

Des horloges de plus en plus complexes

Plusieurs découvertes ont récemment précisé les mécanismes génétiques de l'horloge biologique. D'une part, le gène est subdivisé en gène *per1*, *per2*, *per3*. D'autre part, l'équipe de Norio Ishida, de l'Institut Tsukuba, a montré que le gène *per2* est exprimé dans les tissus périphériques tel le foie, les poumons, les reins... avec un rythme différent selon les tissus. Cependant, les expressions des trois gènes sont commandées par le noyau supra-chiasmatique : la lésion de ce noyau entraîne la disparition de tous les rythmes, y compris ceux des tissus périphériques. Ces auteurs supposent qu'un facteur encore inconnu, transporté par le sang, assure cette dépendance.

Par ailleurs, Gijsbertus Van der Horst, de l'Université de Rotterdam, a montré que deux protéines, nommées *cry1* et *cry2*, de la famille des cryptochromes, des pigments bleus, sont synthétisées dans certaines cel-

lules de la rétine, et jouent un rôle important dans la régulation de l'horloge biologique (voir *Pour la Science*, juillet 1999).

De surcroît, selon Manuel Field, de l'Université de Cambridge, à l'inverse de ce que l'on a cru lors de la découverte des gènes *per*, les mécanismes de régulation de l'horloge biologique de la drosophile sont différents de ceux des mammifères.

Enfin, la mélatonine est synthétisée uniquement la nuit, aussi bien chez les espèces diurnes que nocturnes : elle n'est donc pas une hormone du sommeil. Pour certains neurobiologistes, elle serait plutôt un signal d'information sur le moment du jour ou de la nuit. Toutefois, de nombreuses lignées de souris n'ont pas de mélatonine et suivent pourtant des rythmes jour / nuit très prononcés. Les rôles de la mélatonine restent donc encore à définir.

Jean-Louis VALATX,
Unité INSERM U480, Lyon.

de mammifères et de mouches, les généticiens ont montré que la protéine CLOCK se fixe sur le gène *per* de souris et sur les gènes *per* et *tim* des mouches.

Ainsi, chez les mouches, dont les horloges sont les mieux comprises, la protéine CLOCK s'associe à une protéine codée par un gène nommé *cycle*, et elle active les gènes *per* et *tim* quand les protéines PER et TIM sont absentes du noyau. Ces quatre gènes et leurs protéines constituent le cœur de l'horloge biologique des mouches ; avec quelques modifications, ce système gouverne également les rythmes circadiens de la plupart des animaux.

Depuis peu, Steve Reppert et ses collègues de l'Université Harvard explorent les signaux spécifiques qui relient les horloges biologiques de la souris et de divers comportements

modulés par ces horloges. Certains gènes semblent être activés par la protéine CLOCK, alors que les protéines PER et TIM inhibent cette fixation pendant la boucle de rétroaction : ils instaurent ainsi un cycle d'activité génétique.

Nous espérons découvrir d'autres gènes commandés par cette horloge dans des organismes telles les drosophiles et les souris. Nous découvrirons alors sans doute des protéines, dont les gènes n'ont pas encore été identifiés, qui agissent sur le comportement. L'une d'elles, ou bien un composant de l'horloge moléculaire elle-même, deviendra peut-être une cible pour des médicaments destinés à soulager le décalage horaire, les effets secondaires du travail en horaires décalés ou, encore, des troubles du sommeil et des dépressions qui y sont associées.

Michael YOUNG est professeur de génétique et directeur de laboratoire à l'Université Rockefeller.

Michael W. YOUNG, *The Molecular Control of Circadian Behavioral Rhythms and Their Entrainment in Drosophila*, in *Annual Review of Biochemistry*, vol. 67,

pp. 135-152, 1998.

Jay C. DUNLAP, *Molecular Bases for Circadian Clocks*, in *Cell*, vol. 96, n° 2, pp. 271-290, 22 janvier 1999.

J. WEINER, *Time, Love, Memory : A Great Biologist and His Quest for the Origins of Behavior*, Alfred Knopf, 1999.



PLATE-FORME OFF-SHORE
D'EXTRACTION DE GAZ NATUREL
DE SLEIPNER

MER DU NORD

Le stockage des gaz à effet de serre

HOWARD HERZOG • BALDUR ELIASSON • OLAV KAARSTAD

GRÈS

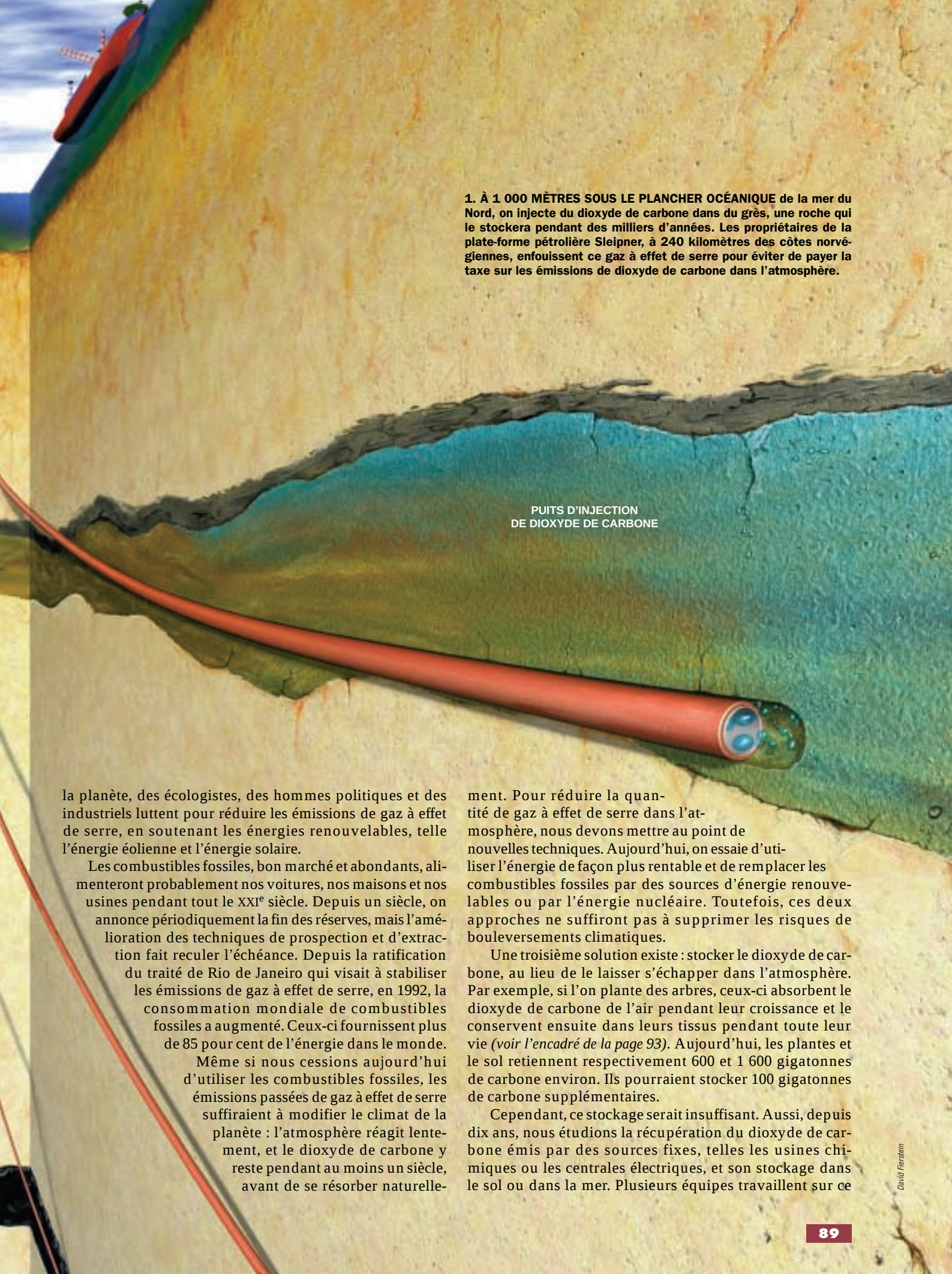
*Pour éviter le réchauffement de la planète,
on envisage d'injecter du dioxyde de carbone
dans le sol ou dans les océans.*

Il y a quelques années, les climatologues se demandaient encore si les activités humaines perturbaient le fonctionnement climatique du Globe. Aujourd'hui, on sait que les gaz à effet de serre piègent la chaleur à la surface de la Terre et modifieront les climats. Que faire pour préserver ces derniers ?

N'attendons pas l'épuisement des combustibles fossiles pour lutter contre l'accumulation des gaz à effet de serre. Depuis 1850, c'est-à-dire depuis le début de l'ère industrielle, la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère a augmenté de presque un tiers, passant de 280 à 370 parties par million (ppm), essentiellement à cause de l'utilisation des combustibles fossiles. Dans les années 1990, l'humanité a augmenté cette concentration de 1,5 partie par million de dioxyde de carbone par an en moyenne, mais les rejets ont augmenté chaque année. Les activités humaines rejettent plusieurs gaz à effet de serre dans l'atmosphère, tels le méthane et le dioxyde d'azote, mais le dioxyde de carbone est le principal. Craignant un réchauffement de

GAZODUCS

GAZ NATUREL



1. À 1 000 MÈTRES SOUS LE PLANCHER OCÉANIQUE de la mer du Nord, on injecte du dioxyde de carbone dans du grès, une roche qui le stockera pendant des milliers d'années. Les propriétaires de la plate-forme pétrolière Sleipner, à 240 kilomètres des côtes norvégiennes, enfouissent ce gaz à effet de serre pour éviter de payer la taxe sur les émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

PUITS D'INJECTION
DE DIOXYDE DE CARBONE

la planète, des écologistes, des hommes politiques et des industriels luttent pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, en soutenant les énergies renouvelables, telle l'énergie éolienne et l'énergie solaire.

Les combustibles fossiles, bon marché et abondants, alimenteront probablement nos voitures, nos maisons et nos usines pendant tout le XXI^e siècle. Depuis un siècle, on annonce périodiquement la fin des réserves, mais l'amélioration des techniques de prospection et d'extraction fait reculer l'échéance. Depuis la ratification du traité de Rio de Janeiro qui visait à stabiliser les émissions de gaz à effet de serre, en 1992, la consommation mondiale de combustibles fossiles a augmenté. Ceux-ci fournissent plus de 85 pour cent de l'énergie dans le monde.

Même si nous cessions aujourd'hui d'utiliser les combustibles fossiles, les émissions passées de gaz à effet de serre suffiraient à modifier le climat de la planète : l'atmosphère réagit lentement, et le dioxyde de carbone y reste pendant au moins un siècle, avant de se résorber naturelle-

ment. Pour réduire la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, nous devons mettre au point de nouvelles techniques. Aujourd'hui, on essaie d'utiliser l'énergie de façon plus rentable et de remplacer les combustibles fossiles par des sources d'énergie renouvelables ou par l'énergie nucléaire. Toutefois, ces deux approches ne suffiront pas à supprimer les risques de bouleversements climatiques.

Une troisième solution existe : stocker le dioxyde de carbone, au lieu de le laisser s'échapper dans l'atmosphère. Par exemple, si l'on plante des arbres, ceux-ci absorbent le dioxyde de carbone de l'air pendant leur croissance et le conservent ensuite dans leurs tissus pendant toute leur vie (voir l'encadré de la page 93). Aujourd'hui, les plantes et le sol retiennent respectivement 600 et 1 600 gigatonnes de carbone environ. Ils pourraient stocker 100 gigatonnes de carbone supplémentaires.

Cependant, ce stockage serait insuffisant. Aussi, depuis dix ans, nous étudions la récupération du dioxyde de carbone émis par des sources fixes, telles les usines chimiques ou les centrales électriques, et son stockage dans le sol ou dans la mer. Plusieurs équipes travaillent sur ce

sujet, dans le cadre du programme de recherche sur les gaz à effet de serre de l'Agence internationale de l'énergie et dans le cadres de programmes nationaux et industriels.

Une nouvelle approche en Norvège

La première opération de stockage de dioxyde de carbone dans une formation géologique a commencé en octobre 1996, en mer du Nord, à 240 kilomètres des côtes norvégiennes. Sur l'une des plates-formes pétrolières du site de Sleipner, on injecte chaque semaine 20 000 tonnes de dioxyde de carbone dans les pores d'une couche de grès, à 1 000 mètres sous le fond de la mer.

Comment cette opération a-t-elle commencé? Le gaz naturel extrait sur cette plate-forme contient neuf pour

cent de dioxyde de carbone : pour qu'il soit vendable, l'usine chimique de la plate-forme le purifie, mais, au lieu de rejeter le dioxyde de carbone dans l'atmosphère, les sociétés exploitantes (*Statoil, Exxon, Norsk Hydro et Elf*) ont décidé de le stocker. Elles le compriment, puis l'injectent à travers un puits de 200 mètres de profondeur, dans la couche de grès sous-jacente initialement remplie d'eau salée (formation aquifère saline). La quantité de gaz ainsi stocké cette année à Sleipner (un million de tonnes) représente trois pour cent des émissions totales de dioxyde de carbone de la Norvège.

Dans ce pays, c'est une taxe sur les émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère qui a décidé les pétroliers à stocker ce gaz : en 1996, cette taxe s'élevait à environ 300 francs par tonne de gaz émis (aujourd'hui, elle n'est plus

que de 230 francs environ). L'investissement correspondant à l'achat du matériel de compression et au forage du puits s'est élevé à 480 millions de francs environ. Le rejet du dioxyde de carbone dans l'atmosphère aurait coûté environ 300 millions de francs par an entre 1996 et 1999 : les propriétaires de la plate-forme ont donc amorti leur investissement en un an et demi.

Dans d'autres régions du monde, des pétroliers ont des projets similaires. En mer de Chine, le champ pétrolier de Natuna contient du gaz naturel et 71 pour cent de dioxyde de carbone : l'exploitant prévoit de stocker ce dernier. Aujourd'hui, on étudie les possibilités de stockage de ce gaz dans le sous-sol, notamment sous les installations de gaz naturel liquéfié des sites de Gordon (Australie), de Snøhvit (Norvège) et sous les champs pétrolifères de la Pente (Alaska).

Les pétroliers doivent séparer le gaz naturel du dioxyde de carbone pour le vendre ; le dioxyde de carbone est donc prêt pour le stockage. Toutefois, dans d'autres industries, sa récupération représente une étape coûteuse à mettre en place avant le stockage. Les industriels concernés seront plus difficiles à convaincre que les pétroliers, à cause du coût supplémentaire.

En sous-sol

La technique d'injection du dioxyde de carbone dans le sous-sol est au point : c'est la même que pour extraire du pétrole ou du gaz naturel, mais on pompe vers le bas. On l'utilise même sur de nombreux champs de pétrole pour rendre les puits d'extraction plus productifs : en injectant du dioxyde de carbone dans le pétrole, on fait remonter ce dernier jusqu'à la surface.

Les formations géologiques du monde entier, telles les formations aquifères salines (site de Sleipner), les gisements houillers non exploitables, les réservoirs de pétrole et de gaz épuisés, les cavernes rocheuses et les dômes de sel, pourraient contenir des centaines, voire des milliers, de gigatonnes de carbone.

Bien que les formations géologiques soient de bons sites de stockage, le réservoir potentiel le plus important est l'océan, qui contient 40 000 gigatonnes de carbone dissous (l'atmosphère n'en contient que 750) et dont la capacité est bien supérieure. Même si l'on injectait dans les

L'enfouissement du dioxyde de carbone : quelle technique employer?

• En quoi consiste le stockage du carbone?

Au lieu de laisser le dioxyde de carbone (un gaz à effet de serre) produit par les activités humaines se dégager dans l'atmosphère, on envisage de le stocker dans des réservoirs naturels, afin de limiter les risques de réchauffement de l'atmosphère. La plantation d'arbres est l'un des moyens de stockage. Nous en étudions un autre : la récupération du dioxyde de carbone dégagé par des sources fixes, par exemple par les centrales électriques, et son injection dans l'océan ou dans le sol.

• Où sera stocké le dioxyde de carbone?

Dans des formations géologiques, tels les gisements houillers non exploitables, les puits de pétrole ou de gaz naturel épuisés et les formations géologiques qui contiennent de l'eau salée. Le procédé employé serait le pompage, comme pour l'extraction du pétrole, mais en sens inverse (vers le bas). On étudie aussi les possibilités de stockage dans la mer, en répandant le dioxyde de carbone en petites gouttelettes, de sorte que sa concentration reste faible et modifie peu les écosystèmes environnants, et en choisissant une profondeur telle que le gaz reste dans la mer.

• Comment évaluer les risques que présente ce stockage?

L'évaluation des risques est l'un des principaux objectifs des recherches. En 1986, l'énorme bulle de dioxyde de carbone qui s'est dégagée du lac Nyos (au Cameroun), asphyxiant près de 2 000 personnes, a posé le problème de la sécurité de façon dramatique. Toutefois, la situation dans le lac Nyos était totalement différente de celle que nous envisageons dans la mer. L'éruption y était inéluctable, étant donné la petite taille du lac et la grande quantité de dioxyde de carbone stocké. En revanche, la capacité de l'océan est bien supérieure. Dans le cas d'un stockage souterrain, la nature a fait ses preuves : des réservoirs naturels, tel celui du McElmo Dome (Colorado), retiennent d'énormes quantités de dioxyde de carbone depuis des siècles.

• Le stockage du dioxyde de carbone a-t-il déjà commencé?

Oui. La plate-forme *off-shore* de gaz naturel de Sleipner, au large de la Norvège, injecte chaque jour du dioxyde de carbone dans un aquifère salin à 1 000 mètres sous le plancher océanique. C'est le seul projet qui vise à réduire les risques de réchauffement de l'atmosphère, mais d'autres projets démontrent la faisabilité d'un tel stockage. Plus d'une dizaine de centrales électriques collectent le dioxyde de carbone de leurs rejets gazeux, notamment la centrale de Shady Point (Oklahoma), qui le revend. Aux États-Unis, dans plus de 65 puits d'extraction de pétrole, on injecte du dioxyde de carbone sous terre pour augmenter le rendement du forage.

océans le double de la quantité de dioxyde de carbone présente dans l'atmosphère en 1850, la concentration de ce composé augmenterait de moins de deux pour cent. Pendant les siècles prochains, 85 pour cent des émissions actuelles se dissoudront naturellement. Pour préserver le climat, nous proposons d'accélérer le processus.

Pour un stockage efficace, on devrait injecter le dioxyde de carbone sous la thermocline, une couche d'eau dont la profondeur varie de 100 à 1 000 mètre et où la température diminue rapidement avec la profondeur. L'eau qui se trouve sous la thermocline, plus froide et plus dense que l'eau de surface, remonte très lentement. Elle met des siècles à se mélanger avec elle. En général, plus le dioxyde de carbone est injecté profondément, plus il devrait mettre de temps à atteindre l'atmosphère. On injecterait le gaz soit à des profondeurs de 1 000 à 2 000 mètres, afin de former une solution diluée, soit à plus de 3 000 mètres, afin de créer un «lac» de dioxyde de carbone. La première méthode préserve davantage l'environnement local que la seconde, qui permet un stockage plus long.

ronnement local que la seconde, qui permet un stockage plus long.

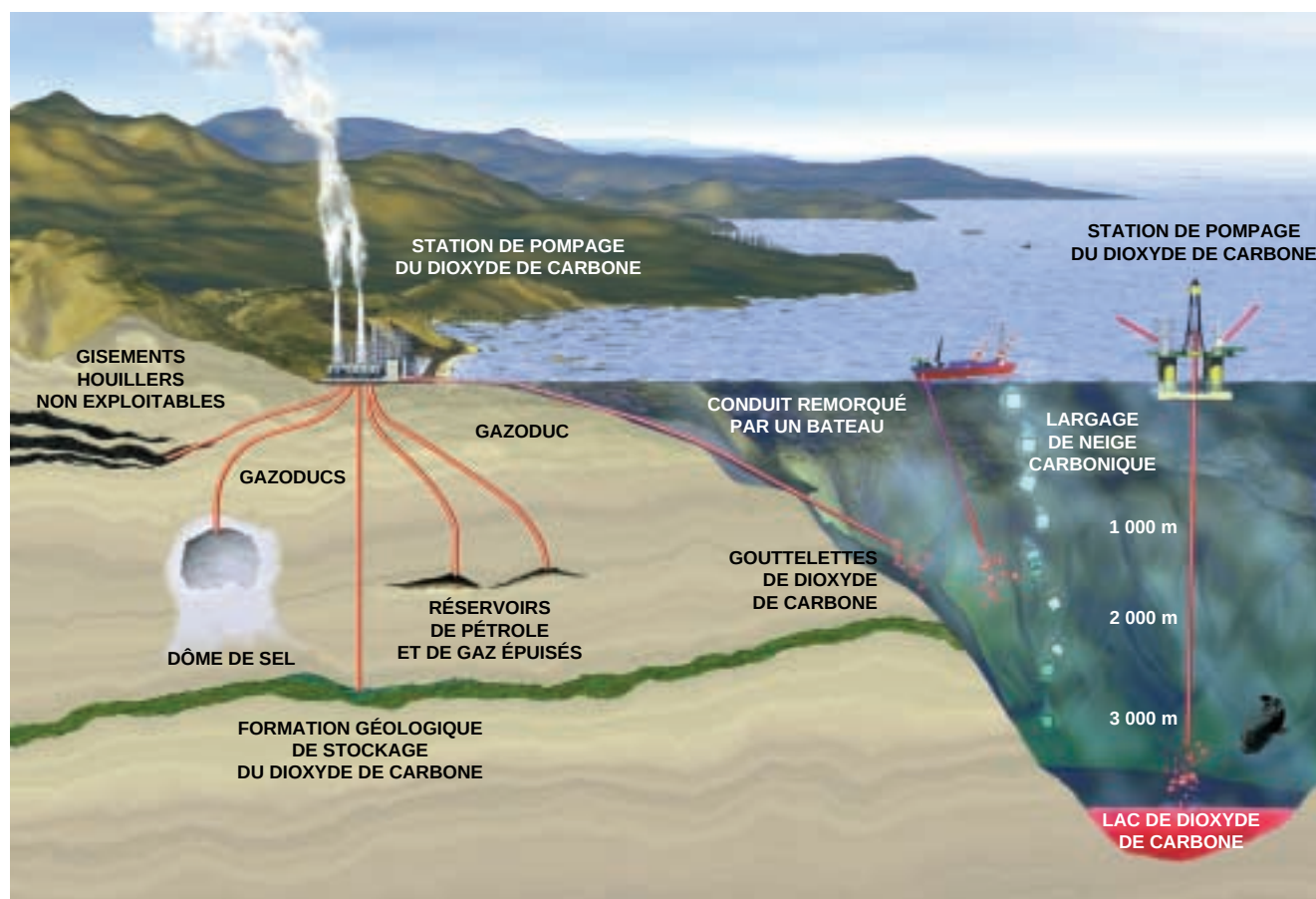
L'idée du stockage dans les océans a été proposée pour la première fois en 1977 par Cesare Marchetti, de l'Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués de Laxenburg (Autriche). C. Marchetti proposa que des pipelines acheminent le dioxyde de carbone jusqu'à Gibraltar, pour qu'il s'écoule ensuite naturellement vers les eaux profondes de l'océan Atlantique. D'autres solutions ont ensuite été proposées : le largage de neige carbonique dans l'océan, à partir de bateaux, ou l'injection du dioxyde de carbone, soit à 1 000 mètres de profondeur à travers un conduit remorqué par un bateau, soit plus profond (4 000 mètres et plus), par un tuyau qui descendrait dans les dépressions du plancher océanique.

Sécurité et respect de l'environnement

Quelles seront les conséquences sur l'environnement du stockage du dioxyde de carbone dans le sol ou dans la mer ? Le stockage est-il préférable à

l'émission dans l'atmosphère ? Dans le cas du stockage souterrain, on doit évaluer la stabilité des formations géologiques qui serviraient de réservoirs, afin que le gaz ne retourne pas progressivement dans l'atmosphère : la libération soudaine et massive de dioxyde de carbone dans l'air formerait une couche de ce gaz, plus lourd que l'air, qui asphyxierait les êtres vivants. Toutefois, les réservoirs naturels de dioxyde de carbone dans le sol, tel celui de McElmo Dome (Colorado), vieux de plusieurs millions d'années, montrent que le stockage du carbone est réalisable dans de bonnes conditions de sécurité.

En revanche, le stockage océanique pose le problème de l'acidité de l'océan. Le pH de l'eau de mer au voisinage d'un site d'injection serait compris entre 5 et 7 (l'eau serait acide), alors qu'il est normalement de 8 (l'eau de mer est basique). Cette modification importante de l'acidité risquerait de nuire au zooplancton, aux bactéries et aux animaux des fonds sous-marins, incapables de se déplacer vers des eaux moins acides. Avec notre collègue Eric



2. LE STOCKAGE DU DIOXYDE DE CARBONE sous terre ou dans la mer éliminerait l'émission des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Pour chaque site envisagé, on étudie le coût du stockage, les risques qu'il présente et ses éventuels effets sur l'environnement.

Des mesures politiques pour protéger le climat

par David Keith et Edward Parson

En 200 ans, les activités humaines ont augmenté de 35 pour cent la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Cette augmentation modifiera les climats. De combien ? Quand ? Comment ? Quelles en seront les conséquences écologiques, économiques et sociales ? Nous n'avons pas de réponses précises à ces questions, mais l'ensemble des États conviennent qu'on doit aujourd'hui réduire les émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Pour stabiliser la concentration de ce gaz à 550 parties par million, soit deux fois sa concentration préindustrielle, on devrait réduire les émissions de moitié, par rapport aux prévisions pour 2050. C'est un objectif ambitieux qui ne sera atteint que, dans le meilleur des cas, grâce à la réorganisation complète des systèmes mondiaux de production d'énergie.

Comment réduire les émissions de gaz à effet de serre ? En augmentant les rendements énergétiques ? En utilisant d'autres sources d'énergie (solaire, éolienne, de la biomasse, nucléaire) ? Howard Herzog, Baldur Eliasson et Olav Kaarstad proposent une autre solution : continuer à brûler des combustibles fossiles, mais sans rejeter de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, c'est-à-dire en le stockant dans le sol ou dans la mer.

Même si l'objectif des 550 parties par million est atteint, cette concentration provoquera des changements climatiques. Les problèmes d'environnement qui en découleront n'auront probablement que des conséquences limitées sur l'économie mondiale. En particulier, les pays riches seront peu affectés. En revanche, à l'échelle régionale, les effets seront plus marqués : certaines régions en tireront profit, alors que d'autres en souffriront. Par exemple, aux États-Unis, le Nord du pays pourrait connaître des hivers plus doux, mais des écosystèmes continentaux entiers pourraient disparaître, telles les forêts des montagnes du Sud-Ouest, les forêts du littoral et les prairies alpines. En outre, la menace de changements climatiques imprévus, ajoutés aux risques précédents, incite fortement à stabiliser la concentration de dioxyde de carbone.

Aujourd'hui, le coût de la réduction des émissions ou les problèmes que pose cette réduction. Les autres sources d'énergie restent chères. Quant aux énergies renouvelables, elles ont une faible densité d'énergie : elles sont peu rentables par rapport à la surface de terrain nécessaire à leur mise en œuvre, ce qui limiterait les possibilités d'utilisation à grande échelle. Leur coût diminuera probablement grâce aux progrès techniques, mais leur densité énergétique est une caractéristique intrinsèque immuable.

La réduction des émissions de carbone portera-t-elle un coup à l'économie ? Pas nécessairement. Tout dépendra du temps

nécessaire à la mise au point de techniques bon marché, directement lié aux taxes qui seront instaurées sur le dioxyde de carbone émis dans l'atmosphère. Pour évaluer le coût de la réduction des émissions, les théories classiques n'ont pas pris en compte l'accélération de l'innovation technique due à d'éventuelles incitations politiques et financières. Dans cette hypothèse, en retardant la réduction des émissions, on se donne le temps de trouver des solutions techniques moins coûteuses. Toutefois, nous avons plutôt le sentiment qu'une action politique rapide pour prévenir les changements climatiques stimulerait l'innovation et abaisserait le coût de la réduction des émissions.

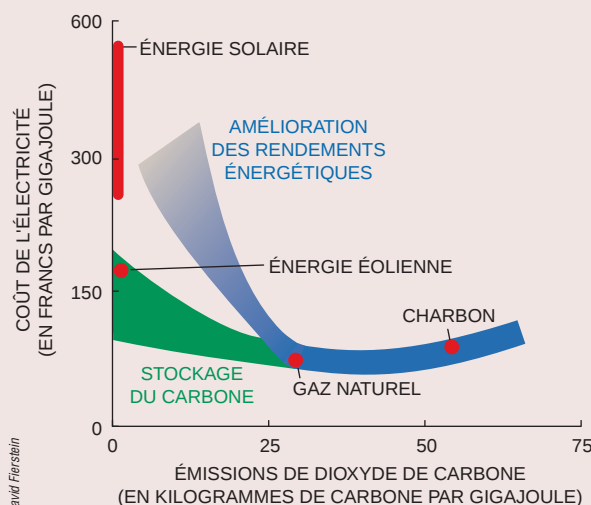
Le stockage du carbone est une des innovations attendues. Il est déjà techniquement possible et semble moins cher que l'exploitation d'énergies renouvelables. Cependant, la réduction massive des émissions passe par l'abandon de l'essence et du gasoil au profit de carburants sans carbone, tel l'hydrogène. Grâce au stockage du carbone, l'utilisation des combustibles fossiles poserait moins de problèmes d'environnement, ce qui résoudrait peut-être du même coup quelques conflits politiques : si le stockage du carbone se généralisait, l'industrie des combustibles fossiles pourrait continuer à fonctionner, avec son marché actuel, plus le nouveau marché du stockage du carbone ; elle ferait donc moins obstacle aux politiques de réduction des émissions.

Avant de stocker le carbone, on étudiera les réservoirs potentiels afin de déterminer ceux qui ne présentent pas de risque. À cause des erreurs passées dans la

gestion des déchets toxiques et nucléaires, les experts en stockage du carbone n'ont pas la confiance du public. Les écologistes restent convaincus que les combustibles fossiles nuisent à la qualité de l'environnement. Ils se méfient du stockage du carbone, car il relève de la «géo-ingénierie», c'est-à-dire de l'intervention sur le climat à l'échelle planétaire, tout comme la solution qui consisterait à refroidir la planète par injection d'aérosols dans la stratosphère afin de réfléchir les rayonnements solaires.

En somme, le stockage du carbone est prometteur, mais ses conséquences incertaines imposent la prudence. Des mesures politiques et économiques sont nécessaires pour soutenir la recherche fondamentale sur l'énergie et pour inciter les sociétés à innover, afin de réduire les émissions de dioxyde de carbone à moindre coût. Le stockage de ce gaz est aujourd'hui la meilleure alternative parmi celles qui sont proposées pour les prochaines décennies.

David KEITH, Université de Carnegie Mellon
Edward PARSON, Université Harvard



Remplacer le charbon par du gaz naturel réduirait les émissions de dioxyde de carbone et les coûts. Pour diminuer encore les émissions, le stockage du carbone (en vert) serait moins cher que l'énergie solaire ou l'amélioration des rendements énergétiques (en bleu). Bien que l'énergie éolienne soit relativement bon marché, les grandes surfaces de terrain qu'elle utilise compromettent la généralisation de son utilisation.

Adams, nous avons montré qu'un facteur de dilution de dioxyde de carbone inférieure à une partie par million ne modifierait pas beaucoup le pH. La variation serait de moins de 0,1. En injectant le dioxyde de carbone dans la mer sous forme de petites gouttelettes (après l'avoir comprimé pour le liquéfier), à partir d'un conduit posé sur le plancher océanique ou remorqué par un bateau, cette concentration ne serait pas dépassée, ce qui supprimerait les problèmes d'acidité.

Au cours des prochaines années, on testera expérimentalement les conséquences sur l'environnement des différentes méthodes de stockage du dioxyde de carbone. Par exemple, en 2001, nous analyserons, avec une équipe internationale (États-Unis, Japon, Suisse, Norvège, Canada, Australie), la faisabilité technique et l'influence sur l'environnement d'un stockage de carbone dans la mer au large d'Hawaïi.

Notamment, pendant deux semaines, nous réaliserons une série de tests de dissolution de dioxyde de carbone dans la mer à une profondeur de 800 mètres. Nous observerons le panache qui en résultera et mesurerons le pH de l'eau, la quantité de carbone inorganique dissous... Ainsi, nous modéliserons les conséquences du stockage du dioxyde de carbone, afin de prévoir son impact sur l'environnement avec précision. Nous déterminerons aussi la technique la mieux adaptée à la dissolution de dioxyde de carbone dans l'eau sous forme de petites gouttelettes.

Le coût du stockage du carbone

Combien le stockage du dioxyde de carbone coûtera-t-il? Comme les centrales électriques sont responsables d'un tiers des émissions mondiales de dioxyde de carbone, le stockage du carbone les concerne en premier lieu. Ces usines ont réduit leur rejet de polluants, tels les particules solides, les oxydes de soufre, d'azote et le monoxyde de carbone, mais pas le dioxyde de carbone.

Depuis 1910, des «précipitateurs électrostatiques» éliminent des particules de polluants résultant de la combustion du pétrole et du gaz naturel, sans grever le prix de l'électricité. Aujourd'hui, une centrale électrique moderne équipée pour réduire au minimum les particules, les oxydes de soufre et les oxydes

d'azote rejetés coûte environ 30 pour cent de plus (à l'installation) qu'une centrale ordinaire. Ensuite, ces équipements n'augmentent le prix du kilowattheure d'électricité que de 0,1 à 0,5 pour cent.

Les rejets des centrales électriques thermiques ne contiennent que 3 à 15 pour cent de dioxyde de carbone. Avant de stocker le carbone, on devrait d'abord concentrer le dioxyde de carbone des émissions de gaz. Avec les équipements existants, cette étape est

plus coûteuse que le stockage lui-même. Notre objectif est de mettre au point un procédé moins cher.

En général, pour séparer le dioxyde de carbone d'un mélange gazeux, on le fait réagir avec de la monoéthanolamine en solution diluée dans une tour d'absorption, à température ambiante. Puis on chauffe le composé formé à environ 120 °C dans une seconde colonne, le rectificateur; le dioxyde de carbone libéré est ensuite comprimé,

Plantons des arbres

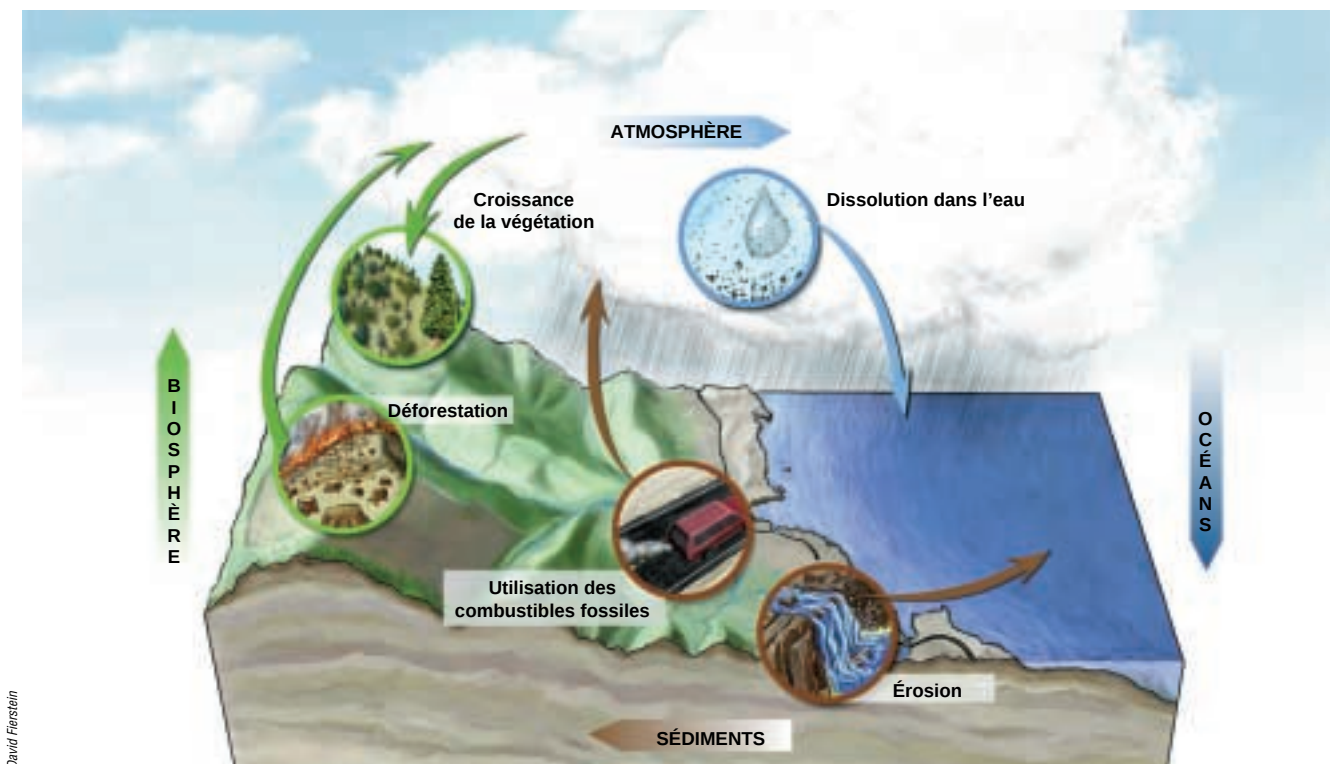
Depuis plus de dix ans, on stocke du carbone dans les régions déforestées et les terres cultivées du Guatemala, sans conduit souterrain ni station de pompage : on plante des arbres. À mesure qu'ils poussent, ils absorbent le dioxyde de carbone atmosphérique, dont ils stockent le carbone sous forme de bois. Planter des forêts est donc un moyen de stocker le carbone en profitant de ce processus naturel. La reforestation, l'afforestation (la plantation d'arbres sur des terres qui initialement ne portaient pas de forêts) et l'agrosylviculture (l'intégration d'arbres aux cultures agricoles) sont prévues par le traité international de Kyoto pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Dès 1988, la compagnie d'électricité *Allied Energy Services (AES)* utilisa la sylviculture pour compenser ses émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. À cette époque, *AES* prévoyait de construire une nouvelle centrale thermique dans le Connecticut; les ingénieurs avaient calculé que la combustion de charbon, pendant les 40 ans d'exploitation, rejetterait 52 millions de tonnes de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Avec l'Institut des ressources mondiales et la Coopérative pour l'assistance et le secours partout dans le monde, *AES* créa des forêts communautaires au Guatemala, y introduisit des pratiques d'agrosylviculture et forma des brigades de pompiers, afin de protéger les arbres nouvellement plantés et les forêts naturelles. D'après l'Institut des ressources mondiales, 58 millions de tonnes de dioxyde de carbone seront stockées d'ici la fin du projet. Aujourd'hui, plus d'une dizaine de programmes de plantations sont en cours sur quelque quatre millions d'hectares de terres boisées aux États-Unis, en Norvège, au Brésil, en Malaisie, en Russie et en Australie.

Les forêts de l'ensemble du Globe stockeraient près d'un trillion de tonnes de carbone. Pour compenser les émissions actuelles de dioxyde de carbone (près de 13 milliards de tonnes), on devrait planter chaque année de nouvelles forêts couvrant une surface équivalente à celle de l'Inde. Les projets de sylviculture, s'ils ne résolvent pas le problème des émissions de gaz à effet de serre, présentent néanmoins de nombreux avantages, allant de l'amélioration de la qualité de l'environnement à la création d'emplois dans les plantations. Cependant, la capacité de stockage de carbone est limitée. En outre, les plantations d'arbres nuisent à la biodiversité des plantes indigènes et obligent parfois à déplacer des populations. Les arbres ne peuvent enrayer seuls les risques de bouleversement climatique dus à l'émission des gaz à effet de serre. Nous devons prendre d'autres engagements, à l'échelle planétaire, afin de réduire ces émissions.



Aux îles Fidji, des ouvriers plantent des arbres dans le cadre d'un programme de reforestation.



David Farstein

3. EN BRÛLANT DES COMBUSTIBLES FOSSILES, on transfère le carbone des sédiments dans l'atmosphère. Le but du stockage du carbone est de transférer une partie du carbone atmosphérique dans la mer, les sédiments ou la biosphère.

séché, refroidi, liquéfié et purifié si nécessaire, tandis que la solution de monoéthanolamine est recyclée. Ce procédé est efficace, mais il consomme trop d'énergie pour le stockage du carbone à grande échelle. Seules quelques centrales électriques (telle celle de Shady Point, dans l'Oklahoma) l'utilisent pour récupérer le dioxyde de carbone de leurs rejets gazeux. Le dioxyde de carbone obtenu est vendu à d'autres industries, qui l'utilisent pour lyophiliser les volailles ou gazéifier la bière et les jus de fruits.

On peut aussi faire réagir le dioxyde de carbone avec l'hydrogène, afin de

former du méthanol, utilisable comme carburant. Le méthanol ainsi produit est plus cher que le méthanol obtenu à partir du gaz naturel, mais la réutilisation du dioxyde de carbone, qui lui donne une valeur marchande, devrait contribuer à réduire les émissions, inciter les industriels à mettre au point une technique de récupération de dioxyde de carbone moins chère et faciliter la transition vers l'emploi de combustibles moins polluants.

Malgré les risques de réchauffement du climat, le charbon, le pétrole et le gaz naturel restent les principales sources d'énergie. On connaît les techniques qui utilisent ces combustibles tout en préservant le climat. Aujourd'hui, la récupération et le stockage du dioxyde de carbone rejeté par les centrales électriques augmenteraient le coût de production de l'électricité de 50 à 100 pour cent. Cependant, ces équipements n'augmentent pas le prix de l'acheminement ni de la distribution de l'électricité, qui représentent une proportion importante des factures d'électricité des consommateurs. Celles-ci n'augmenteraient que de 30 à 50 pour cent, et moins si l'on trouvait des techniques de séparation plus efficaces.

Comment généraliser le stockage du carbone? Tout d'abord, les cher-

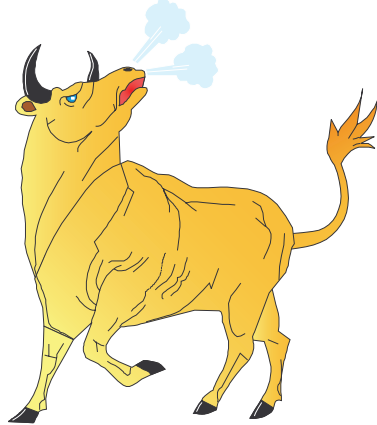
cheurs doivent étudier la stabilité des sites envisagés. Puis les industriels, aidés par les États, doivent tester les nouveaux procédés à l'échelle industrielle et chercher des moyens de réduire les coûts (principalement les coûts de séparation du dioxyde de carbone des autres gaz rejetés dans les centrales électriques). Le projet Sleipner a montré que le stockage du carbone réduit efficacement les émissions de dioxyde de carbone lorsqu'il existe une incitation économique. Au cours des 100 dernières années, les systèmes de production d'énergie ont profondément changé : nous sommes passés d'une économie stationnaire, fondée sur le charbon et la vapeur, à une économie mobile fondée sur les combustibles liquides, le gaz et l'électricité. Dans les 100 prochaines années, les changements devraient être aussi profonds.

Howard HERZOG travaille au laboratoire d'énergie de l'Institut de technologie du Massachusetts. Baldur ELIASSON est directeur du programme énergétique de la Société ABB. Olav KAARSTAD est conseiller pour l'orientation de la recherche sur l'énergie et l'environnement dans la Société norvégienne Statoil.



ABB Corporate Research

4. L'INSTALLATION DE SHADY POINT, dans l'Oklahoma, sépare le dioxyde de carbone du mélange gazeux rejeté dans l'atmosphère et le vend à des industries alimentaires.



Le troupeau du soleil

IAN STEWART

Archimède a énoncé un problème qu'il était incapable de résoudre.

En 1917, le mathématicien britannique Henry Dudeney décrit un curieux problème inspiré de la bataille de Hastings, lors de laquelle les Normands de Guillaume le Conquérant (1027-1087) ont battu les Saxons du roi Harold (1022-1066), le 14 octobre 1066. Selon Dudeney, une ancienne chronique de la bataille précise que «les hommes d'Harold étaient très groupés et formaient 61 carrés identiques. Lorsque Harold rejoignait ses troupes, les Saxons s'organisaient en un nouveau et puissant carré». Quelle est la plus petite valeur du nombre de Saxons pour laquelle ces formations sont possibles ?

En termes mathématiques, il s'agit de trouver le plus petit carré, tel que son produit par 61 augmenté de 1 soit encore un carré. Nous cherchons donc les solutions en nombres entiers de l'équation $y^2 = 61x^2 + 1$, qui est un exemple d'équation de Pell (ainsi nommée à tort d'après un obscur mathématicien du XVII^e siècle dont les contributions à cette question n'ont pas été originales). Les équations de ce type, où 61 peut être remplacé par un entier positif non carré, ont une infinité de solutions que l'on détermine par la méthode des fractions continues (des fractions telles que $a + 1/(b + 1/(c + 1/...))$).

Afin de nous échauffer, changeons de bataille et considérons celle, moins

connue, de Brighton, où les soldats du roi Harold formaient cette fois 11 carrés, le reste du problème étant inchangé (voir la figure 1). On résout l'équation correspondante ($y^2 = 11x^2 + 1$) par tâtonnements : la plus petite solution est $x = 3$ et $y = 10$.

Cette méthode ne permet pas de résoudre le problème de Dudeney (sauf si l'on utilise un ordinateur), car la plus petite solution est $x = 226\ 153\ 980$ et $y = 1\ 766\ 319\ 049$. Les solutions de l'équation de Pell $y^2 = Dx^2 + 1$ varient beaucoup selon le coefficient D . Pour certaines valeurs de D (29, 46, 53, 58, 61, 67, 73, 76, 85, 86, 89, 93, 94 et 97), la plus petite solution est supérieure à 1 000, et les tâtonnements sont impossibles. Parmi ces valeurs, la plus difficile, et de beaucoup, est 61 : le choix de Dudeney est judicieux ! Avec quelques efforts, vous résoudrez les équations pour D égal à 60 ou à 62 (les réponses sont données à la fin de l'article).

Toutefois, Dudeney aurait pu compiler encore son problème en choisissant $D = 1\ 597$: la plus petite solution est approximativement $x = 1,3 \cdot 10^{46}$ et $y = 5,2 \cdot 10^{47}$. Et pour $D = 9\ 781$, le problème est pire encore !

L'équation de Pell se retrouve dans le célèbre problème du troupeau du soleil. En 1773, le dramaturge allemand Gotthold Lessing (1729-1781) a découvert

un manuscrit où une énigme est exprimée en vers : 22 couplets élégiaques que l'auteur présumé, le mathématicien grec Archimède (-287/-212), aurait envoyé en 250 avant notre ère à Ératosthène de Cyrène (-284/-192), le bibliothécaire en chef de la bibliothèque d'Alexandrie. Le poème commence ainsi : «Si tu es appliqué et sage, ô étranger, calcule le nombre de têtes du troupeau du soleil qui, il y a bien longtemps, paissaient dans les prairies de la trinacrienne île de Sicile.» La Trinacrie, qui signifie à *trois caps rocheux*, est l'ancien nom de la Sicile.

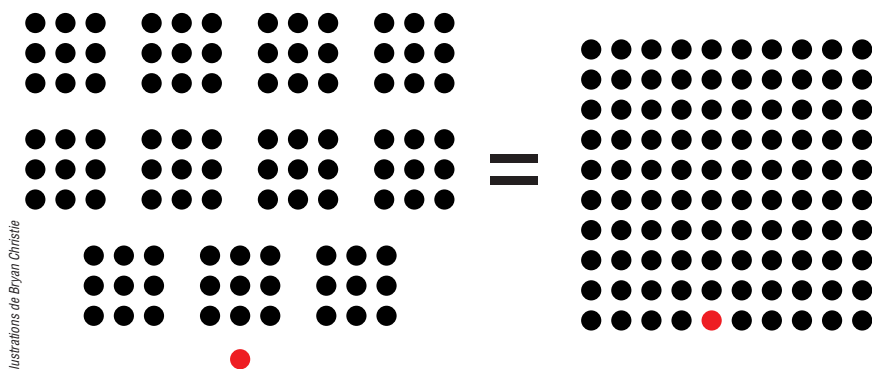
Selon l'*Odyssée* d'Homère, les bovins du soleil étaient 350. Toutefois, Archimède pensait à un nombre bien supérieur : son énoncé stipule que le troupeau est composé de taureaux blancs (B), noirs (N), jaunes (J), tachetés (T) et de vaches de variétés équivalentes (b , n , j , t). Les nombres de chaque type de bovins remplissent sept conditions «faciles» à satisfaire et deux «difficiles» : les premières s'expriment par un système à sept équations et huit variables (voir la figure 2).

La première condition difficile indique que $B + N$, le nombre total de taureaux blancs et noirs, est un carré parfait ; la seconde, que $J + T$, les taureaux jaunes et tachetés, est un nombre triangulaire, c'est-à-dire de la forme $1 + 2 + 3 + \dots + m$, où m est un entier positif.

Des sept premières conditions, on déduit que les huit inconnues sont les multiples déterminés d'un même entier positif k :

$B = 10\ 366\ 482k$
 $N = 7\ 460\ 514k$
 $J = 4\ 149\ 387k$
 $T = 7\ 358\ 060k$
 $b = 7\ 206\ 360k$
 $n = 4\ 893\ 246k$
 $j = 5\ 439\ 213k$
 $t = 3\ 515\ 820k$.

Quelle est la plus petite valeur de k qui satisfait les deux conditions difficiles ? En 1830, le mathématicien allemand J. Wurm a résolu une version simplifiée de l'énigme, où il ne conserve pas la condition que « $B + N$ soit un carré». De la condition qui impose un nombre $J + T$ triangulaire, on déduit que $92\ 059\ 576k + 1$



1. Une armée de 99 hommes (points noirs), telle celle du roi Harold, peut être disposée en onze carrés de neuf hommes sans le roi, et en un grand carré de dix hommes de côté lorsque le roi se joint à ses soldats. Les nombres $x = 3$ et $y = 10$ sont la plus petite solution de l'équation $y^2 = 11x^2 + 1$.