

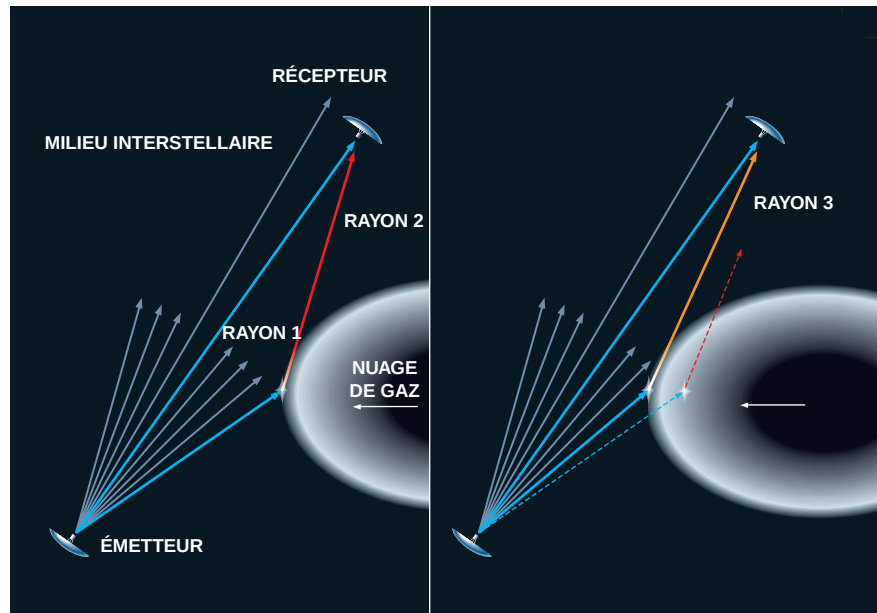
passante plus étroite, les besoins en puissance seraient réduits.

De surcroît, une très grande antenne de réception, constituée d'un assemblage d'antennes et de récepteurs individuels, peut être programmée de manière à recevoir simultanément des faisceaux de nombreuses directions différentes, ce qui faciliterait la recherche des émetteurs inconnus. L'utilisation simultanée de nombreux canaux de réception, un multiplexage en fréquence, déjà en œuvre dans les programmes SETI actuels, améliore l'efficacité de la réception. Toutefois, les avantages de ce multiplexage ne peuvent s'appliquer à l'émission sans une perte de puissance de chaque faisceau ou de chaque canal de fréquence, car la puissance totale est fixée.

À travers le milieu

Jusqu'ici, nous avons examiné la conception des deux extrémités de la communication, l'émetteur et le récepteur. Cependant, entre les deux, le rayonnement peut se propager difficilement dans l'immensité interstellaire. Dans le vide, les ondes électromagnétiques se propagent en ligne droite, à moins de rencontrer un obstacle matériel qui les absorbe, les réfléchit ou les réfracte. Or, le milieu interstellaire n'est pas vide : il contient des gaz, des poussières et des champs magnétiques qui perturbent la propagation de ces ondes. Le long des trajets immenses, ces éléments dévient les ondes de leur chemin en ligne droite, changent leur polarisation et font fluctuer l'intensité du signal reçu. Ces phénomènes plaident contre l'utilisation de faisceaux d'émission et de réception trop étroits, et rendent plus criants encore le besoin d'émetteurs puissants.

Lorsque les ondes traversent un nuage de gaz, où la vitesse de propagation est inférieure à celle dans le vide, les ondes sont réfractées. Cette réfraction dévie les ondes et superpose parfois deux ondes qui ont la même source. Lorsque l'onde pénètre dans le nuage, l'une de ses composantes peut être plus ralentie qu'une autre : un déphasage apparaît entre les composantes de l'onde. Selon l'amplitude du déphasage et selon la différence de chemin entre les composantes de l'onde, les portions déphasées peuvent se renforcer, s'annuler ou



2. LES ONDES sont perturbées quand elles se propagent dans la Galaxie. Notamment, les nuages de gaz réfractent, c'est-à-dire dévient la lumière (*en rouge et en orange*), de sorte qu'elle interfère avec un autre rayon (*en bleu*) issu du même émetteur. Quand le nuage se déplace, la différence de longueur de trajectoire entre le rayon direct et le rayon réfracté change. Ainsi, les rayons reçus passent continûment et continuellement d'un renforcement constructif à une annulation réciproque : le signal reçu (la somme des signaux propagés selon les divers chemins) scintille sur le récepteur, et une partie de sa cohérence est perdue.

donner toutes les combinaisons intermédiaires.

Supposons maintenant que la nappe de gaz qui se trouve sur le chemin de la deuxième onde soit en mouvement par rapport à la trajectoire de l'onde, de sorte que le déphasage varie dans le temps (*voir la figure 2*). Dans ce cas, l'onde qui résulte de la superposition des deux composantes variera dans le temps, tantôt s'annulant, tantôt se renforçant. Des effets du même type résultent des réflexions, des décalages Doppler, etc. Toutes ces perturbations transforment un signal initialement régulier en un signal fortement modulé à son arrivée, sur un lointain récepteur.

L'utilisation des ondes radio pour les contacts interstellaires est décou-

rageante. La taille gigantesque de la Galaxie impose des systèmes redhibitoires : des puissances d'émission considérables ou des antennes immenses, avec des faisceaux si fins qu'ils risquent de ne servir à rien. Le système nécessaire pour envoyer un signal vers un grand échantillon d'étoiles est certainement hors de portée de notre technique. De surcroît, même si l'on parvenait à établir le contact, plusieurs siècles pourraient s'écouler avant que nous recevions une réponse à notre message. Même si nous réussissions à venir à bout des formidables contraintes physiques, le projet de communication avec des civilisations extraterrestres nécessiterait une ténacité dont l'humanité n'a pas encore fait preuve.

George SWENSON est professeur émérite d'électrotechnique et d'astronomie à l'Université de l'Illinois.

Extraterrestrials, Where Are They? sous la direction de Ben Zuckerman et Michael H. Hart, Cambridge University Press, 1995.

Christian DE DUVE, *Vital Dust : Life as a Cosmic Imperative*, Basic Books, 1995.

James M. CORDES, T. Joseph W. LAZIO et Carl SAGAN, *Scintillation-Induced*

Intermittency in SETI, in *Astrophysical Journal*, vol. 487, pp. 782-808, 1^{er} octobre 1997.

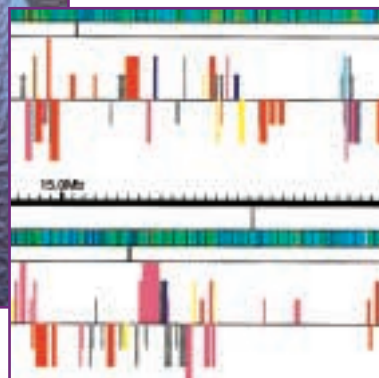
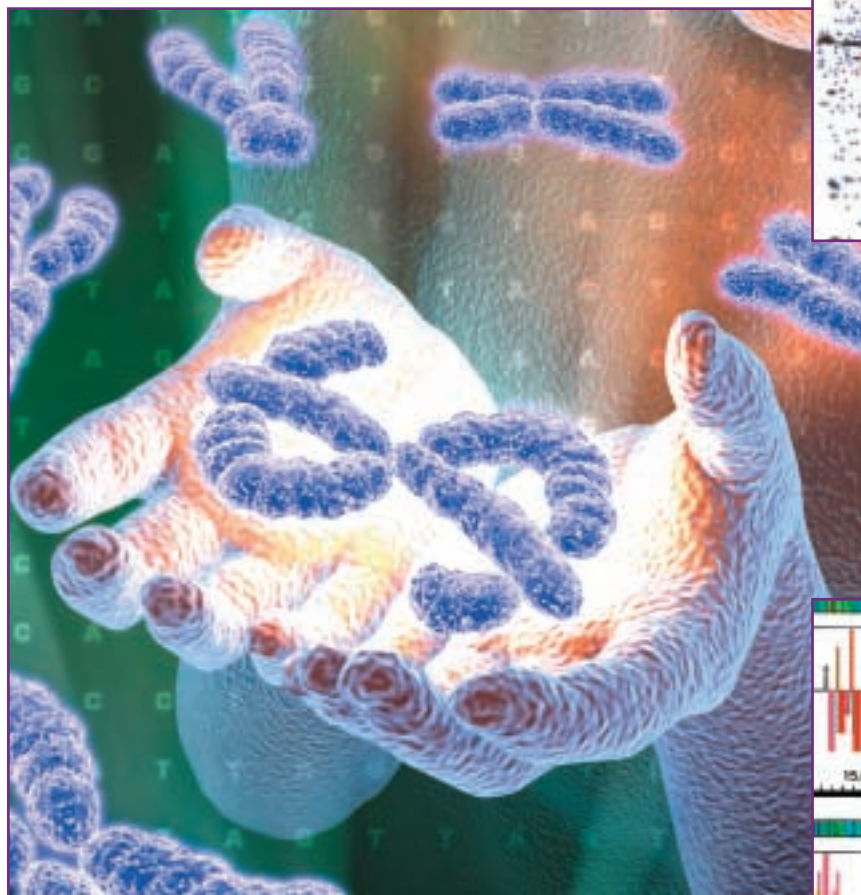
Andrew J.H. Clark et David H. CLARK, *Aliens : Can We Make Contact with Extraterrestrial Intelligence?* Fromm International, 1999.

Peter Douglas WARD et Donald BROWNEE, *Rare Earth : Why Complex Life Is Uncommon in the Universe*, Copernicus Books, 2000.

Introduction

Il y a seulement dix ans, les mots «génomique» ou «génomique» n'étaient connus que des généticiens. Aujourd'hui, ils sont dans tous les journaux, évoqués par toutes les télévisions ou les radios, connus de l'ensemble du public. Entre-temps, plusieurs milliards de francs ont été alloués au *Projet génome humain* : des laboratoires de plusieurs pays ont déchiffré ensemble les trois milliards de lettres qui composent le «mode d'emploi» d'un être humain. Aujourd'hui, ce projet est quasi achevé, et la concurrence fait rage entre des organismes publics et des sociétés privées. De nombreux groupes pharmaceutiques cherchent à exploiter les résultats du travail effectué.

Avec les articles de ce dossier, *Pour la Science* fait le point sur la génomique et présente deux disciplines – la bio-informatique et la protéomique – qui sont les filles naturelles du décryptage du génome humain.



La lecture du génome humain

KATHRYN BROWN

Le décryptage de l'information génétique humaine a été une rude épopée... Pourtant l'aventure ne fait que commencer.

À l'heure où vous lisez cet article, l'essentiel de l'information génétique d'un être humain est disponible sur le réseau *Internet* : le profane trouvera, répétées, les lettres A, T, C, G qui font un texte qui remplirait plus de 200 annuaires téléphoniques. Les biologistes y lisent un enthousiasmant roman : celui de l'être humain.

En effet, les lettres A, T, C et G désignent les nucléotides, c'est-à-dire les sous-unités chimiques de l'ADN, la molécule qui porte les gènes et commande le fonctionnement de toutes nos cellules. Le *Projet génome humain*, qui a coûté plus de 1,8 milliard de

francs, a établi la carte complète de nos gènes, composée de six milliards de nucléotides. Ce consortium public, qui réunit depuis dix ans plus de 1 100 scientifiques, fédère quatre grands centres de séquençage aux États-Unis, le Centre Sanger, en Angleterre, et divers laboratoires au Japon, en France, en Allemagne et en Chine.

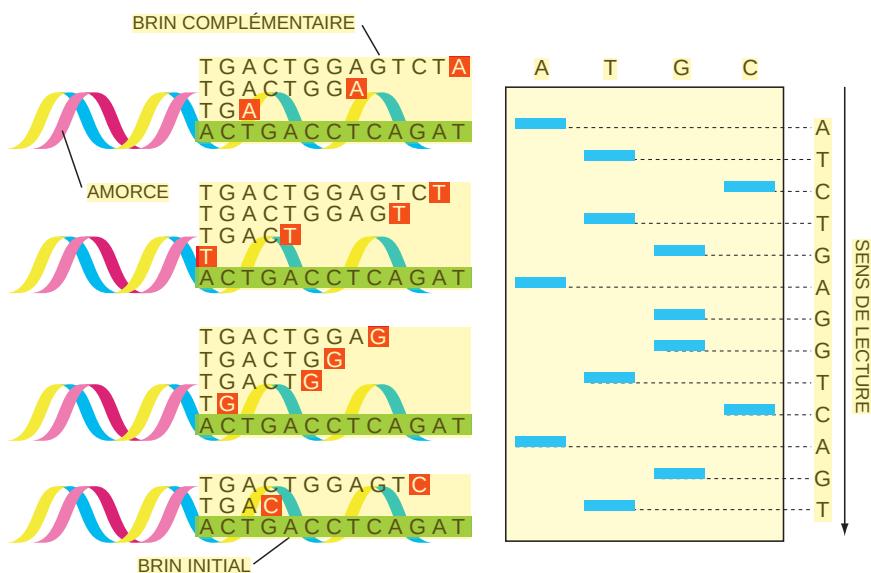
Ce travail de fourmi est resté discret jusqu'en avril 2000, lorsque la Société privée *Celera Genomics* a annoncé sa propre évaluation du génome humain. Cette rivalité du privé contre le public a mis en vedette le génome de l'être humain, son séquençage et son utilisation. Détaill-

lons l'histoire de ce séquençage. En quoi peut-il améliorer notre quotidien, et notamment la médecine? Quelles contraintes ses applications devront-elles respecter?

De l'ADN au séquençage

En 1953, Francis Crick et James Watson découvrent la structure de l'ADN, la molécule que l'on savait être le support de l'hérédité de tous les organismes vivants : deux chaînes d'éléments nommés nucléotides (représentés par les lettres A, T, C et G) s'apparient de façon qu'un A soit toujours face à un T, et un C face à un G ; les deux chaînes forment une double hélice. Puis, en 1966, Marshall Nirenberg et H. Gobind Khorana déchifrent le code génétique, c'est-à-dire qu'ils découvrent comment une succession de nucléotides code la synthèse d'une protéine. L'ADN est une gigantesque bibliothèque où sont stockés tous les programmes de synthèse des protéines, dont une cellule a besoin pour fonctionner. Chaque programme est un gène : déchiffrer, ou séquencer l'ADN d'une cellule, consiste à «lire» toutes les lettres de l'ADN, afin, ensuite, d'identifier tous les gènes. Les biologistes ont d'abord séquencé le génome de divers organismes simples : la levure, la mouche... (voir l'encadré de la page 43), puis ils ont cherché à identifier celui d'un être humain, mais comment lire les trois milliards de lettres qui le compose?

L'approche des laboratoires du *Projet génome humain* est laborieuse, mais précise. À partir de cellules sanguines et sexuelles (des spermatozoïdes), les généticiens ont isolé les



1. LE SÉQUENÇAGE DE L'ADN selon la méthode de F. Sanger s'effectue avec des molécules fluorescentes (en rouge) qui bloquent la synthèse d'un brin complémentaire à partir d'un brin initial (en vert). À partir d'une amorce (en rose), une enzyme greffe les nucléotides complémentaires : en ajoutant la molécule fluorescente, on obtient des fragments de longueurs différentes, que l'on sépare sur un gel d'électrophorèse selon leur taille (à droite). Lorsque cette opération est répétée pour chaque type de nucléotide, on lit la séquence de l'ADN directement sur le gel.