

PAR VALÉRIE BRÉNUGAT



LE CO₂ AU REBUT

Au rythme où vont les hommes, la teneur en gaz carbonique dans l'atmosphère pourrait doubler vers le milieu du siècle prochain. A la clé, un possible chamboulement du climat. Comment freiner cette tendance et éliminer ces dangereux surplus ? Des chercheurs proposent tout simplement de traiter le CO₂ comme un vulgaire déchet, tout juste bon à être enfoui dans les profondeurs de la terre ou de l'océan. Des solutions audacieuses et encore bien incertaines.

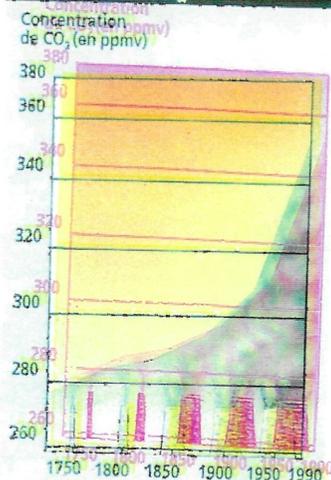


C'est désormais une certitude solidement établie : les activités humaines sont en train de mettre à mal la précieuse enveloppe gazeuse de la planète. Depuis une bonne dizaine d'années maintenant, des centaines de scientifiques à travers le monde auscultent l'atmosphère pour tenter de prendre la mesure des dégâts. Certes, leurs conclusions sont loin d'être définitives. A mesure qu'elles progressent, les recherches révèlent surtout la complexité insoupçonnée du système climatique de la Terre. Mais ils sont en revanche unanimes pour dire que la facture se paiera un jour par une perturbation du climat. Ainsi, la plupart des scénarios, les uns très alarmistes, les autres plus prudents, retiennent-ils comme une hypothèse à prendre très au sérieux un possible réchauffement de la planète. Au banc des accusés, les gaz à effet de serre, et notamment le CO₂. Non pas que le dioxyde de carbo-

ne soit le plus abondant dans cette catégorie. La vapeur d'eau vient largement en tête. Le méthane, les CFC ou les oxydes d'azote sont également de la partie. Mais, selon les estimations les plus récentes, comme celles, par exemple, de J.F. Mitchell, du Meteorological Office de Braknell, le CO₂ est impliqué pour un tiers dans l'effet de serre naturel. C'est également le gaz à effet de serre qui augmente le plus vite du fait des activités humaines.

Les mesures systématiques du CO₂ atmosphérique ont commencé en 1958. Les scientifiques disposent donc aujourd'hui d'un recul suffisant pour donner une estimation fiable de l'ampleur du phénomène. Ainsi, entre 1958 et 1990, sa concentration moyenne est-elle passée de 315 ppmv (partie par million en volume) à 354 ppmv, une teneur qui représente une augmentation évaluée à 25 % par rapport à la période préindustrielle. Bon an

De plus en plus de CO₂ dans l'atmosphère



mélange, en chiffres absolus, la consommation mondiale des combustibles fossiles, charbon et hydrocarbures, entraîne un rejet dans l'atmosphère de six milliards de tonnes d'équivalent carbone de CO₂ (quantité de carbone présente dans le CO₂) par an, un à deux milliards de tonnes dus à la déforestation venant, selon les estimations, alourdir le bilan. Cet enrichissement inquiétant peut paraître

petit de chose si on le rapporte aux impressionnants gisements naturels de carbone. L'atmosphère en contient en permanence quelque 700 milliards de tonnes. L'ensemble des organismes vivants, végétaux et animaux, ainsi que les sols en stockent 1 800 milliards de tonnes. Quant au réservoir que constituent l'eau et surtout les sédiments marins, il est estimé à 39 000 milliards de tonnes. Chaque année, sans que l'homme n'y soit pour rien, 90 milliards de tonnes de carbone s'échangent, dans les deux sens, entre l'atmosphère et l'océan.

Dans ce système extrêmement complexe et encore très mal connu, l'océan est un irremplaçable régulateur. On estime qu'il renouvelle tous les huit ans la totalité du CO₂ dans l'atmosphère et qu'il joue un rôle régulateur dans sa concentration.

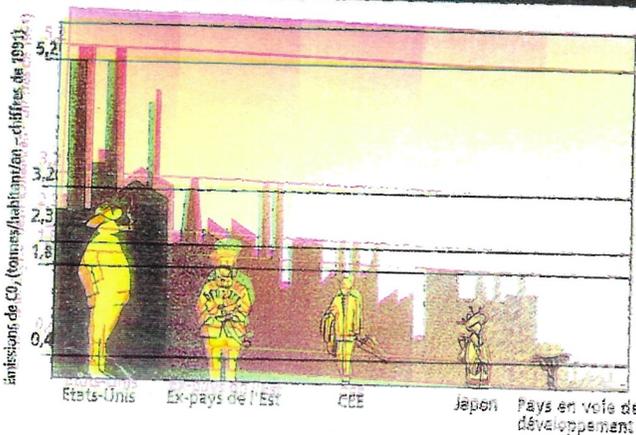
Mais ce formidable encaisseur a ses rythmes. Il est lent à réagir. Trop, en tout cas, pour corriger les excès dus aux activités humaines. Selon Paul Quay, de l'université de Washington, l'océan absorberait chaque année 2,1 milliards de tonnes de CO₂ anthropogénique (produit par l'activité humaine). Un peu plus selon d'autres estimations. La végétation, dont la croissance dépend étroitement du carbone atmosphérique, pourrait, selon certaines études, se trouver dopée et en absorber un bon milliard de tonnes. Mais le solde, en tout état de cause, demeure positif. Un tiers environ du CO₂ d'origine humaine, soit entre 2,5 et 3 milliards de tonnes de carbone, reste dans l'atmosphère.

Comment en réduire la production ? Les termes de l'équation étant ainsi posés, il reste à imaginer les parades. Depuis la fin des années 1980, le sujet a figuré à l'ordre du jour d'un nombre impressionnant de conférences mondiales. Dernier sommet en date, celui de Rio. Brutalement propulsées sur le devant de la scène par les grands chocs pétroliers, économies d'énergie et énergies alternatives réapparaissent dans les programmes de nombreux pays sous la bannière de l'environnement. Les progrès technologiques réalisés en laboratoire sur les cellules photovoltaïques pourraient ainsi favoriser une relance de l'énergie solaire. Britanniques et Danois envisagent de confier aux éoliennes, d'ici 2025, 10 % de leur production totale d'énergie. En France, où l'on vante surtout la "neutralité" en matière d'effet de serre des réacteurs nucléaires, une éolienne de 300 kilowatts tourne depuis un an à Dunkerque. La voiture électrique fait timidement ses premiers tours de roues (voir encadré page ci-contre). L'"essence verte" commence également à faire recette aux Etats-Unis, par exemple dans le cadre du Clear Air Act, ou au Canada, qui s'est doté

d'un Plan vert (1). En France, la consommation de biocarburants et de biocombustibles pourrait, selon des estimations du ministère de l'Environnement, représenter 15 millions de tonnes d'équivalent pétrole d'ici vingt à trente ans.

La forêt, piège à CO₂. A côté de ces pistes déjà anciennes, on voit surgir depuis quelque temps des projets beaucoup plus étonnants. Surprenants même. L'indésirable dioxyde de carbone craché par les usines ou les centrales thermiques est, ni plus ni moins, rétrogradé au rang d'un vulgaire déchet que l'on va chercher à élimi-

Responsables : les pays les plus industrialisés...



(1) Il s'agit, dans les deux cas, de programmes d'action visant à encourager l'utilisation de biocarburants.

ROULER ELECTRIQUE, DÈS 1995

Un bon coup de pouce à la voiture électrique a été donné par le gouvernement français, le 28 juillet dernier. En effet, sous l'impulsion du ministère de l'Environnement et du ministère de l'Industrie, Renault, PSA et EDF ont signé un accord cadre. Ils s'engagent, d'ici à 1995, à équiper au moins 10 agglomérations pilotes des installations nécessaires à la recharge de batteries, de réseaux d'entretien et de maintenance, de location de batteries. Des villes pionnières comme La Rochelle, Châtelleraut et Tours seront de la partie.

La création d'un réseau de location de batteries permettra de diminuer le coût d'achat d'un véhicule électrique, acquis alors sans accumulateurs. En effet, ces véhicules ont un prix de 40 % à 50 % plus élevé qu'une voiture à moteur thermique. Le budget consacré au Predit (Programme de recherche, développement et innovation des tech-

nologies des transports terrestres) passera ainsi de 200 à 500 millions de francs sur deux ans. De plus, l'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) distribuera 15 000 F pour l'achat, par les collectivités territoriales, de 1 000 véhicules électriques. Déjà, depuis deux ans, l'Ademe consacrait à l'ensemble des acheteurs de véhicules électriques une aide de 1 million de francs chaque année.

Mais la voiture électrique présente encore de nombreux inconvénients. La recharge des batteries d'un véhicule nécessite huit à dix heures (pour une autonomie de 100 à 160 km), ou une minute par kilomètre pour une recharge plus rapide mais partielle. Les constructeurs automobiles travaillent d'ores et déjà sur des voitures qui allieraient l'énergie électrique en ville et l'essence sur les routes. Exemple d'un compromis : la Peugeot 405 (notre photo). En



ville, son moteur électrique est alimenté par des batteries ; pour les longs déplacements, par un groupe électrogène. Il s'agit d'un moteur à explosion fonctionnant au gazole et entraînant une bobine à 3 500 tours par minute dans un champ magnétique. Le courant produit permet de recharger les batteries et d'alimenter le moteur électrique de la voiture. La vitesse de ce véhicule peut monter à 130 km/h. Un plein de

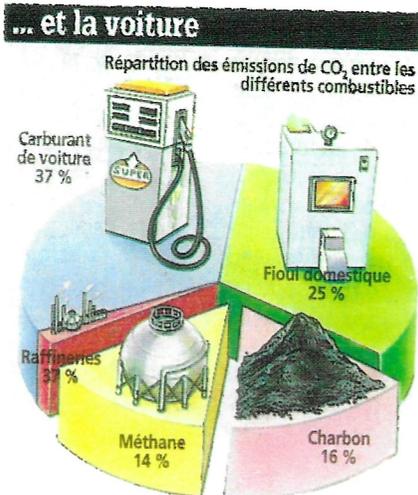
gazole permet de couvrir une distance de 750 km.

Si la France a fait un grand pas en avant pour promouvoir la voiture électrique, elle n'a pas rejoint la politique de la Californie. En effet, à partir de 1998, 2 % de la production de chaque constructeur en Californie sera consacrée à des véhicules "zéro pollution", c'est-à-dire électriques. Résultat : en 2003, 10 % des voitures vendues devront être électriques !

ner. Dans ce registre original, la solution la plus simple à imaginer consiste à opposer une barrière verte aux émissions de CO₂. Ainsi, une compagnie d'électricité américaine a-t-elle financé au Guatemala une plantation de 500 kilomètres carrés, censée digérer les 400 000 tonnes du dioxyde de carbone émis en quarante ans par une centrale classique. Les résultats demeurent toutefois très hypothétiques. Les études les plus récentes en physiologie végétale semblent effectivement montrer qu'un accroissement de CO₂ dans l'air stimule la photosynthèse et la croissance des plantes. De là à attendre de cette pompe à carbone naturelle qu'elle s'at-

taque efficacement aux excès de CO₂, il y a un pas que beaucoup hésitent à franchir. Un million de kilomètres carrés de forêts seraient nécessaires, selon certaines études, pour absorber un gigatonne (un milliard de tonnes) de carbone par an.

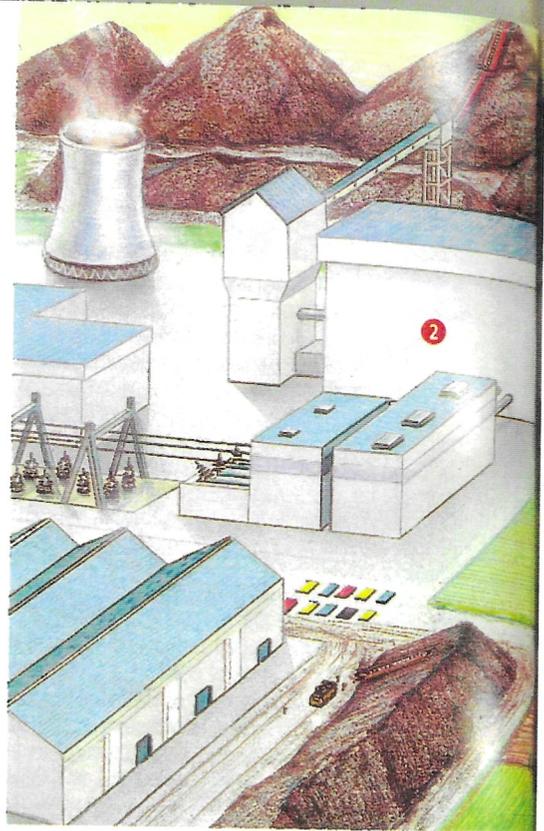
Un "pot catalytique" pour usines ? Autre piège à CO₂, qui suscite aujourd'hui l'intérêt, la microflore océanique. L'activité biologique très intense qui règne à la surface des océans, jusqu'à cent mètres de profondeur, est considérée comme un acteur important dans le cycle du carbone océanique. Fixé par le plancton végétal ou par les coquilles calcaires de minuscules mollusques, le carbone,



entraîné dans les cycles très longs de l'océan, va migrer entre les couches d'eau superficielles et profondes où il sera dissous. Une petite partie ira se déposer sur les fonds et alimenter le stock des sédiments marins. Les processus physiques et chimiques impliqués dans le fonctionnement de cette véritable pompe biologique demeurent extrêmement complexes. Assez en tout cas pour justifier un programme international, Joint Global Flux Ocean Study, qui réunit plusieurs dizaines de chercheurs dans le monde. Ce très vaste projet devrait permettre de mieux cerner les subtils équilibres qui commandent les échanges de carbone entre l'atmosphère et la mer.

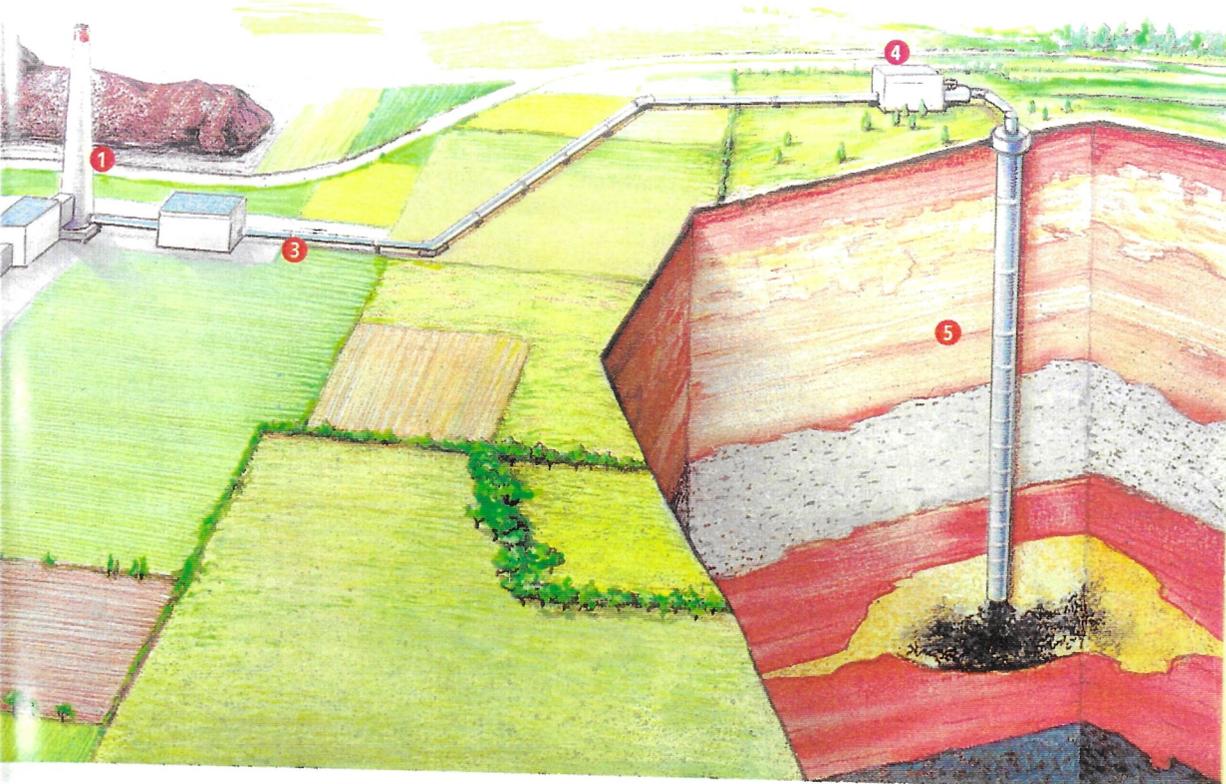
Le groupe Hitachi et le ministère de la Recherche du Japon, un des pays qui investit sans doute le plus dans les technologies de l'environnement, n'ont toutefois pas attendu pour tenter de tirer parti de la microflore marine ou aquatique. Ce sont les microalgues, en l'occurrence, qui intéressent les chercheurs du pays du Soleil-Levant. Le département des équipements et des systèmes industriels d'Hitachi, que dirige Hiroshi Kuwahara, a ainsi imaginé de copier la photosynthèse de ces microalgues en leur faisant digérer le CO_2 émis par les centrales thermiques. Intensément éclairées en lumière solaire indirecte par un réseau de fibres optiques, ces micro-organismes seraient mis en culture dans un bain nutritif où on leur ferait subir, sous température soigneusement contrôlée, un véritable gavage au CO_2 récupéré à la sortie des centrales. Très optimistes, les chercheurs japonais de biotechnologie marine de la ville de Kamaishi affirment avoir isolé, dans des lacs et dans des sources chaudes, plusieurs espèces d'algues microscopiques susceptibles d'améliorer de 20 % la fixation du gaz carbonique. Une opération tout bénéfique ; en effet, les résidus de ce retraitement d'un nouveau genre pourraient être utilisés, selon Hiroshi Kuwahara, comme biocarburant ou comme aliment. Pas moins de seize sociétés travaillent à ce projet sous la houlette d'Hitachi. Un projet très sérieux, puisque les technologies imposées par la mise au point des collecteurs de lumière - des fibres optiques ainsi que les logiciels qui piloteraient une telle installation - sont d'ores et déjà à l'étude. Ces recherches, promettent les Japonais, devraient permettre l'implantation d'une usine test au début du prochain siècle. Coût du projet : 123 millions de dollars.

Le stockage plus prisé que le retraitement. En dehors du Japon, la filière du retraitement ne semble toutefois pas avoir fait à ce jour beaucoup



d'adeptes. Moins par exemple que le stockage. «Les recherches dans ce domaine ont sérieusement débuté au niveau mondial il y a trois ans», précise Maurice Claverie qui a dirigé le Programme interdisciplinaire de l'énergie et des matières premières au CNRS. Anciens gisements de pétrole ou de gaz naturel, nappes aquifères, poches de sel... Autant de cavités naturelles du sous-sol dont la reconversion en sites de stockage de CO_2 est très sérieusement envisagée (voir dessin ci-dessus). Les Néerlandais, en particulier, vantent avec beaucoup de conviction les capacités impressionnantes de leurs gisements de gaz. Quelque 220 gisements de méthane ont été inventoriés aux Pays-Bas, dont 90 sont actuellement en exploitation. Le plus grand d'entre eux, celui de Groningen, contient 2 500 milliards de m^3 de gaz. Selon des chercheurs d'Utrecht, on dispose là, après épuisement du méthane, d'une capacité de stockage de quelque 8 milliards de tonnes de CO_2 . De quoi enfouir, sous pression de 350 bars et jusqu'à 3 000 mètres de profondeur, les rejets en CO_2 de cinquante centrales fonctionnant pendant cinquante ans. Groningen ne sera épuisé qu'en 2050 environ, mais d'autres gisements plus modestes seront disponibles dès le début du prochain siècle.

Selon les auteurs de ces études, ce type de site présente l'énorme avantage d'avoir depuis longtemps fait la preuve de son étanchéité. Le confinement du CO_2 ne présenterait donc pas de problème



Le CO₂ des centrales stocké dans le sous-sol...

Des réservoirs de gaz naturel épuisés ! Pourquoi ne pas recycler ces poches, de méthane par exemple, en sites de stockage de CO₂ ? Des chercheurs néerlandais ont imaginé un dispositif pour injecter le gaz carbonique dans les profondeurs de l'écorce terrestre. Le dioxyde de carbone présent dans la fumée (1) émise par une centrale thermique (2) serait comprimé pour son transport en pipeline (3). En raison de l'action corrosive du mélange du CO₂ et de l'eau, le gaz serait pressurisé à 65 bars, pour éviter la condensation de l'eau dans le pipeline. Sur le site de stockage, le gaz serait ensuite comprimé à des pressions de 210 bars (4), puis distribué dans différents puits (5). Il reste néanmoins une grande inconnue : les réactions chimiques du CO₂ avec l'écorce terrestre !

particulier. Autre intérêt, les technologies de transport et de mise sous pression du gaz ont été largement éprouvées par l'exploitation du méthane. Selon ces chercheurs, on peut même envisager, au moins pour les gisements terrestres, d'utiliser une partie des installations existantes sur les têtes de puits de méthane. Ainsi, le puits d'Annerveen, toujours au Pays-Bas, ferait un bon candidat. On pourrait y mettre au rebut le CO₂ rejeté pendant soixante-six ans par une centrale de 600 MW.

Sur le papier, le principe est d'une simplicité enfantine. Le CO₂ est collecté à la centrale, mis sous pression pour son transport par gazoduc, à nouveau mis sous pression sur le site, puis injecté dans le sous-sol. La réalisation sera sans doute plus complexe. Le bilan économique d'une telle filière de stockage reste à faire. Il peut s'avérer intéressant pour certains sites, beaucoup plus lourd pour d'autres, notamment les gisements offshore. De sérieuses inconnues devront par ailleurs être levées avant que l'aventure ne puisse être tentée. La chimie du CO₂, en particulier sa transformation en solution acide lorsqu'il est en contact avec l'eau, pourrait par exemple avoir raison des plus solides espoirs dans ce domaine. Les

chercheurs néerlandais en conviennent. Le risque de dégradation du réservoir devra être très sérieusement pris en compte.

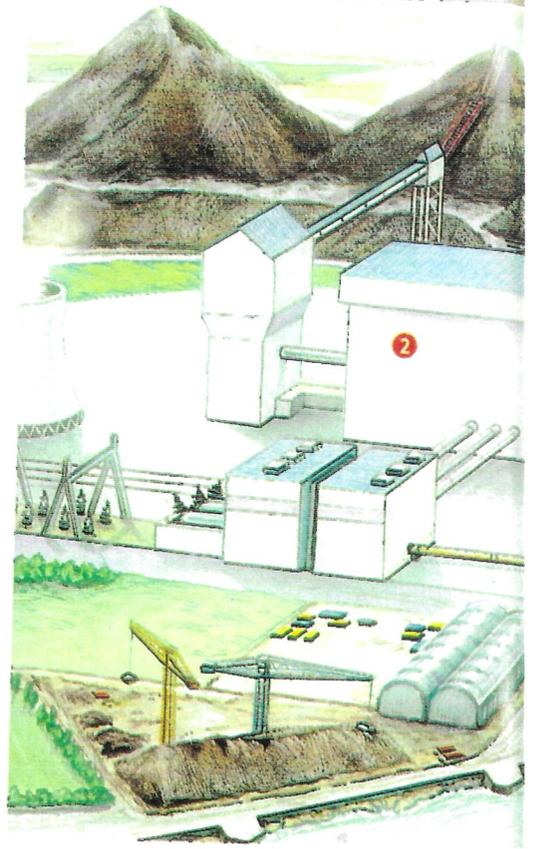
Les gisements de gaz apparaissent toutefois comme des candidats beaucoup plus fiables que les puits de pétrole ou les nappes aquifères (nappes d'eau souterraines) profondes, deux autres solutions également envisagées. Ainsi a-t-on imaginé d'utiliser l'injection de CO₂ dans des gisements d'hydrocarbures en cours d'épuisement en mer du Nord. Outre la mise au rebut du dioxyde de carbone, ce procédé entraînerait une exploitation plus poussée du gisement, l'injection de gaz carbonique permettant de récupérer les hydrocarbures collés à la paroi. Solution très alléchante en apparence. Là encore, les estimations sur les capacités de stockage donnent le vertige. On parle de 60 milliards de tonnes. Inconvénient majeur toutefois : outre le coût prohibitif qu'exigeraient de telles installa-

tions, le CO_2 ne demanderait qu'à s'échapper des roches à hydrocarbure. On estime qu'une partie du stock serait perdue au bout de cinq ans. Même type d'obstacle rédhibitoire pour les nappes aquifères. L'aptitude de ces réservoirs naturels - que l'on trouve entre 1 500 et 3 000 mètres de profondeur - à retenir du CO_2 sous pression est totalement incertaine. Le prix à payer pour les équiper en puits, pipelines et compresseurs semble par ailleurs les éliminer de la course.

Injecter le CO_2 au fond des mers ? L'océan et sa formidable capacité de digestion suscitent les projets les plus audacieux, voire les plus fous. En théorie, les océans sont en mesure d'absorber la plus grande partie du CO_2 rejeté dans l'atmosphère par les activités humaines. Les choses, malheureusement, ne sont pas aussi simples. «Le problème crucial», expliquent par exemple Hein J.W de Baar et son collègue H.C Stoll, de l'institut néerlandais des sciences de l'océan, «est que le CO_2 a augmenté très rapidement dans l'atmosphère, en l'espace de cent à deux cents ans, alors que la réponse de l'océan pour résorber une telle pointe sera très lente, de l'ordre de plusieurs centaines d'années, voire de millions d'années.» D'où l'idée de contourner cette barrière en injectant directement le CO_2 au fond de la mer.

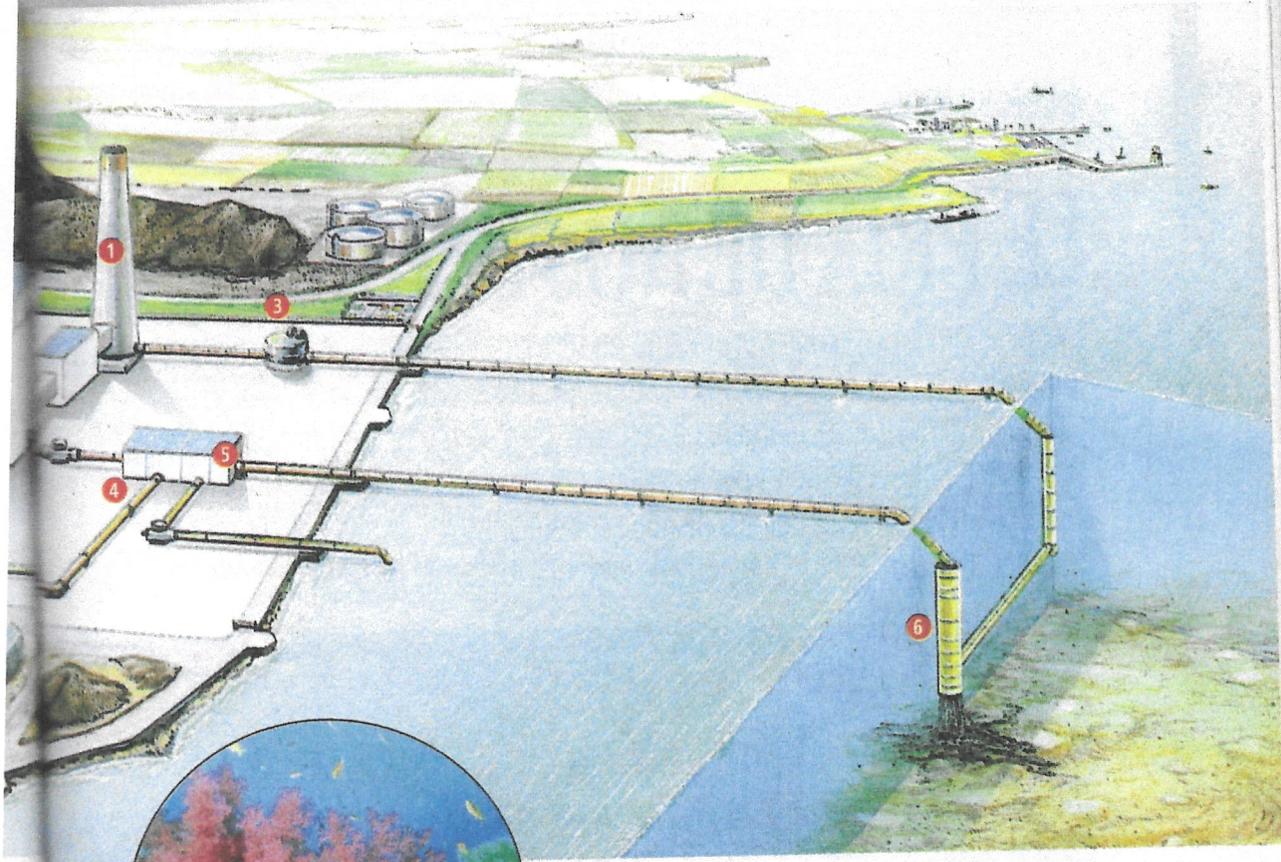
La solution peut paraître d'autant plus ingénieuse qu'elle mettrait à profit la formidable faculté de brassage des océans. Toutes les mers du monde sont parcourues par un système complexe de puissants courants. Créés par le vent et entraînés en grandes boucles cycloniques par la force de Coriolis, les courants de surface sont les plus connus. Ils assurent la circulation des eaux, des régions équatoriales vers les pôles. Le retour se fait en profondeur selon des cycles très variables. Une partie de l'eau revient en surface dans les zones équatoriales après un périple d'une trentaine d'années, à des profondeurs allant de 600 à 1 000 mètres. Mais lorsqu'elles atteignent les régions polaires, les eaux transportées par les grands courants comme le Gulf Stream, une fois refroidies et devenues beaucoup plus denses, peuvent s'enfoncer jusqu'à 2 000 mètres de profondeur. Le voyage du retour entre la mer de Norvège et le Pacifique Nord, par exemple, dure entre cinq cents et mille ans. Ces gigantesques migrations océaniques qui déplacent de formidables quantités d'énergie et de chaleur jouent un rôle de premier plan dans la régulation du climat de la planète (voir l'article p. 42). Ce sont elles également qui commandent le brassage et le cycle du carbone dissous dans l'océan.

Pourquoi pas, dès lors, leur confier le CO_2 rejeté par les centrales thermiques ? Même principe que



pour les projets de stockage dans les réservoirs de gaz. Le CO_2 serait prélevé à la source de pollution, transporté par pipeline et injecté en mer sous pression. Les plus audacieux, à l'image de Charley F. Baes, du Oak Ridge National Laboratory, aux Etats-Unis, ont poussé le jeu jusqu'à suggérer diverses technologies d'injection. La plus simple serait de se débarrasser du CO_2 sous forme gazeuse, à charge pour la circulation océanique de l'emporter vers le fond. Une autre technique consisterait à liquéfier le CO_2 avant de l'injecter à 3 000 mètres de profondeur. Plus dense que l'eau, il resterait alors au fond. On pourrait également, estime ce chercheur, conditionner le CO_2 en cristaux de CO_2 -hydrate (corps solide formé de dioxyde de carbone et d'eau) qui, plus lourds que l'eau, migreraient vers le fond. Quelques grands courants font ainsi figure de candidats possibles pour ce transport. C'est le cas, par exemple, des grands mouvements qui s'amorcent dans la région du Groenland, un système complexe de circulation profonde qui longe la côte est des Etats-Unis en direction du sud. On a également songé à mettre à contribution le courant qui règle les échanges entre la Méditerranée et l'Atlantique via le détroit de Gibraltar.

Les obstacles qui s'opposent à de tels projets sont toutefois extrêmement nombreux. Par exemple, on sait déjà que la récupération du CO_2 , son conditionnement et son transport exigeront



... ou recyclé au fond de la Méditerranée

C'est l'idée d'un chercheur italien : avant la sortie de la cheminée (1) d'une centrale thermique à charbon (2), un compresseur (3) récupérerait le gaz carbonique pour le comprimer. Le CO₂ serait ensuite dirigé vers le tuyau d'évacuation dans l'eau de mer (4). Là, le gaz serait dissous dans l'eau provenant du condensateur (5) de la centrale, puis expédié à des profondeurs de 1 000 à 3 000 m (6). Gros point noir de ce type de stockage : l'acidification des eaux due au gaz carbonique pourrait menacer toute l'écologie marine !

une consommation d'énergie telle que les coûts seront extrêmement élevés. Mais surtout, on ignore tout des risques que ces injections massives et brutales de CO₂ peuvent faire courir à l'environnement marin. L'acidification des eaux de surface pourrait, par exemple, avoir des conséquences très fâcheuses sur la microflore marine. Or les scientifiques estiment, on l'a vu, qu'elle joue un rôle pré-cieux dans le cycle du carbone. On ignore tout également des dégâts que cet apport inopiné est susceptible de provoquer sur les sédiments océaniques. Le régime des grands courants et, notamment, les échelles de temps qui régissent la circulation océanique demeurent en partie une énigme. Un programme de recherche international, baptisé WOCE, vient d'ailleurs d'être engagé avec pour objectif un inventaire dynamique de la circulation océanique. Le satellite franco-américain *Topex-Poseidon*, lancé par Ariane cet été, fut spécialement conçu pour ce travail qui va mobiliser plusieurs

centaines de chercheurs pendant six à sept ans. Devant tant d'incertitudes, vouloir court-circuiter les cycles naturels peut paraître insensé. On estime, par exemple, que la moitié du CO₂ que l'on confierait ainsi à la Méditerranée serait de retour dans l'atmosphère dans cinquante à deux cents ans. Bénéfice nul. «Il ne peut s'agir que d'un remède partiel, cher et très temporaire», reconnaissent les chercheurs qui se laissent tenter par ces projets. Difficile, en attendant, d'échapper à des solutions plus classiques. Les économies d'énergie et la diminution des émissions demeurent à l'ordre du jour. Les résultats, tout en demi-teinte, du sommet de Rio prouvent qu'elles ont de leur côté beaucoup de mal à s'imposer. Les Etats-Unis, par exemple, mais également certains pays producteurs de pétrole, ont refusé de se joindre aux 143 signataires de la Convention sur les changements climatiques. Un texte jugé pourtant peu contraignant pour les pollueurs.

Valérie Brénuget