

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 KAASTAD

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 pétroliers 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.