove the feasibility of advanced CO₂ separation and capture technologies, specifically targeting post-combustion methods, pre-combustion decarbonization, and oxyfuel; developing guidelines for maximizing safe geologic storage, for measuring and verifying stored volumes, and for assessing and mitigating storage risks; developing an economic model to establish lifecycle CO₂ separation, capture and sequestration costs for current and best technologies to compare alternatives and direct the research and development towards the most promising technologies; actively transferring and making available the new technologies to industry via publications, presentations, conferences, an internet website, patent licenses and commercial services. The CCP is leveraging international commitments totaling about \$28 million from the IEA GHG, EU, US DOE, and Norway's Klimatek Programme. Members of the CO₂ Capture Project are: BP, ChevronTexaco, Eni, Norsk Hydro, PanCanadian, the Royal Dutch Shell Group of Companies, Statoil and Suncor Energy.

Contact: Gardiner Hill, Project Manager, Ph., 202-785-4888, e-mail: hillg@bp.com

Australia

Commonwealth Scientific & Industrial Research Organization
CSIRO Energy Technology division conducts R&D to improve the competitive advantage and environmental acceptability of the coal, energy and related industries. It encompasses work in coal preparation and utilization, gas utilization, energy storage, and the environmental aspects associated with the coal, energy and minerals industries. The main program areas are coal preparation, advanced power generation, aspects of renewable energy and energy storage, and the environmental impacts of the energy industry — particularly greenhouse gas emissions.

CSIRO has or is planning a number of activities relating to zero emissions technologies for power generation. Paper studies are underway to assess the technical and economic feasibility of capture and sequestration of CO₂ from Australia's existing coal- and gas-fired power stations in order to rank this with other GHG mitigation options. A full range of capture technologies is being assessed, and the sequestration options being evaluated include used oil and gas fields, deep coal seams and the ocean. Additionally, the use of solar thermal-methane reforming hybrid technology and coal gasification to produce H₂/CO₂, recovering and sequestering the CO₂ and using the H₂ for advanced power generation (e.g. gas turbines and fuel cells).
Contact: Greg Duffy, CSIRO Energy Technology, Ph. 61 2 9710 6800; E-mail: g.duffy@det.csiro.au

Geological Disposal of Carbon Dioxide (GEODISC)
GEODISC is a joint Australian Petroleum Cooperative Research Center (APCRC), government, and industry project researching the applicability of disposing of large volumes of CO₂ into geological formations within Australia. Geoscience Australia manages the geological aspects of this activity. The GEODISC program will document areas where CO₂ injection is geologically feasible and model and monitor the behavior of CO₂ in the subsurface. It will also carry out a risk assessment to ensure that the CO₂ can be safely and essentially permanently disposed of in the deep subsurface and assess the cost of undertaking CO₂ injection on a commercial scale in Australia.

The \$10 million program started in July 1999 and will run for 4 years. The research is directly funded by industry (BHPP, BP, Chevron, Shell, WAPET and Woodside) and indirectly funded by Government and University Research Groups.

Contact: Andy Rigg, Program Manager, APCRC
GEODISC Program, Ph. 61 2 9490 8225; E-mail, andy.rigg@petroleum.crc.org.au

Canada

There has been interest in the implementation of components of Zero Emissions Technology (CO₂ capture, storage and utilization) for some time in Canada. At the first conference organized by the IEA Greenhouse Gas Programme on CO₂ capture and storage in Oxford, UK in 1993, Canadians gave papers on, among other topics, amine capture, membrane separation and calcium carbonate formation. Canadian activities prior to that time included pilot projects on CO₂ enhanced oil recovery. A western Canadian information network was also in existence, bringing together interested players and exchanging information on CO₂ capture, storage and utilization technologies.

Congruent with the above interests, Canada was one of twelve IEA member countries who founded the IEA Greenhouse Gas Programme in 1991. A high national commitment to this initiative resulted in Canada playing a leadership role since 1995 as Chair of the Executive Committee of the IEA Greenhouse Gas Programme.

Since negotiation of the 1997 Kyoto Protocol, Canada has been working towards its ratification. The target is to reduce annual greenhouse gas emissions to a level of minus 6% by 2008-2012 relative to the 1990 level, which is estimated to have been the equivalent of 601 megatonnes (Mt) of CO₂. In early 1998, the Canadian federal, provincial and territorial ministers of energy and environment initiated work on a national climate change strategy with a mandate to develop a plan to meet the Kyoto target. This in turn prompted the formation of a national initiative on CO₂ capture and storage at a meeting held in Regina (Saskatchewan) in March 1998, with subsequent gatherings in 1999 in Calgary (Alberta), Halifax (Nova Scotia) and once again in Regina.

The Canadian government provided further recognition of the importance of emissions reducing potential of CO₂ capture and storage in October 2000 in its National Implementation Strategy on Climate Change adopted by ministers. This strategy will be implemented through a series of three annual national business plans or *Climate Change Action Plans*, the first one of which started in 2001. Areas of focus of current Canadian initiatives include: technology development and cost reduction of CO₂ capture using oxy-fuel combustion and amine separation amongst others; acid gas re-injection; monitoring of CO₂ storage in enhanced oil recovery; enhancement of methane recovery through monitoring of CO₂ injected into deep coal

beds; storage capacity assessments of Canadian coal seams, sedimentary basins, oil and gas reservoirs; and gasification of coal for electricity production and to acquire pure CO₂ suitable for storage. Many of the projects underway involve public and private sector partnerships, international collaboration, with several of the projects being also led by the private sector. A summary of initiatives underway is presented below.

Suitability of Canada's Sedimentary Basins for CO₂ Sequestration

Sedimentary basins have various degrees of suitability for CO₂ sequestration in geological media as a result of different conditions and geological, hydro-geological and geothermal characteristics. The purpose of the project is to identify on a continental-scale the suitability of approximately 70 sedimentary basins in Canada for CO₂ sequestration in geological media. On a regional scale, the suitability for CO₂ sequestration of the Alberta basin and of the Canadian part of the Williston basin (shared with the US) is being assessed both geographically and stratigraphically.

Duration: Study of the Alberta portion completed in 2000; Williston basin will be completed in December 2002

Funding Level and Funders: \$270,000 Canadian from the federal government for operating expenditures, and matching funds for manpower from the Alberta government through the Alberta Energy and Utilities Board.

Contact: Dr. Stefan Bachu, Alberta Geological Survey, Alberta Energy and Utilities Board, Ph. (780) 427-1517; Fax: (780) 422-1459; E-mail: Stefan.Bachu@gov.ab.ca.

Sequestration of Carbon Dioxide in Alberta's Oil and Gas Reservoirs

Alberta currently has approximately 26,000 gas pools and more than 8,500 oil pools in various stages of production and depletion. The ultimate capacity for CO₂ sequestration in these pools has been estimated using the Alberta Energy and Utilities Board reserves database. Results to date indicate that the ultimate CO₂-sequestration capacity in Alberta's gas reservoirs not associated with oil pools is 9.8 Gt CO₂. The sequestration capacity in the gas cap of approximately 5,000 oil reservoirs is 2.2 Gt CO₂. In contrast, the sequestration capacity in depleted oil pools is only 637 Mt CO₂. Of the more than 8,500 oil pools in Alberta, 4,273 reservoirs were identified as suitable for CO₂-flood EOR.

FINAL DRAFT

Estimates of the incremental CO₂-sequestration capacity in these reservoirs at CO₂ breakthrough and at 25 and 50% hydrocarbon pore volume (HCPV) of injected CO₂ indicate that an additional 117, 360 or 673 Mt CO₂, respectively, would be sequestered through CO₂-flood EOR.

The objective of the last stage (last year) of the project is to develop and apply reservoir ranking methodology that will consider such elements as reservoir characteristics, CO₂ capacity, injectivity, depth, distance from CO₂ sources and timing, in order to identify the hydrocarbon reservoirs that should be considered first in the implementation of large-scale CO₂ sequestration in oil and gas reservoirs in Alberta.

Duration: April 2000 to March 2003

Funding Level and Funders: \$ 240,000 Canadian from the Alberta Energy Research Institute for operating expenditures only. More than \$300,000 Canadian of manpower-equivalent is provided by the Alberta Energy and Utilities Board.

Contact: Dr. Stefan Bachu, Alberta Geological Survey, Alberta Energy and Utilities Board, Ph. (780) 427-1517; Fax: (780) 422-1459; E-mail: Stefan.Bachu@gov.ab.ca.

Assessment of CO₂ storage capacity of deep coal seams in the vicinity of large CO₂ point sources in central Alberta

Utilization of the many oil and gas well intersections of deep coal seams to determine the distribution, thickness and depth of deep coals; to determine reservoir properties including pressure and temperature and through experimentally derived CO₂ adsorption isotherms, to determine the in place storage capacity expressed as megatonnes/square kilometre.

Duration: This work has continued intermittently since 1997 as funding becomes available from groups outside of the Geological Survey of Canada. Ongoing work, to be completed in 2003, is funded by the Climate Change Action Plan.

Funding Level and Funders: Current funding is \$275,000 Canadian for fiscal year 2002-2003. A separate project is under negotiation to assess the CO₂ storage capacity in Nova Scotia with the Canadian Clean Power Coalition.

Contact: David Hughes, Leader, National Coal Inventory, 403-292-7117, E-mail: dhughes@nrcan.gc.ca

International Test Center for CO₂ Capture

Within this project, the intent is to undertake testing of amines for the capture of CO₂ from relatively dilute, but large volume sources of CO₂ such as coal-fired electrical generators, natural gas turbines and commercial boilers. The capabilities of the Center include bench scale work, small-scale pilot testing and pre-commercial testing on a larger pilot facility attached to a slip stream from a coal-fired power generating station at Boundary Dam in Saskatchewan. Current work is evaluating the optimal use of existing amine technologies. Work will soon proceed to the testing of alternative amines or amine mixtures with the ability to reduce process energy consumption, capital and operating costs further.

Duration: Current research will extend over a 3-4 year period.

Funding Level and Funders: Capital — Government funds from a variety of sources including federal and provincial. Operating — \$550,000 Canadian annually with more than 50% coming from industry sources.

Contact: Dr. Malcolm Wilson (mwilson@cas.uregina.ca), Dr. Paitoon Tontiwachwuthikul (paitoon@uregina.ca)

CANMET CO₂ Consortium

Pre-competitive research consortium led by the CANMET Energy Technology Center to investigate oxy-fuel combustion based CO₂ capture methods. Currently in Phase 6 of a work program focused on O₂/CO₂ combustion strategies for retrofit to existing pulverized coal fired power plants. CANMET is the primary performer of the work. Core research program is aimed at development of computer simulation of oxy-fuel flames and validation of burner concepts using a purpose built oxy-fuel combustion pilot plant rated at a 0.3 MW input. Multi-pollutant capture mechanisms being studied in a condensing heat recovery and scrubbing environment using technology supplied by McDermott Technologies Inc, USA. Boiler simulation tools being developed for use in a HYSYS working environment. Outputs of the program are confidential to partners, however several papers have been released in the public domain.

Duration: Program started in 1994, currently in Phase 6

Funding Level and Funders: Currently supported by the Canadian federal government, Alberta government, US Department of Energy, TransAlta Utilities, Sask Power, Ontario Power Generation, McDermott Technology Inc and in the past by EPCOR, Nova Scotia Power and Air Liquide.

Contacts: Mark Austin Douglas, E-mail: madougla@nrcan.gc.ca, Dr. Kelly Thambimuthu, E-mail: thambimu@nrcan.gc.ca, CANMET Energy Technology Center, Natural Resources Canada, Ottawa, Canada.

Oxy-Fuel Field Demonstration Project

Selection of optimal O₂/ CO₂ combustion method for a natural gas fired industrial scale boiler, development and demonstration of required burner technology and participation in a field sequestration experiment led by the Alberta Research Council Consortium to study the use of a variable CO₂/ N₂ product stream for enhanced coal bed methane recovery at a site to be determined in Western Canada.

Duration: 5 years

Funding Level and Funders: currently \$1.5 million Canadian over 5 years from Climate Change Action Plan (CCAP), currently looking for industrial partners

Contacts: Mark Austin Douglas, E-mail: madougla@nrcan.gc.ca, Dr. Kelly Thambimuthu, E-mail: thambimu@nrcan.gc.ca, CANMET Energy Technology Center, Natural Resources Canada, Ottawa, Canada.

Closed Gas Turbine Cycle Project

Performance evaluation of various closed gas turbine cycles utilizing oxy-fuel combustion to produce power and capture CO₂. Work program includes simulation activities and primary research at two Canadian universities. Carleton University work aimed at fundamental understanding of compressor performance when changing working fluid to CO₂. Funding will support project to design and construct a micro-turbine to study the operation of a closed cycle gas turbine. Work underway at the University of Waterloo to develop simulation of solid oxide fuel cell (SOFC) when integrated into a closed cycle gas turbine.

Duration: 5 years

Funding Level and Funders: currently \$250,000 Canadian over 5 years from Climate Change Action Plan (CCAP) Program

Contact: Mark Austin Douglas, CANMET Energy Technology Center, Natural Resources Canada, Ottawa, Canada. E-mail: madougla@nrcan.gc.ca

The Zero Emission Coal Alliance (ZECA)

A U.S.-Canadian consortium, comprised of 18 members representing governments, research organizations and the coal, utility, mining, and equipment manufacturing industries, proposes the development of a novel, highly efficient technology to generate electricity and/or hydrogen from coal with zero atmospheric emissions. Expanding on ideas originally proposed by the Los Alamos National Laboratory in New Mexico, U.S.A., the ZECA concept comprises a gasification/power plant to produce electricity via a high-temperature solid oxide fuel cell (SOFC) and a mineral carbonation plant to store the CO₂. First, coal is anaerobically gasified to produce hydrogen and CO₂. The hydrogen is then used to fuel the SOFC. The CO₂ formed is reacted with lime to form calcium carbonate, which is calcined at high temperature using the waste heat from the SOFC and separated into a pure CO₂ stream and the original lime. The lime is recycled and reused. The CO₂ is sent to the mineral carbonation plant and reacted with serpentine or olivine (magnesium silicates) to form magnesium carbonate and silica, which are then returned to the serpentine mine. Magnesium carbonate is benign and thermodynamically stable, thus guaranteeing permanent and safe sequestration of the CO₂. The capacity of worldwide magnesium silicate deposits is more than sufficient to handle the captured CO₂ emissions from all the world's coal burning facilities.

ZECA completed a US\$716,000 techno-economic feasibility study in November 2001, which did not identify any fatal flaws in the concept and concluded that the gasification/power plant technology showed good performance, with high overall efficiency (around 70%) and competitive electricity costs when compared to other advanced power generation technologies. Technical and business plans to design, construct and operate a pilot plant within five years are currently being developed. These plans will be presented to shareholders and potential investors in the near future.

Contacts: Don Shyluk, Fording Coal Ltd., Chairman, ZECA Corporation, E-mail: don_shyluk@fording.ca, Phone: +1-403-260-9806. Alan Johnson, Managing Director, ZECA Corporation, E-mail: johnson@zeca.org, Phone: +1- 403-444-0054.

Canadian Clean Power Coalition

An association of seven Canadian utilities and coal producers, and the US Electric Power Research Institute, the Coalition proposes a program focused on "securing a future for coal-fired electricity generation." The proposal provides for the development, construction and operation of a full scale demonstration project by 2007 which will remove GHG and other emissions of concern from an existing coal fired power facility and a similar demonstration project by 2010 applied to a greenfield coal fired power facility.

The Coalition's proposal is expected to cost approximately \$1billion Canadian. Phase I of the project (conceptual engineering and feasibility studies) has been underway since September 2001, with secure industrial funding and signed agreements with the provinces of Alberta and Nova Scotia, and commitments from the federal government and the province of Saskatchewan. Completion of Phase I is planned for mid-2003 with the identification of the technologies to be used in the demonstrations. Phase II (detailed engineering and construction) is expected to commence late 2003. Efforts to find funding for Phase II are just commencing.

Duration: Phase I scheduled completion mid 2003, Phase II scheduled completion 2010

Funding Level & Funders:

Industrial Participants (funding in place) \$1.96 million
Province of Alberta (funding in place) \$0.555 million
Province of Saskatchewan (pending final agreement) \$0.333 million
Government of Canada (pending final agreement) \$1.67 million
Nova Scotia Department of Natural Resources (in place) \$15,000 plus \$15,000 in kind

Contact: Bill Campbell, Project Manager, Calgary, Alberta, Phone: +1 403 229 9416, E-mail: bill-camp@telusplanet.net

IEA Weyburn CO₂ Monitoring and Storage Project

The primary objective of the project is to understand geo-sequestration of greenhouse gases, particularly CO₂ piggybacking on the CO₂ miscible flood project at the Weyburn oil reservoir. The scope of work includes understanding mechanisms of sequestration and the degree to which carbon dioxide can be permanently sequestered/stored in geological formations. The technology and know-how thus obtained can then be applied in selecting appropriate CO₂ storage sites and in designing and implementing successful CO₂ sequestration and/or storage projects worldwide. The ultimate deliverable is a credible assessment of the permanent containment of injected CO₂ as determined by long-term predictive simulations and formal risk analysis techniques.

Duration: 4-year project

Funding Level & Funders: Total cash funding is \$20.5 million Canadian as well as in-kind contributions valued at approximately an equal amount. Funding participants include the following organizations - Natural Resources Canada, Saskatchewan Energy and Mines, Government of Alberta, US Department of Energy, European Community, EnCana Corporation, Saskpower, Nexen Canada Limited, BP, Dakota Gasification Co, TransAlta Utilities, ENAA - Japan, Totalfinael.

Contact: Roland Moberg, General Manager, Petroleum Technology Research Center, Regina, Saskatchewan, Canada, E-mail: Moberg@src.sk.ca

Enhanced Coalbed Methane Recovery for Zero Greenhouse Gas Emissions

Supported by the IEA Greenhouse Programme and led by the Alberta Research Council, this Canadian project is looking at the commercial viability of coal bed methane (CBM) in Alberta through enhancement of CBM recovery factors and production rates in low permeability CBM reservoirs by injection of carbon dioxide-rich waste streams; and reducing greenhouse gas emissions by subsurface injection (and storage) of carbon dioxide into coal beds with added value from production of CBM. Phase I of the Canadian project was the initial assessment and feasibility of injecting pure CO₂ into deep Mannville coals. Phase II was the design and implementation of a micro-pilot test for injection of pure CO₂ in an existing CBM well located at Fenn-Big Valley in Alberta following Amoco Production Company procedures. Phase III was the assessment of reservoir response to different compositions of injected flue

gases and the design and implementation of a multi-well pilot project. Phase IV is the matching of novel combustion and separation technologies to produce a CO₂ waste stream with CBM reservoirs to carry out additional multi-well ECBM pilot tests. To date, all testing undertaken in Phases I-III has been successful and the economics of the process is being assessed.

It is expected that the final results will show gas producers the best way to enhance production from low permeability CBM wells. On the other hand, reducing greenhouse gas emissions is a priority to the utilities and is addressed. Cost curves will be generated to assess the price per tonne of CO₂ stored in coal reservoirs based on a wellhead price of natural gas and composition of flue gas injected.

Funding Level and Funders: Current partners include IEA Greenhouse Programme, Environment Canada, Canadian Climate Change Action Plan, Geological Survey of Canada, Alberta Innovation and Science, Alberta Geological Survey, Saskatchewan Energy and Mines, US Department of Energy, UK Department of Trade and Industry, Netherlands TNO, Japan Coal, Australian CSIRO, Gas Technology Institute, Suncor Energy, BP, Burlington Resources, Conoco Canada, EnCana Corporation, MGV Energy Inc., ExxonMobil Canada, Husky Energy, PetroCanada, TransCanada Pipelines, EPCOR Utilities, TransAlta Utilities, Air Liquide, Sproule International, Tesseract, University of Alberta, University of British Columbia and BJ Services Canada. The project started in 1997 and is expected to end in 2005. To date more than \$4 million Canadian has been expended.

Contact: Bill Gunter, Climate Change Technologies, Alberta Research Council, Edmonton, Alberta, Canada. Phone: + 780 450 5467, Fax: +780 450 5083, E-mail: gunter@arc.ab.ca

Acid Gas Re-injection in Alberta, Canada

At the end of 2001 there were 31 sites in Alberta where acid gas was re-injected into depleted oil and gas reservoirs and deep saline aquifers. The composition of the re-injected gas varies from 20% CO₂ and 80% H₂S to 95% CO₂ and 5% H₂S. These acid gas injection operations in Alberta represent an analogue for geological sequestration of CO₂. Thus, the study of the acid gas injection operations provides the opportunity to learn about the safety of these operations and about the fate of the injected gases, and represents a unique opportunity to investigate the feasibility of CO₂ geological storage.

The Alberta Geological Survey (AGS) of the Alberta Energy and Utilities Board (EUB), and the Alberta Research Council (ARC), are jointly carrying out a project to review the information submitted by operators to EUB in the process of obtaining approval for and running these 31 acid gas injection operations. AGS is reviewing the subsurface characteristics and ARC is reviewing the surface facility characteristics of these operations. One of these sites will be selected and undergo a comprehensive due diligence to establish the viability and importance of this technology for creating greenhouse gas emission credits when a trading market is firmly established.

Duration: December 2001 to October 2002

Funding Level & Funders: \$ 205,000 Canadian from Canadian federal and provincial governments and government agencies and the IEA Greenhouse Gas Programme.

Contacts: For subsurface studies: Dr. Stefan Bachu, Alberta Geological Survey, Alberta Energy and Utilities Board, Ph. (780) 427-1517; Fax: (780) 422-1459; E-mail: Stefan.Bachu@gov.ab.ca.

For surface facilities: Dr. William D. Gunter, Alberta Research Council, Ph. (780) 450-5467; Fax: (780) 450-5083; E-mail: gunter@arc.ab.ca.

Sequestration of Carbon Dioxide in Oil Sands Tailings Streams

The availability of high purity carbon dioxide (from hydrogen production) at oil sands refineries is an opportunity to use this refinery waste stream to favorably manipulate the properties of the oil sands extraction tailings waste stream. The chemistry of the oil sands tailings stream is such that we can take advantage of physical sequestration, ionic sequestration, and mineral sequestration. This work will establish the limits to these three mechanisms and define the possible operating conditions and benefits leading to a pilot demonstration of what would be a completely new technology.

Duration: 5 years

Funding Level and Funders: Climate Change Action Plan, \$1 million Canadian. Industry and provincial interest is being solicited. Suncor has contributed some funds in the past and has agreed to provide up to \$50,000 Canadian (potentially more) in kind for 2002.

Contact: Randy Mikula, CANMET Western Research Center, Devon, Alberta, 780-987-8623, E-mail: mikula@nrcan.gc.ca

Geologic sequestration of CO₂ and simultaneous CO₂ sequestration/CH₄ production from natural gas hydrate reservoirs

This research project addresses the feasibility of geologic sequestration of CO₂ as gas hydrate and the possibility of coincident CO₂ sequestration/ CH₄ production from natural gas hydrate reservoirs such as those occurring offshore of Canada's coasts or in the Arctic. New laboratory investigations will establish the fundamental geologic controls (physical and geochemical) on CO₂ hydrate formation and stability in porous media. Assessments of the suitability of candidate marine, lacustrine and Arctic reservoirs will be undertaken using existing geologic data and new field data acquired in conjunction with the Mallik 2002 International Gas Hydrate Production Research Well (also led by the Geological Survey of Canada). Linkages to the Mallik program will contribute substantially to the understanding of the physical, geochemical, geothermal and permeability characteristics of an actual gas hydrate reservoir.

Duration: 4 years

Funding Level & Funders: Climate Change Action Plan, \$307,000 Canadian for 4 years.

Contacts: Fred Wright and Scott Dallimore, Geological Survey of Canada, Natural Resources Canada, 601 Booth St, Ottawa K1A 0E8, Canada

Denmark

While Denmark does not have a carbon sequestration project, its geologic survey is active in assessing the geologic storage capacity and sites as noted in the various project descriptions.

Japan

Japan has the largest and longest running carbon capture and sequestration technologies research program. A highlight of their program is the Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE). Established in 1990 as a non-profit organization authorized by the Ministry of Economy, Trade and Industry, RITE focuses on the development of innovative environmental technologies and the broadening of the range of CO₂ sinks. With a budget of JPY9.9 billion, RITE has been conducting R&D and research investigations as well as providing information to the public regarding the advanced technologies and research.

Project for Biological CO₂ Fixation and Utilization

The focus of this project is to develop technologies to fix CO₂ in the flue gas when generating power at both power plants and factories. In addition to fixation of the CO₂, the project aims to achieve more than ten times higher efficiency than natural vegetation utilizing photosynthetic microorganisms capable of fixing CO₂ at a higher rate and at extreme temperatures. In addition, the technologies will be studied in order to achieve production of substances from the fixed CO₂ such as hydrocarbons, lipids as well as manure, feed, amino acid and polysaccharide.

The project is led by a consortium of research organizations and corporations including the Research Center for Advanced Science and Technology, University of Tokyo, Shikoku National Industrial Research Institute, and 15 companies including Hitachi, Ltd, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd, and Taisei Corporation.

Project for Chemical CO₂ Fixation and Utilization

This project aims to develop technologies which may continuously recover high-concentration carbon dioxide from stationary sources by large-scale membrane processes, as well as to produce useful substances (including methanol) through hydro-generation of the recovered carbon dioxide. Efforts will focus primarily on developing a polymer membrane with excellent separation, permeation and durability performances necessary for CO₂ separation from emission gas. In addition, efforts are being made to develop high performance catalysts with high CO₂ conversion and selectivity toward methanol, as well as to develop a reaction process of high-energy efficiency. This project is led jointly by the Research Laboratory of the Innovative Technology of the Earth and the Project Center for CO₂ Fixation and Utilization with joint research

partners National Institute of Materials and Chemical Research, National Institute for Resources and Environment, and Osaka National Research Institute.

Project for CO₂ fixation in desert area using biological function

The purpose of this R&D effort is the development of new plants adaptable to the desert environment. Widespread desertification, which has decreased the stock of CO₂ absorbents in the environment, has become one of the main causes of global warming and one of the most critical of global environmental issues. Plant biotechnology and genetic engineering methods will be applied to develop plants capable of withstanding the harsh desert environment of strong sunlight and dry soil.

This research aims at improving plant resistance to drought and light toxicity by ensuring highly efficient photosynthesis through improvement to the critical enzyme, RuBisCO. The research also aims at improving the mechanism of toxic-oxygen scavenging. Determining the mechanisms of salt-exclusion and osmotic regulation is yet a further aim of this research.

Study of Environmental Assessment for CO₂ Ocean Sequestration for Mitigation of Climate Change (SEA-COSMIC)

Part of RITE's Ocean Sequestration program, this project aims to determine the behavior of liquid CO₂-seawater injection. This project will conduct research on the technologies of CO₂ transport to intermediate depths of the ocean as well as to develop models to assess the environmental impacts near the area of injection, including the impact of increased levels of CO₂ on marine organisms. In addition to research, the project will produce a supporting survey on the research trends concerning CO₂ ocean sequestration in Japan and abroad. This is a joint research project sponsored by the National Institute for Mechanical Technology, Hokkaido National Industrial Research Institute, and the Central Electric Research Institute with the international cooperation of Massachusetts Institute of Technology (MIT) and the Norwegian Institute for Water Research (NIVA).

The Netherlands

Many Dutch greenhouse growers burn natural gas in small boilers to produce CO₂ and heat. Although this process is inefficient, conventional CO₂ capture equipment is too expensive and the height of the absorption tower often violates regulations, which require structures not to exceed 15 meters in height. In response to this dilemma, the Dutch TNO Institute of Environmental Studies is developing a membrane gas absorber that can be used for CO₂ capture in cogeneration plants. Only 2 meters high, the absorber utilizes a commercially available polypropylene membrane with a new absorption liquid developed by Dutch engineers. Additionally, the CO₂ available from application of the membrane technology would be 20 percent cheaper than that produced by burning gas.

Enhanced Coalbed Methane Recovery

The Netherlands Agency for Energy and the Environment (Novem) recently studied the technical and economic feasibility of enhanced coalbed methane recovery (ECBM) in the Netherlands. The work included an investigation of the potential coalbed methane (CBM) reserves underground as well as the related CO₂ storage potential in deep coal layers. The economic evaluation of ECBM recovery analyzed the costs of capturing CO₂ from major stationary sources and CO₂ transport, modeling the production of ECBM using CO₂ injection with reservoir simulations and system analyses to investigate the costs of gas production. The costs of on-site hydrogen and power production (including on site CO₂ removal and injection) were also evaluated.

R&D Inventory of CO₂ Removal

Novem commissioned ECOFYS to prepare the R&D Inventory of CO₂ Removal.

Norway

Most of Norway's power demand is met by hydropower and any future increase in demand will most likely be met by gas-fired power plants. In order to meet the country's emission targets, the Norwegian Research Council launched the Norwegian National Technology Programme (KLIMATEK) in 1997, a US\$70 million 5-year program to promote the RD&D of technology for reducing GHGs. Most of the projects in KLIMATEK's portfolio involve offshore petroleum production, process industry, gas fired power production with CO₂ capture and CO₂ storage. KLIMATEK's financial contribution is cost-shared with industry and typically ranges from 20 to 50 percent of total project cost. Long term research in universities and independent research organizations may receive up to 100 percent financial support. Some of the zero emissions projects KLIMATEK is supporting or has supported include:

- Kvaerner Oil and Gas developed a membrane gas/liquid contactor using amine absorption, which has been demonstrated in a pilot plant at Statoil's gas processing plant in Kårstø on the west coast of Norway.
- Kvaerner Oil & Gas and W.L. Gore & Associates GmbH project developed a gas-liquid membrane contactor utilizing a novel membrane absorption process aims to remove CO₂ from flue gas using. Unlike conventional capture process technology, the Kvaerner process is both small and compact, enabling the technology to be utilized offshore. It consists of towers 20-40 meters high, in which exhaust gas is bubbled through an amine solution that is used as an absorption liquid. When required, the CO₂ loaded liquid is heated to free the gas in an additional desorption tower. The exhaust gas then flows through small Teflon membrane fibers, which are surrounded by the absorption liquid. CO₂ passes through the membrane and is carried away by the liquid. The huge membrane surface area results in a highly efficient absorption process, thereby reducing the size of the equipment that is used by 78 percent and the weight by 66 percent.
- In 1997 Statoil initiated a development programme using improved MDEA and hybrid solvents to separate CO₂ from flue gas. This development reduced costs by 40 percent and removed 87 percent of the CO₂ from the flue gas of a 400 MW conventional NGCC power plant.
- Kvaerner Oil and Gas, in cooperation with Oak Ridge National Laboratory, U.S., conducted an initial assessment of electrical swing adsorption.
- In April 1998 Norsk Hydro initiated the Hydrokraft project to evaluate an Integrated Reformer Combined Cycle (IRCC) for a proposed 1200 MW installation on the west coast of Norway. (The plant size was determined by the goal to supply 60 million tonnes of CO₂ to the Grane oil field for EOR over a 15 year period.) The proposed plant comprised an auto-thermal reformer (ATR) with CO-shift and absorption using Selexol. The power plant included a triple-train combined cycle unit with both gas turbine and heat recovery steam generator (HRSG) integrated with the reforming section. Combustion tests carried out in 1999 by Norsk Hydro concluded that commercially available gas turbines can successfully be fired with the hydrogen-rich (40 percent to 80 percent in volume) fuel gas, but that its efficiency was around 50 percent, slightly lower than that achieved with natural gas. The cost of CO₂ capture was estimated at US\$36 per tonne. Through this process, CO₂ emissions can be reduced by 90 percent, compared with conventional modern gas-fired power plants. The ATR constituted about 35 percent of the total equipment costs, while the power plant was estimated to cost 42 percent. CO₂ compression was 7 percent of the costs and reduced plant efficiency by 2 percent. The plant was considered too risky because its development was linked with the development of Grane, due to come on-line in 2003.
- The zero emission gas power (ZEGP) project will develop a laboratory scale prototype of SOFC that converts natural gas to electricity with high temperature waste heat. The process is similar to Zero Emission Coal (Los Alamos National Laboratory, U.S.) and will dispose of the CO₂ using magnesium silicate rocks. A demonstration is planned in 2003 by the Institute for Energy Technology, Christian Michelsen Research and Prototech AS.
- In 1997, Aker Maritime launched a long-term development programme for emissions-free gas power production. A special-high oxygen based power plant (HiOx), a concept based on boiler or combine-cycle-gas turbine with flue gas recycle, is being examined by Aker Maritime with Alstom Power for a North Sea installation. On-going development focuses on the design of a 250 MW pilot plant. The closed process produces pure CO₂ and pure water. This mixture is suitable for underground storage or injection for EOR.

- Improve the energy conversion of natural gas in power cycles (Sintef Energiforskning AS)
- Advanced Zero Emission Power Plant (AZEP) — NorskHydro and Alstom are developing a new power plant concept based on a membrane reactor and conventional gas turbine technology. Mixed Conducting Membranes (MCM), made from ceramic materials, that separate oxygen from the air, are combined with combustion and heat transfer processes in a reactor. The MCM-reactor replaces the conventional burner in a standard gas turbine power plant, creating the AZEP. The exhaust from the new concept will be water vapour and CO₂. The water is condensed out, leaving a stream of almost pure CO₂ that can be compressed and transported for storage. The AZEP concept is more energy efficient than other known CO₂ capture technologies and it reduces NO_x emissions to < 1 ppm. Contact person: Hans Ragnar Eklund, Norsk Hydro (hans.ragnar.eklund@hydro.com)
- Framo Engineering is conducting tests on CO₂ enriched seawater, which is further diluted by injecting additional CO₂.
- The Nansen Environmental and Remote Sensing Center is modeling CO₂ injection and uptake in the ocean under its participation in the international project, Global Ocean Storage of Anthropogenic Carbon (GOSAC).
- Umoe Technology is investigating measures for reducing CO₂ emissions from the Gullfaks field.
- Nansen Environmental and Remote Sensing Center is working on algal culture technology and is planning an experiment and production facility to produce marine algae with enhanced CO₂ fixation.
- Østfoldforskning is assessing biological CO₂ removal at power plants.
- Statoil has proposed to develop the gas discoveries in the Snøhvit area of the Barents Sea and supply LNG primarily to North American markets. The Snøhvit LNG project will require construction of a single-train LNG terminal on the small island of Melkøya near Hammerfest. The gas would be transported through a 160 km pipeline to land where CO₂ will be removed to meeting commercial gas specifications, transported via pipeline to a saline aquifer beneath the gas field and where it will be re-injected and stored. The project is currently on hold.
- Norske Shell and Siemens Westinghouse are pioneering in demonstration of a unique "zero emission" fuel cell power generation technology fuelled by natural gas. The system is intended to demonstrate that the CO₂ normally emitted in exhaust gases can be successfully recovered at low additional cost from a high electrical efficiency power plant. The purpose of the project is to demonstrate a novel combination of a (tubular) solid-oxide fuel cell (SOFC) and CO₂ enhanced oil recovery technology. This is based on the electrolyte of an SOFC acting as an oxygen-separating membrane that allows the migration of oxygen from the air electrode to the fuel electrode where it reacts with the natural gas. In addition, Shell has developed an afterburner that produces power and increases efficiency while converting residual fuel to CO₂ and water. A 250 kW pilot plant is on order and will be installed on land on the Norwegian West Coast in 2004. Building on this demonstration phase, Shell has the intention to eventually develop efficient fuel cell power plants that can be deployed in the offshore Exploration and Production domain. A major milestone tentatively within the current decade is therefore the development of a multi-megawatt power system of an order of magnitude larger than the currently scheduled for installation to be used in the upstream offshore oil and gas segment. Further research towards developing multimegawatt fuel cells in offshore applications is ongoing in cooperation with Norwegian Industry and Research partners. The development of the fuel cell technology is also pursued by other actors in the oil and gas sector and is furthermore being developed for use in coal fired power plants.
- Statoil is coordinating the Saline Aquifer CO₂ Storage Project (SACS), an international project to develop methodologies for the assessment, planning and monitoring of underground CO₂ storage at the Sleipner field in the North Sea. (See International Projects for more detail.)
- Both Norsk Hydro and Statoil are involved in the international CO₂ Capture Project, which is conducting a comprehensive research on separation methods, develop procedures and guidelines for monitoring and verifying storage of CO₂, and seek to encourage policies to further the technical and economic viability of CO₂ capture and storage. (See International Projects for more detail.)

- The Norwegian Institute for Water Research plans to participate in the CO₂ Ocean Sequestration Field Experiment that will inject small amounts of liquid CO₂ into the deep ocean. The test will take place in water nearly 3,000 feet deep, over a period of about two weeks. Norwegian focus will be on the consequences for marine environment. (See International Projects for more detail.)

United Kingdom

The U.K. Department of Trade and Industry (DTI) maintains several programs that develop technologies and processes focused on improving environmental performance and sustainable development without abandoning fossil fuels as a means of power generation. One of DTI's most important projects is the Cleaner Coal Programme, a six-year collaborative programme of activities linking R&D with technology transfer and export promotion. The primary objective of the Cleaner Coal Programme is to reduce the global environmental impact of fossil fuel power generation, while at the same time maintaining its economic viability as a source of electricity. The DTI hopes that the Programme will encourage collaboration among U.K. industrial, academic, and government interests in the development of new methods of electricity generation, including those that incorporate zero emissions technologies. To that end, the Cleaner Coal Programme spawned the Zero Emissions Power Generation Task Force, which compiles recommendations from three key technology groups (fossil fuel systems, nuclear power, and renewable energy sources) to create an integrated and workable zero emissions strategy. In addition to its national activities, the UK is very active in the IEA GHG R&D Programme and projects that have already been described such as Weyburn, GESTCO, SACS, and NASCENT. Additional projects include:

Development of advanced reservoir characterisation and simulation tools for improved coalbed methane recovery

Led by Imperial College of Science Technology and Medicine, the main objective of this project is to develop technology and tools to more accurately assess the potential for improved methane recovery and CO₂ sequestration by investigating the basic scientific phenomena of CO₂ coal injection and retention. Improvement of coalbed methane (ICBM) is one potential way to improve energy supply diversification options currently under development for coalbed methane (CBM) extraction. Coal reservoir ICBM recovery is broadly analogous to enhance-

ment of oil recovery using injected CO₂ (i.e., injection of CO₂ into the reservoir makes fuel more viscous, thus it flows more readily from the reservoir).

The researchers' primary objective is to achieve a more comprehensive understanding of the fundamental mechanisms of water and CO₂-CH₄ adsorption/desorption, diffusion/counter diffusion, and two-phase flow under simulated reservoir conditions (stress, pore pressure, and temperature). The results of these studies will then be applied to design of a CO₂-ICBM recovery and CO₂ sequestration simulator for the European industry.

An investigation into the effects of matrix swelling on coal permeability for enhanced coalbed methane (ECBM) recovery and CO₂ sequestration assessment

This project investigates the effects of adsorption induced coal matrix swelling on the permeability of different coals as they undergo methane desorption under laboratory-simulated reservoir conditions. Enhanced coalbed methane recovery and CO₂ sequestration theory is based on the principle that CO₂ adsorbs onto the coal matrix more readily than methane. Laboratory isotherm measurements for single gases demonstrate that by volume, coal adsorbs approximately twice as much CO₂ as it does methane. Therefore, researchers assume that the enhanced coalbed methane (ECBM)/CO₂ sequestration process stores two moles of CO₂ for every mole of methane desorbed. Generally accepted principles dictate that adsorption/desorption of gas swells/shrinks the coal matrix; because permeability is directly proportional to the cube of cleat width, a small increase/decrease in cleat width may significantly increase/reduce permeability. The project will undertake extensive laboratory testing and numerical relationships in order to determine the matrix swelling effects on permeability of coal, the project will conduct extensive laboratory testing, including an examination of numerical relationships, to assess coal and reservoir properties. This project is supported by the EPSRC and led by ICSTM.

The high pressure interaction of coal with CO₂: implications for CO₂ disposal and for methane displacement from coal seams

The project, led by the University of Strathclyde and funded jointly by DTI and the British Coal Utilisation Research Association (BCURA), aims to provide fundamental information about CO₂ /coal interactions at high pressure in order to optimize methane displacement and CO₂ disposal. The project will investigate how much CO₂ can be stored in coal at different pressures and how difficult it is to diffuse through coals of different rank, while determining the amount of coal irreversibly absorbed. A range of experimental techniques will be used including high-pressure differential scanning calorimetry, volumetric adsorption, high-pressure gravimetric analysis, high-pressure small angle neutron scattering and temperature programmed desorption/mass spectrometry.

GAS — ZERO EMISSIONS PLANT (ZEP)

Alstom Power's GAS-ZEP project captures CO₂ as it is produced in a natural gas-fired power plant. The project explores methods to capture the CO₂ without substantial reductions in plant efficiencies. The project will last for three years, and the results will be utilized by other groups conducting related research throughout Europe.

Alstom Power's GAS-ZEP project is partially funded through the DTI's Foresight Link Award scheme. DTI and the research councils will provide Alstom Power and its partners approximately half of the £3.4 million funding requirement.

United States

The U.S. Department of Energy's Office of Fossil Energy and the National Energy Technology Laboratory administer DOE's Carbon Sequestration Program. Program contacts include: Bob Kane, Sequestration Issue Manager, U.S. Department of Energy, Ph. (202) 586-4753, E-mail: robert.kane@hq.doe.gov and Scott Klara, Director, Carbon Sequestration Program, National Energy Technology Laboratory, Ph. (412) 386-4864, E-mail: scott.klara@netl.doe.gov

Currently, the program has the following projects in its portfolio:

Carbon Sequestration Research and Development Program

Contractor	City/State	Value	Description
Research Triangle Institute	RTP, NC	\$ 1,051 k	Develop a CO ₂ separation technology that uses a regenerable, sodium-based sorbent.
Idaho National Energy Laboratory (INEL)	Scoville, ID	\$ 750 k	Conduct a laboratory-scale study of CO ₂ -liquid absorption kinetics, solvent regeneration requirements, and scale-up parameters for vortex contactors.
Media & Process Tech., Inc.	Pittsburgh, PA	\$ 900 k	Develop a high temperature CO ₂ -selective membrane to enhance the water-gas shift reaction efficiency while recovering CO ₂ for sequestration.
Los Alamos National Laboratory (LANL)	Los Alamos, NM	\$ 1,320 k	Manufacture a high-temperature polymer membrane with better separation capabilities.
Advanced Resources International	Reston, VA	\$ 7,150 k	Use existing recovery technology to evaluate the viability of storing CO ₂ in deep unmineable coal seams in the San Juan Basin.
Geologic Survey of Alabama	Tuscaloosa, AL	\$ 1,398 k	Develop a broad-based geologic screening model to quantify the CO ₂ storage potential of the Black Warrior coalbed methane region in Alabama, and apply the model to other sites.
Sandia National Laboratory (SNL)	Albuquerque, NM	\$ 2,025 k	Investigate down-hole injection of CO ₂ into depleted oil reservoirs in the West Pearl Queen Basin in NM.
Texas Tech University	Lubbock, TX	\$ 4,139 k	Create a novel well-logging technique using NMR to characterize geologic formations and explore hydraulic fracturing to improve CO ₂ sequestration in saline formations.
University of Utah	Salt Lake City, UT	\$ 428 k	Conduct an in-depth study of deep saline formations in the Colorado Plateau and Rocky Mountain region dealing with capacity and integrity of CO ₂ storage.
Battelle Laboratories	Columbus, OH	\$ 548 k	Evaluate and examine factors that affect chemical reactions that CO ₂ undergoes when stored in underground saline formations.
Tennessee Valley Authority (TVA)	Chattanooga, TN	\$ 1,289 k	Demonstrate and assess the life-cycle costs of integrating electricity production with enhanced terrestrial carbon sequestration at the Paradise station.
Stephen F. Austin	Nacogdoches, TX	\$ 760 k	Study the potential for reclamation and reforestation and the development of a free-trade system for carbon credits.
United States Department of Agriculture/United States Forest Service	Savannah River, SC	\$ 25 k	Investigate the use of forest biomass, when mulched with coal combustion (DOE share) byproducts, to enhance and restore soil quality and to increase short- and long-term carbon sequestration on degraded lands.
LANL	Los Alamos, NM	\$ 440 k	Develop a Laser-Induced Breakdown Spectroscopy device for field-based detection of carbon in soil.
Massachusetts Institute of Technology (MIT)	Cambridge, MA	\$ 850 k	Inject CO ₂ at 3000 feet in the ocean off the coast of Kona, Hawaii, to monitor the near-field effects of deep-ocean injection of CO ₂ .
Monterey Bay Aquarium Research Institute	Monterey, CA	\$ 987 k	Use a remotely operated vehicle to carry out pilot experiments involving small amounts of CO ₂ to analyze CO ₂ clathrates, their entrained and surrounding fluids, and ocean floor sediments.
Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL)	Livermore, CA	\$ 360 k	Synthesize CO ₂ /water hydrates to study their physical properties for use in possible methane production accompanied by CO ₂ sequestration.
CANMET	Toronto, Canada	\$ 35 k (DOE share)	Conduct pilot-scale tests of coal combustion in oxygen with the objective of lowering the cost of CO ₂ -recycle retrofit systems.
IEM	Palo Alto, CA	\$ 347 k	Complete a field test in which gas impervious membranes, inserted into a landfill structure as it is filled, are employed to enhance production of recoverable methane.
Ohio University	Athens, OH	\$ 1,314 k	Develop a pre-commercial scale process that converts CO ₂ in flue gas to biomass via an algae scrubber.
INEL	Scoville, ID	\$ 420 k	Grow cyanobacterial species as a biofilm, or layered adhering cells to be optimized for efficient photosynthesis and CO ₂ saturation.
Research Triangle Institute	RTP, NC	\$ 500 k	Construct an inorganic, palladium-based membrane device that reforms hydrocarbon fuels to mixtures of hydrogen and CO ₂ , while separating the CO ₂ for sequestration.
TDA	Wheatridge, CO	\$ 500 k	Develop a concept in which gasified coal or natural gas is used to reduce a metal oxide sorbent, thereby producing steam (for electricity) and high-pressure CO ₂ ; regenerate the reduced metal oxide in air.

Limiter les émissions de CO₂ pour lutter contre le réchauffement climatique

VISION FOR THE 21ST CENTURY

FINAL DRAFT

Carnegie Mellon University	Pittsburgh, PA	\$ 896 k	Develop a computer model that will allow different technology options for carbon capture and storage to systematically evaluated for a specific facility of plant.
University of Kansas	Lawrence, KA	\$ 3,250 k	Develop a database of CO ₂ point sources and potential sequestration sites in Illinois, Indiana, Ohio, Kentucky, and Kansas.
Alstom Power	Windsor, CT	\$ 650 k	Perform a detailed analysis of options for retrofitting CO ₂ capture and separation system into AEP's Conesville generating station.
University of Texas's Bureau of Economic Geology	Austin, TX	\$ 291 k	Using existing knowledge of domestic geologic formations and heuristics developed from industrial experience, estimate the carbon storage capacity of geologic structures in the US.
Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)	Berkeley, CA	\$ 2,250 k	Model the Rio Vista reservoir and predict the amount of incremental natural gas as a result of CO ₂ sequestration; develop and test necessary diagnostic and predictive tools.
LANL	Los Alamos, NM	\$ 560 k	Explore terrestrial sequestration opportunities in the Southwest including reclamation sites focusing on western ecosystems
Oak Ridge National Laboratory (ORNL)	Oak Ridge, TN	\$ 640 k	Determine the best way to increase carbon the sequestration potential of land previously disturbed by mining, highway construction, or poor land management practices by adding soil amendments from coal utilization.
McDermott Technology, Inc.	Alliance, OH	\$ 390 k	Investigate the techno-economic viability of large-scale carbon dioxide transportation and deep ocean sequestration.
Argonne National Laboratory (ANL)	Argonne, IL	\$ 260 k	Conduct a 2-year study of ways to retrofit a coal power plant with recirculating technology to concentrate carbon dioxide sufficiently to transport it to sequestration sites.
TVA	Chattanooga, TN	\$ 821 k	Develop a platform that allows economic evaluations of CO ₂ sequestration technologies on the same basis.
TVA	Chattanooga, TN	\$ 755 k	Chemical fixation of CO ₂ in coal combustion byproducts and recycling through algal biosystems.
Physical Sciences Incorporated	Andover, MA	\$ 2,380 k	Develop technologies that use selected species of micro-algae to photo synthesize CO ₂ from power plant exhaust gases.
INEL	Scoville, ID		Partner with LANL to develop thermally optimized membranes.
Oklahoma State University	Stillwater, OK		Sequestration in coal seams.
LBNL	Livermore, CA		Part of the GEO-SEQ project with ORNL and LBNL.
ORNL	Oak Ridge, TN		Part of the GEO-SEQ project with LBNL and LBNL.
Washington University	St. Louis, MO		Study effects of clathrates on sediments in deep oceans.
Naval Research Laboratory	Washington, DC		Offshore hydrate evaluation (part of deep ocean CO ₂ injection project).
Pacific Northwest National Laboratory (PNNL)	Richland, WA		Soil enhancers from solid wastes.
ORNL	Oak Ridge, TN		Part of Ohio University projects.
General Electric-Energy & Environmental Research Corporation	Irvine, CA		Novel energy production cycle investigation.
BP	Anchorage, AK	\$ 23,500 k	The CO ₂ Capture Project (CCP) is an international effort involving eight of the world's leading energy companies to develop new technology to capture and store CO ₂ .
Dakota Gasification Company	Beulah, ND	\$ 27,000 k	A multi-national research project intended to expand the overall knowledge base of the capacity, transport, fate, and storage integrity of carbon dioxide injected into geological formations (Weyburn Field).
Consol	Libary, PA	\$ 9,200 k	The objective of the project is to evaluate the effectiveness and economics of carbon sequestration in an unmineable coal seam in tandem with enhanced coalbed methane production.
Praxair	Tonawanda, NY	\$ 5,900 k	Develop a novel "oxy-fuel" boiler – a new boiler design that incorporates a membrane to separate oxygen from the air which is then used for combustion.
Alstom Power	Windsor, CT	\$ 1,750 k	The objective of this project is to test means to produce concentrated CO ₂ by firing oxygen (rather than air) in an advanced boiler.
The Nature Conservancy	Arlington, VA	\$ 2,037 k	The Nature Conservancy will develop and implement various forestry sequestration projects and refine the tools and methods for measuring their long-term carbon storage potential.

V I S I O N F O R T H E 2 1 S T C E N T U R Y

FINAL DRAFT

Advanced Resources International	Arlington, VA	\$ 1,497 k	The project will study the way CO ₂ is trapped naturally in U.S. deposits and determine if the knowledge can be adapted for sequestration applications.
Oklahoma State University	Stillwater, OK	\$ 255 k	Examine the relationships between coal pore size, water content, and mineralogy and CO ₂ absorption; model the results.
University of Massachusetts	Lowell, MA	\$ 268 k	Proposes to study in a laboratory a deep-ocean CO ₂ -sequestration method that blends liquid CO ₂ , water and finely ground limestone into an emulsion that could be pumped into the ocean for long-term storage.
University of Texas	Austin, TX	\$ 728 k	Develop an alternative solvent that captures more carbon dioxide while using 25 to 50 percent less energy than conventional, state-of-the-art MEA (monoethanol amine) scrubbing, another CO ₂ -removal method.
Albany Research Center	Albany, OR	\$ 800 k	Develop an above-ground approach to converting CO ₂ from fossil fuel processes into mineral carbonates for permanent storage.
University of Kentucky Research Foundation	Lexington, KY	\$ 533 k	The objective is to displace natural gas from black Devonian shales and use these organic-rich rocks to store CO ₂ .

ANNEXE 4

Réduction des émissions de gaz à effet de serre : estimations des potentiels pour 2010 et 2020, coûts, barrières et opportunités

Tableaux issus des rapports « Climate Change 2001: Mitigation » (GIEC, 2001) : résumé à l'attention des décideurs (SPM, summary for policymakers) et résumé technique (TS, technical summary).

Table SP.M.1: Estimates of potential global greenhouse gas emission reductions in 2010 and in 2020 (Sections 3.3-3.8 and Chapter 3 Appendix)

Sector	Historic emissions in 1990 (MTC _{eq} /yr)	Historic C _{eq} annual growth rate in 1990-1995 (%)	Potential emission reductions in 2010 (MTC _{eq} /yr)	Potential emission reductions in 2020 (MTC _{eq} /yr)	Net direct costs per tonne of carbon avoided
Building ^a	CO ₂ only 1,650	1.0	700-750	1,000-1,100	Most reductions are available at negative net direct costs.
Transport	CO ₂ only 1,080	2.4	100-300	300-700	Most studies indicate net direct costs less than US\$2.5/MC but two suggest net direct costs will exceed US\$50/MC.
Industry -energy efficiency -material efficiency	CO ₂ only 2,300	0.4	300-500 ~200	700-900 ~600	More than half available at net negative direct costs. Costs are uncertain.
Industry -Non-CO ₂ gases	170		~100	~100	N ₂ O emissions reduction costs are US\$0-US\$10/MC _{eq} .
Agriculture ^b	CO ₂ only 210 Non-CO ₂ gases 1,250-2,800	n.a.	150-300	350-750	Most reductions will cost between US\$0-100/MC _{eq} , with limited opportunities for negative net direct cost options.
Waste ^c	CH ₄ only 240	1.0	~200	~200	About 75% of the savings as methane recovery from landfills at net negative direct cost; 25% at a cost of US\$20/MC _{eq} .
Montreal Protocol replacement applications -Non-CO ₂ gases	0	n.a.	~100	n.a.	About half of reductions due to difference in study baseline and SRES baseline values. Remaining half of the reductions available at net direct costs below US\$200/MC _{eq} .
Energy supply and conversion ^d	CO ₂ only (1,620)	1.5	50-150	350-700	Limited net negative direct cost options exist; many options are available for less than US\$100/MC _{eq} .
Total	6,900-8,400^d		1,900-2,600^e	3,600-5,050^f	

^a Buildings include appliances, buildings and the building shell.

^b The range for agriculture is mainly caused by large uncertainties about CH₄, N₂O and soil related emissions of CO₂. Waste is dominated by landfill methane and the other sectors could be estimated with more precision as they are dominated by fossil CO₂.

^c Included in sector values above. Reductions include electricity generation options only (fuel switching to gas/nuclear, CO₂ capture and storage, improved power station efficiencies, and renewables).

^d Total includes all sectors reviewed in Chapter 3 for all six gases. It excludes non-energy related sources of CO₂ (cement production, 160MTC; gas flaring, 60MTC; and land use change, 600-1,400MTC) and energy used for conversion of fuels in the end-use sector totals (630MTC). If petroleum refining and coke oven gas were added, global 1990 CO₂ emissions of 7,100MTC would increase by 12%. Note that forestry emissions and their carbon sink mitigation options are not included.

^e The baseline SRES scenarios (for six gases included in the Kyoto Protocol) project a range of emissions of 11,500-14,000MTC_{eq} for 2010 and of 12,000-16,000MTC_{eq} for 2020. The emissions reduction estimates are not compatible with baseline emissions trends in the SRES-B2 scenario. The potential reductions take into account regular turn-over of capital stock. They are not limited to cost-effective options, but exclude options with costs above US\$100/MC_{eq} (except for Montreal Protocol gases) or options that will not be adopted through the use of generally accepted policies.

Table TS.1 : Estimations of greenhouse gas emission reductions and cost per tonne of carbon equivalent avoided following the anticipated socio-economic potential uptake by 2010 and 2020 of selected energy efficiency and supply technologies, either globally or by region and with varying degrees of uncertainty

Region	US\$/tC avoided				2010		2020		References, comments, and relevant section in Chapter 3 of this report
					Potential ^a	Probability ^b	Potential ^a	Probability ^b	
					◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	
Buildings / appliances Residential sector	OECD/EIT	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	Acosta Moreno <i>et al.</i> , 1996; Brown <i>et al.</i> , 1998	
	Dev. cos.	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	Wang and Smith, 1999	
	OECD/EIT	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇		
	Dev. cos.	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇		
Transport Automobile efficiency improvements	USA	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	Interlab, Working Group, 1997 Brown <i>et al.</i> , 1998	
	Europe	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	US DOE/EIA, 1998	
	Japan	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	ECMT, 1997 (8 countries only)	
	Dev. cos.	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	Kashiwagi <i>et al.</i> , 1999 Denis and Koopman, 1998 Worrell <i>et al.</i> , 1997b	
Manufacturing CO ₂ removal – fertilizer; refineries Material efficiency improvement Blended cements N ₂ O reduction by chem. indus. PFC reduction by Al industry HFC-23 reduction by chem. industry Energy efficient improvements	Global	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	Table 3.21	
	Global	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	Table 3.21	
	Global	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	Table 3.21	
	Global	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	Table 3.21	
	Global	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	Table 3.21	
	Global	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	Table 3.21	
	Global	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	Table 3.21	
	Global	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	Table 3.21	
	Global	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	Table 3.19	
	Global	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇◇	Table 3.19	

(continued)

Table TS.1 : continued

Region	US\$/tC avoided	2010		2020		References, comments, and relevant section in Chapter 3 of this report
		Potential ^a	Probability ^b	Potential ^a	Probability ^b	
Agriculture						
Increased uptake of conservation tillage and cropland management		◆◆◆◆	◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇	Zhou, 1998; Table 3.27 Dick et al., 1998 IPCC, 2000
Soil carbon sequestration		◆◆◆◆	◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇	Lal and Bruce, 1999 Table 3.27
Nitrogenous fertilizer management		◆◆◆◆	◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇	Kroeze & Mosier, 1999 Table 3.27 OECD, 1999; IPCC, 2000
Enteric methane reduction		◆◆◆◆	◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇	Kroeze & Mosier, 1999 Table 3.27
Rice paddy irrigation and fertilizers		◆◆◆◆	◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇	OECD, 1998 Reimer & Freund, 1999 Chipato, 1999
Wastes						
Landfill methane capture		◆◆◆◆	◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇	Reimer & Freund, 1999 IPCC, 2000 Landfill methane USEPA, 1999
Energy supply						
Nuclear for coal		◆◆◆◆	◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇	Totals ^c - See Section 3.8.6 Table 3.35a
Nuclear for gas		◆◆◆◆	◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇	Table 3.35b Table 3.35c Table 3.35d

(continue d)

Table TS.1: continued

Region	US\$/tC avoided	2010		2020		References, comments, and relevant section in Chapter 3 of this report
		Potential ^a	Probability ^b	Potential ^a	Probability ^b	
Gas for coal	100-200	◆	◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇	Table 3.35a
CO ₂ capture from coal	100-200	◆	◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇	Tables 3.35b
CO ₂ capture from gas	100-200	◆	◇◇◇◇	◆◆	◇◇	Tables 3.35a + b
Biomass for coal	100-200	◆	◇◇◇◇	◆◆	◇◇	Tables 3.35c + d
Biomass for gas	100-200	◆	◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇	Tables 3.35a + b Moore, 1998; Interlab w. gp. 1997
Wind for coal or gas	100-200	◆◆◆	◇◇◇◇	◆	◇◇◇◇	Tables 3.35c + d
Co-fire coal with 10% biomass	100-200	◆◆◆	◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇	Tables 3.35a - d BTM Cons 1999; Greenpeace, 1999
Solar for coal	100-200	◆	◇◇◇◇	◆◆	◇◇◇◇	Sullatu, 1998
Hydro for coal	100-200	◆◆	◇◇◇◇	◆	◇◇	Table 3.35a
Hydro for gas	100-200	◆◆	◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇	Table 3.35b
		◆	◇◇◇◇	◆◆	◇◇◇◇	Tables 3.35a + b
		◆	◇◇◇◇	◆◆	◇◇◇◇	Tables 3.35c + d

Notes:

^a Potential in terms of tonnes of carbon equivalent avoided for the cost range of US\$/tC given.

◆ = <20 M\$/yr ◆◆ = 20-50 M\$/yr ◆◆◆ = 50-100M\$/yr ◆◆◆◆ = 100-200M\$/yr ◆◆◆◆◆ = >200 M\$/yr

^b Probability of realizing this level of potential based on the costs as indicated from the literature.

◇ = Very unlikely ◇◇ = Unlikely ◇◇◇ = Possible ◇◇◇◇ = Probable ◇◇◇◇◇ = Highly probable

^c Energy supply total mitigation options assumes that not all the potential will be realized for various reasons including competition between the individual technologies as listed below the totals.

Table TS.2: Technological options, barriers, opportunities, and impacts on production in various sectors

Technological options	Barriers and opportunities	Implications of mitigation policies on sectors
<p>Buildings, households and services: Hundreds of technologies and measures exist that can improve the energy efficiency of appliances and equipment as well as building structures in all regions of the world. It is estimated that CO₂ emissions from residential buildings in 2010 can be reduced by 325MtC in developed countries and the EIT region at costs ranging from -US\$250 to -US\$150/tC and by 125MtC in developing countries at costs of -US\$250 to US\$50/tC. Similarly, CO₂ emissions from commercial buildings in 2010 can be reduced by 185MtC in industrialized countries and the EIT region at costs ranging from -US\$400 to -US\$250/tC and by 80MtC in developing countries at costs ranging from -US\$400 to US\$0/tC. These savings represent almost 30% of buildings, CO₂ emissions in 2010 and 2020 compared to a central scenario such as the SRES B2 Marker scenario.</p>	<p>Barriers: In developed countries a market structure not conducive to efficiency improvements, misplaced incentives, and lack of information; and in developing countries lack of financing and skills, lack of information, traditional customs, and administered pricing.</p> <p>Opportunities: Developing better marketing approaches and skills, information-based marketing, voluntary programmes and standards have been shown to overcome barriers in developed countries. Affordable credit skills, capacity building, information base and consumer awareness, standards, incentives for capacity building, and deregulation of the energy industry are ways to address the aforementioned barriers in the developing world.</p>	<p>Service industries: Many will gain output and employment depending on how mitigation policies are implemented, however in general the increases are expected to be small and diffused.</p> <p>Households and the informal sector: The impact of mitigation on households comes directly through changes in the technology and price of household's use of energy and indirectly through macroeconomic effects on income and employment. An important ancillary benefit is the improvement in indoor and outdoor air quality, particularly in developing countries and cities all over the world.</p>
<p>Transportation: Transportation technology for light-duty vehicles has advanced more rapidly than anticipated in the SAR, as a consequence of international R&D efforts. Hybrid-electric vehicles have already appeared in the market and introduction of fuel cell vehicles by 2003 has been announced by most major manufacturers. The GHG mitigation impacts of technological efficiency improvements will be diminished to some extent by the rebound effect, unless counteracted by policies that effectively increase the price of fuel or travel. In countries with high fuel prices, such as Europe, the rebound effect may be as large as 40%; in countries with low fuel prices, such as the USA, the rebound appears to be no larger than 20%. Taking into account rebound effects, technological measures can reduce GHG emissions by 5%-15% by 2010 and 15%-35% by 2020, in comparison to a baseline of continued growth.</p>	<p>Barriers: Risk to manufacturers of transportation equipment is an important barrier to more rapid adoption of energy efficient technologies in transport. Achieving significant energy efficiency improvements generally requires a "clean sheet" redesign of vehicles, along with multibillion dollar investments in new production facilities. On the other hand, the value of greater efficiency to customers is the difference between the present value of fuel savings and increased purchase price, which can often be a small quantity. Although markets for transport vehicles are dominated by a very small number of companies in the technical sense, they are nonetheless highly competitive in the sense that strategic errors can be very costly. Finally, many of the benefits of increased energy efficiency accrue in the form of social rather than private benefits. For all these reasons, the risk to manufacturers of sweeping technological change to improve energy efficiency is generally perceived to outweigh the direct market benefits. Enormous public and private investments in transportation infrastructure and a built environment adapted to motor vehicle travel pose significant barriers to changing the modal structure of transportation in many countries.</p>	<p>Transportation: Growth in transportation demands is projected to remain, influenced by GHG mitigation policies only in a limited way. Only limited opportunities for replacing fossil carbon-based fuels exist in the short to medium term. The main effect of mitigation policies will be to improve energy efficiency in all modes of transportation.</p>

(continued)

Table TS.2: continued

Technological options	Barriers and opportunities	Implications of mitigation policies on sectors
<p>Industry. Energy efficiency improvement is the main emission reduction option in industry. Especially in industrialized countries much has been done already to improve energy efficiency, but options for further reductions remain. 300 - 500MC/yr and 700 -1,100MC/yr can be reduced by 2010 and 2020, respectively, as compared to a scenario like SRES B2. The larger part of these options has net negative costs. Non-CO₂ emissions in industry are generally relatively small and can be reduced by over 85%, most at moderate or sometimes even negative costs.</p>	<p>Opportunities: Information technologies are creating new opportunities for pricing some of the external costs of transportation, from congestion to environmental pollution. Implementation of more efficient pricing can provide greater incentives for energy efficiency in both equipment and modal structure. The factors that hinder the adoption of fuel-efficient technologies in transport vehicle markets create conditions under which energy efficiency regulations, voluntary or mandatory, can be effective. Well-formulated regulations eliminate much of the risk of making sweeping technological changes, because all competitors face the same regulations. Study after study has demonstrated the existence of technologies capable of reducing vehicle carbon intensities by up to 50% or in the long run 100%, approximately cost-effectively. Finally, intensive R&D efforts for light-duty road vehicles have achieved dramatic improvements in hybrid power-train and fuel cell technologies. Similar efforts could be directed at road freight, air, rail, and marine transport technologies, with potentially dramatic pay-offs.</p>	<p>Industry: Mitigation is expected to lead to structural change in manufacturing in Annex I countries (partly caused by changing demands in private consumption), with those sectors supplying energy-saving equipment and low-carbon technologies benefiting and energy-intensive sectors having to switch fuels, adopt new technologies, or increase prices. However, rebound effects may lead to unexpected negative results</p>
<p>Opportunities: legislation to address kcal environmental concerns; voluntary agreements, especially if complemented by government efforts and direct subsidies and tax credits are approaches that have been successful in overcoming the above barriers. Legislation, including standards, and better marketing are particularly suitable approaches for light industries.</p>	<p>Barriers: lack of full-cost pricing, relatively low contribution of energy to production costs, lack of information on part of the consumer and producer, limited availability of capital and skilled personnel are the key barriers to the penetration of mitigation technology in the industrial sector in all, but most importantly in developing countries.</p>	<p>(continued)</p>

Table TS.2: continued

Technological options	Barriers and opportunities	Implications of mitigation policies on sectors
<p>Land-use change and forestry. There are three fundamental ways in which land use or management can mitigate atmospheric CO₂ increases: protection, sequestration, and substitution⁷. These options show different temporal patterns; consequently, the choice of options and their potential effectiveness depend on the target time frame as well as on site productivity and disturbance history. The SAR estimated that globally these measures could reduce atmospheric C by about 83 to 131GtC by 2050 (60 to 87GtC in forests and 23 to 44GtC in agricultural soils). Studies published since then have not substantially revised these estimates. The costs of terrestrial management practices are quite low compared to alternatives, and range from 0 ('win-win' opportunities) to US\$12/tC.</p>	<p>Barriers: to mitigation in land-use change and forestry include lack of funding and of human and institutional capacity to monitor and verify, social constraints such as food supply, people living off the natural forest, incentives for land clearing, population pressure, and switch to pastures because of demand for meat. In tropical countries, forestry activities are often dominated by the state forest departments with a minimal role for local communities and the private sector. In some parts of the tropical world, particularly Africa, low crop productivity and competing demands on forests for crop production and fuelwood are likely to reduce mitigation opportunities.</p> <p>Opportunities: in land use and forestry, incentives and policies are required to realize the technical potential. There may be in the form of government regulations, taxes, and subsidies, or through economic incentives in the form of market payments for capturing and holding carbon as suggested in the Kyoto Protocol, depending on its implementation following decisions by CoP.</p>	<p>GHG mitigation policies can have a large effect on land use, especially through carbon sequestration and biofuel production. In tropical countries, large-scale adoption of mitigation activities could lead to biodiversity conservation, rural employment generation and watershed protection contributing to sustainable development. To achieve this, institutional changes to involve local communities and industry and necessary thereby leading to a reduced role for governments in managing forests.</p>
<p>Agriculture and waste management. Energy inputs are growing by <1% per year globally with the highest increases in non-OECD countries but they have reduced in the EITs. Several options already exist to decrease GHG emissions for investments of <US\$50 to 150/tC. These include increasing carbon stock by cropland management (1.25MtC/yr by 2010); reducing CH₄ emissions from better livestock management (>30MtC/yr) and rice production (7MtC/yr); soil carbon sequestration (50-100MtC/yr) and reducing N₂O emissions from animal wastes and application of N measures are feasible in most regions given appropriate technology transfer and incentives for farmers to change their traditional methods. Energy cropping to displace fossil fuels has good prospects if the costs can be made more competitive and the crops are produced sustainably. Improved waste management can decrease GHG emissions by 200MtC_{eq} in 2010 and 320MtC_{eq} in 2020 as compared to 240MtC_{eq} emissions in 1990.</p>	<p>Barriers: In agriculture and waste management, these include inadequate R&D funding, lack of intellectual property rights, lack of national human and institutional capacity and information in the developing countries, farm-level adoption constraints, lack of incentives and information for growers in developed countries to adopt new husbandry techniques, (need other benefits, not just greenhouse gas reduction).</p> <p>Opportunities: Expansion of credit schemes, shifts in research priorities, development of institutional linkages across countries, trading in soil carbon, and integration of food, fibre, and energy products are ways by which the barriers may be overcome. Measures should be linked with moves towards sustainable production methods.</p> <p>Energy cropping provides benefits of land use diversification where suitable land is currently under utilized for food and fibre production and water is readily available.</p>	<p>Energy: forest and land management can provide a variety of solid, liquid, or gaseous fuels that are renewable and that can substitute for fossil fuels.</p> <p>Materials: products from forest and other biological materials are used for construction, packaging, papers, and many other uses and are often less energy-intensive than are alternative materials that provide the same service.</p> <p>Agriculture/land use: commitment of large areas to carbon sequestration or carbon management may complement or conflict with other demands for land, such as agriculture. GHG mitigation will have an impact on agriculture through increased demand for biofuel production in many regions. Increasing competition for arable land may increase prices of food and other agricultural products.</p>

(continued)

Table TS.2: continued

Technological options	Barriers and opportunities	Implications of mitigation policies on sectors
<p>Waste management: Utilization of methane from landfills and from coal beds. The use of landfill gas for heat and electric power is also growing. In several industrial countries and especially in Europe and Japan, waste-to-energy facilities have become more efficient with lower air pollution emissions, paper and fibre recycling, or by utilizing waste paper as a biofuel in waste to energy facilities.</p>	<p>Barriers: Little is being done to manage landfill gas or to reduce waste in rapidly growing markets in much of the developing world.</p> <p>Opportunities: countries like the US and Germany have specific policies to either reduce methane producing waste, and/or requirements to utilize methane from landfills as an energy source. Costs of recovery are negative for half of landfill methane.</p>	<p>Coal: Coal production, use, and employment are likely to fall as a result of greenhouse gas mitigation policies, compared with projections of energy supply without additional climate policies. However, the costs of adjustment will be much lower if policies for new coal production also encourage clean coal technology.</p>
<p>Energy sector: In the energy sector, options are available both to increase conversion efficiency and to increase the use of primary energy with less GHGs per unit of energy produced, by sequestering carbon, and reducing GHG leakages. Win-win options such as coal bed methane recovery and improved energy efficiency in coal and gas fired power generation as well as co-production of heat and electricity can help to reduce emissions. With economic development continuing, efficiency increases alone will be insufficient to control GHG emissions from the energy sector. Options to decrease emissions per unit energy produced include new renewable forms of energy, which are showing strong growth but still account for less than 1% of energy produced worldwide. Technologies for CO₂ capture and disposal to achieve "clean fossil" energy have been proposed and could contribute significantly at costs competitive with renewable energy although considerable research is still needed on the feasibility and possible environmental impacts of such methods to determine their application and usage. Nuclear power and, in some areas, larger scale hydropower could make a substantially increased contribution but face problems of costs and acceptability. Emerging fuel cells are expected to open opportunities for increasing the average energy conversion efficiency in the decades to come.</p>	<p>Barriers: key barriers are human and institutional capacity, imperfect capital markets that discourage investment in small decentralized systems, more uncertain rates of return on investment, high trade tariffs, lack of information, and lack of intellectual property rights for mitigation technologies. For renewable energy, high first costs, lack of access to capital, and subsidies for fossil fuels and key barriers.</p> <p>Opportunities: for developing countries include promotion of leapfrogs in energy supply and demand technology, facilitating technology transfer through creating an enabling environment, capacity building, and appropriate mechanisms for transfer of clean and efficient energy technologies. Full cost pricing and information systems provide opportunities in developed countries. Ancillary benefits associated with improved technology, and with reduced production and use of fossil fuels, can be substantial.</p>	<p>Oil: Global mitigation policies are likely to lead to reductions in oil production and trade, with energy exporters likely to face reductions in real incomes as compared to a situation without such policies. The effect on the global oil price of achieving the Kyoto targets, however, may be less severe than many of the models predict, because of the options to include non-CO₂ gases and the flexible mechanisms in achieving the target, which are often not included in the models.</p>
<p>Research is still needed on the feasibility and possible environmental impacts of such methods to determine their application and usage. Nuclear power and, in some areas, larger scale hydropower could make a substantially increased contribution but face problems of costs and acceptability. Emerging fuel cells are expected to open opportunities for increasing the average energy conversion efficiency in the decades to come.</p>	<p>Ancillary benefits associated with improved technology, and with reduced production and use of fossil fuels, can be substantial.</p>	<p>Gas: Over the next 20 years mitigation may influence the use of natural gas may positively or negatively, depending on regional and local conditions. In the Annex I countries any switch that takes place from coal or oil would be towards natural gas and renewable sources for power generation. In the case of the non-Annex I countries, the potential for switching to natural gas is much higher, however energy security and the availability of domestic resources are considerations, particularly for countries such as China and India with large coal reserves.</p>

(continued)

Table TS.2: continued

Technological options	Barriers and opportunities	Implications of mitigation policies on sectors
<p>Halo-carbons: Emissions of HFCs are growing as HFCs are being used to replace some of the ozone-depleting substances being phased out. Compared to SRES projections for HFCs in 2010, it is estimated that emissions could be lower by as much as 100MC_{eq} at costs below US\$200/HC_{eq}. About half of the estimated reduction is an artifact caused by the SRES baseline values being higher than the study baseline for this report. The remainder could be accomplished by reducing emissions through containment, recovering and recycling refrigerants, and through use of alternative fluids and technologies.</p>	<p>Barriers: uncertainty with respect to the future of HFC policy in relation to global warming and ozone depletion.</p> <p>Opportunities: capturing new technological developments</p>	<p>Renewables: Renewable sources are very diverse and the mitigation impact would depend on technological development. It would vary from region to region depending on resource endowment. However, mitigation is very likely to lead to larger markets for the renewables industry. In that situation, R&D for cost reduction and enhanced performance and increased flow of funds to renewables could increase their application leading to cost reduction.</p> <p>Nuclear: There is substantial technical potential for nuclear power development to reduce greenhouse gas emissions; whether this is realized will depend on relative costs, political factors, and public acceptance.</p>
<p>Geo-engineering: Regarding mitigation opportunities in marine ecosystems and geo-engineering^b, human understanding of biophysical systems, as well as many ethical, legal, and equity assessments are still rudimentary.</p>	<p>Barriers: In geo-engineering, the risks for unanticipated consequences are large and it may not even be possible to engineer the regional distribution of temperature and precipitation.</p> <p>Opportunities: Some basic inquiry appears appropriate.</p>	<p>Sector not yet in existence: not applicable.</p>

^a 'Protection' refers to active measures that maintain and preserve existing C reserves, including those in vegetation, soil organic matter, and products exported from the ecosystem (e.g., preventing the conversion of tropical forests for agricultural purposes and avoiding drainage of wetlands). 'Sequestration' refers to measures, deliberately undertaken, that increase C stocks above those already present (e.g., afforestation, revised forest management, enhanced C storage in wood products, and altered cropping systems, including more forage crops, reduced tillage). "Substitution" refers to practices that substitute renewable biological products for fossil fuels or energy-intensive products, thereby avoiding the emission of CO₂ from combustion of fossil fuels.

^b Geo-engineering involves efforts to stabilize the climate system by directly managing the energy balance of the earth, thereby overcoming the enhanced greenhouse effect.

Centre scientifique et technique
Service connaissance et diffusion de l'information géologique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 33 (0)2 38 64 34 34