

e
JOURNAL USA

PERSPECTIVES ÉCONOMIQUES
OCTOBRE 2005

**LA
PROMESSE
DE LA
BIOTECHNOLOGIE**



AVANT-PROPOS

Les nouvelles techniques, qu'elles s'appliquent à la médecine, à l'industrie ou à l'agriculture, suscitent souvent dans un premier temps le scepticisme de l'opinion publique. À l'heure actuelle, ce phénomène se révèle particulièrement évident dans le domaine de la biotechnologie, où les questions liées à la santé et à l'environnement alimentent de vigoureux débats.

« Les intellectuels conservateurs sont parfaitement conscients de la tendance qu'a notre espèce à se méfier de ce qui est nouveau et étrange, et de toute évidence ils veulent exploiter cette méfiance en vue de freiner le progrès biotechnologique », affirme Ronald Bailey dans un ouvrage publié en 2005 sous le titre *Liberation Biotechnology*.

Mais comme il le fait lui-même remarquer, l'opinion publique est d'humeur très changeante, et les avantages des progrès technologiques ne sont pas toujours bien compris au départ. C'est ainsi le cas, dit-il, de la fécondation in vitro et des techniques optiques liées au laser, lesquelles suscitaient naguère les craintes et la méfiance du public, alors qu'elles bénéficient aujourd'hui d'un large soutien dans la population et que les gains considérables qui en découlent sont vivement appréciés.

Le présent numéro de la revue *Perspectives économiques* explore certaines des applications les plus prometteuses de la biotechnologie,

depuis les micro-organismes qu'on manipule pour produire de l'hydrogène à partir de déchets organiques et les bactéries qu'on modifie pour décomposer les agents polluants, jusqu'aux cultures vivrières qui rajoutent des vitamines aux aliments que nous consommons, en passant par les nouveaux médicaments qui sont capables de traiter diverses affections, par exemple la maladie d'Alzheimer et le diabète.

Le principal conseiller scientifique au niveau national, John Marburger, fait l'observation suivante dans l'introduction de la présente revue : « Nous voulons non seulement comprendre les maladies, mais aussi les guérir ; non seulement consommer ce que nous trouvons de mangeable, mais aussi rendre nos aliments plus sains et plus nutritifs ; non seulement recueillir les produits de la nature susceptibles d'être utilisés tels quels, mais aussi les rendre plus robustes, plus sains et mieux adaptés à nos besoins. »

Nous invitons nos lecteurs à prendre le temps de lire chacun des articles de la présente revue dans l'espoir qu'ils en retireront une compréhension approfondie de l'incroyable potentiel de la biotechnologie au service de l'amélioration de la qualité de la vie pour tous les habitants de la planète.

La rédaction



PERSPECTIVES ÉCONOMIQUES

DÉPARTEMENT D'ÉTAT DES ÉTATS-UNIS / OCTOBRE 2005 / VOLUME 10 / NUMÉRO 4

<http://usinfo.state.gov/journals/journals.htm>

SOMMAIRE

LA PROMESSE DE LA BIOTECHNOLOGIE

4 Introduction

JOHN MARBURGER, DIRECTEUR DU BUREAU DE LA POLITIQUE SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE
BUREAU EXÉCUTIF DU PRÉSIDENT

6 Les enjeux de la biotechnologie à l'échelle planétaire

JENNIFER KUZMA, DIRECTRICE ASSOCIÉE DU CENTRE POUR LES SCIENCES, LA TECHNOLOGIE ET LA POLITIQUE D'INTÉRÊT PUBLIC À L'UNIVERSITÉ DU MINNESOTA
Les gouvernements et d'autres organisations doivent investir dans la recherche biotechnologique et le développement de produits propres à venir en aide aux pays en développement.

11 Encadré: *Une réaction chimique pour la biotechnologie: le Prix Nobel 2005*

Cheryl Pellerin, rédactrice scientifique au département d'État

12 Le pouvoir de transformation de la biotechnologie médicale

BILL SNYDER, PRINCIPAL RÉDACTEUR SCIENTIFIQUE DU CENTRE HOSPITALO-UNIVERSITAIRE VANDERBILT
L'affinement des « thérapies ciblées », qui s'attaquent au fondement biologique même des maladies, devrait considérablement améliorer l'innocuité et l'efficacité des médicaments, et le développement de techniques prédictives pourrait inaugurer une ère nouvelle dans le domaine de la prévention des maladies.

17 Encadré: *La course contre le dopage génique*

Hutington Willard, directeur de l'Institute for Genome Sciences and Policy et vice-président du département des sciences génomiques du Centre médical de l'université Duke

19 Alimentation, énergie, santé: les apports de la biotechnologie végétale

RICHARD HAMILTON, PRÉSIDENT-DIRECTEUR GÉNÉRAL DE CERES, INC. ; RICHARD FLAVELL, DIRECTEUR SCIENTIFIQUE DE CERES, INC. ; ROBERT GOLDBERG, PROFESSEUR DE BIOLOGIE MOLÉCULAIRE À L'UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE DE LOS ANGELES
À l'avenir, les progrès de l'agrobiotechnologie produiront des cultures qui toléreront mieux la sécheresse, la chaleur et le froid, exigeront moins d'engrais et de pesticides, et produiront des vaccins pour prévenir les grandes maladies contagieuses.

23 Encadré: *Insectes génétiquement modifiés*

24 Concevoir de nouveaux matériaux et des moteurs moléculaires

SHUANG ZHANG, DIRECTEUR ASSOCIÉ DU CENTRE D'INGÉNIERIE BIOMÉDICALE DE L'INSTITUT DE TECHNOLOGIE DU MASSACHUSETTS

L'humanité sera peut-être capable un jour d'utiliser des nanodispositifs pour réparer divers organes ou rajeunir la peau, accroître les capacités humaines, exploiter l'énergie solaire inépuisable et réaliser divers accomplissements considérés aujourd'hui comme impossibles.

30 Encadré: *La nanotechnologie aujourd'hui et demain*

Akhlesh Lakhtakia, professeur d'ingénierie et de mécanique à l'université d'État de la Pennsylvanie

32 Le Projet international de séquençage du génome du riz: étude de cas

C. ROBIN BUELL, CHERCHEUR ASSOCIÉ À L'INSTITUT DE RECHERCHE GÉNOMIQUE

Une « carte » de la composition génétique du riz permettra aux phytogénéticiens d'accélérer leurs programmes de reproduction et de mettre au point des variétés de riz plus robustes. Les agriculteurs pourront quant à eux améliorer leurs méthodes culturales et prolonger la saison des cultures.

35 La naissance de la biotechnologie: exploiter le potentiel de l'ADN

DINESH RAMDE, JOURNALISTE DE L'ASSOCIATED PRESS

La rapidité avec laquelle l'industrie biotechnologique a pris son essor, l'ampleur de ses succès et de son impact ont surpris tout le monde, même ses pionniers.

40 La réglementation de la biotechnologie agricole aux États-Unis

42 Glossaire des termes relatifs à la biotechnologie

47 Bibliographie (en anglais)

49 Sites Internet (en anglais)

INTRODUCTION



L'homme a de tout temps cherché à mettre les processus de la nature au service de l'amélioration de la condition humaine, et la biotechnologie marque le dernier jalon en date des efforts qu'il déploie à cette fin. Le mot lui-même associe les connaissances à la pratique, la science à la technologie. On pourrait aussi bien l'utiliser pour décrire l'apparition de l'agriculture, ou de la pharmacologie, ou même l'entraînement des athlètes – autant d'activités qui remontent à la nuit des temps et qui revêtent aujourd'hui des formes exotiques et très contemporaines. Dans chaque cas, l'accumulation des connaissances acquises sur la nature a suggéré des moyens de rendre la vie plus sûre, plus saine et plus productive. Si la biotechnologie est un mot relativement nouveau et aux connotations plus limitées, le fait est qu'elle demeure liée au passé, en particulier lorsqu'on considère ses avantages pour les cultures dans lesquelles la science moderne rompt avec la tradition.

La biotechnologie commence par l'étude des végétaux et des animaux, délicats et splendides jusque dans leurs moindres détails. Les grands artistes ont usé de tout leur talent pour capturer les traits les plus fins des oiseaux, des fleurs et des insectes qui témoignent de leur merveilleuse variété. Plus nous parvenons à réduire l'échelle de nos observations, plus nous découvrons de nouvelles merveilles, de nouvelles structures, de nouveaux comportements qui expliquent les mystères du tout. Au cours des vingt-cinq dernières années, ces progrès nous ont fait franchir une étape d'une portée monumentale :

nous sommes aujourd'hui capables de « voir » les atomes, ces constituants fondamentaux de la matière sous quelque forme qu'elle se présente. Poussant plus loin encore nos investigations, nous découvrons le monde dense du noyau atomique, cent mille fois plus petit que le plus minuscule des atomes : tout aussi beau quoique dénué de vie, c'est le monde qu'explorent de nos jours les physiciens.

En d'autres termes, pour la première fois dans les annales de l'humanité, nous sommes en mesure d'examiner la vie sous toutes ses facettes, de l'infiniment petit à l'infiniment grand. Divers domaines scientifiques ont été mis à contribution pour créer les outils qui ont permis ces progrès, à un coût d'ordinaire à la portée des seuls gouvernements, au vu des gros investissements qu'ils exigent. Pour autant, des ressources relativement modestes suffisent à analyser et à exploiter les phénomènes sur lesquels ces outils lèvent le voile. On ne peut que s'en réjouir parce que la nature à l'échelle miniature revêt une étonnante complexité. Nous sommes bien loin de comprendre tout ce que nous voyons, et même avec les puissants outils qui sont aujourd'hui à notre disposition, l'exploration de la vie continuera d'accaparer l'énergie de toute la communauté scientifique. Le territoire à cartographier et à développer est si vaste qu'il relève de démarches internationales.

L'immensité du monde vivant s'applique non seulement au nombre des espèces, des types d'organismes et des composants chimiques indispensables à leur fonctionnement, mais aussi aux processus vitaux.

Des nombreux systèmes de réactions chimiques, de transport de la matière, de flux d'informations et de support mécanique à l'échelle de l'infiniment petit jusqu'aux fonctions des organes et au comportement des organismes à l'échelle de l'infiniment grand, le volume de connaissances à absorber pour comprendre les formes de vie même les plus simples dépasse l'entendement. Il ne suffit pas de voir: encore faut-il comprendre. Ainsi doit-on emmagasiner une quantité considérable d'informations, récupérer celles-ci de manière efficace et les traiter de façon à creuser la question des causes et des effets. C'est aujourd'hui seulement que la biologie peut produire sa propre technologie parce que la technologie de l'information est arrivée à maturité.

« Voir petit » grâce à la diffraction des rayons X, à la résonance magnétique et aux microscopes à électrons, et « penser grand » grâce aux ordinateurs rapides, aux banques de données gigantesques et aux liaisons à large bande – telles sont deux des trois composantes qui rendent la « bio » technologie possible. La troisième est la capacité de produire des résultats à une échelle minuscule. Les moyens d'action à notre portée sont multiples, et ils font souvent appel aux processus vitaux pour exécuter nos instructions. L'idée n'est pas nouvelle, et elle n'est pas sans rappeler l'utilisation des abeilles aux fins de pollinisation. Aujourd'hui, on se sert de bactéries et de virus pour effectuer diverses tâches à l'échelle microscopique. On utilise aussi des lasers, des sondes minuscules et des molécules activées dont on a compris l'efficacité au prix d'expériences laborieuses. La manipulation de la matière à cette échelle relève de la nanotechnologie, et ce n'est pas par hasard que la nanotechnologie, la technologie de l'information et la biotechnologie se développent de manière concomitante. Elles reposent sur des techniques convergentes qui se nourrissent mutuellement dans le contexte d'une écologie complexe de découverte, d'innovations et d'efficacité humaine croissante.

La biotechnologie est l'application des trois composantes susmentionnées en vue de la réalisation d'objectifs précis. Nous voulons non seulement comprendre les maladies, mais aussi les guérir; non seulement consommer ce que nous trouvons de mangeable, mais aussi rendre nos aliments plus sains et plus nutritifs; non seulement recueillir les produits de la nature susceptibles d'être utilisés tels quels, mais aussi les rendre plus robustes, plus sains et mieux adaptés à nos besoins. Naguère un obstacle à ces objectifs, la complexité de la nature dont nous perçons aujourd'hui les secrets est devenue une source d'occasions multiples de les atteindre. La biotechnologie nous donne les moyens de saisir ces occasions pour le bien de l'humanité. ■

John Marburger, Directeur du bureau de la politique scientifique et technologique, Bureau exécutif du président

LES ENJEUX DE LA BIOTECHNOLOGIE À L'ÉCHELLE PLANÉTAIRE

Jennifer Kuzma



Ce bus roule grâce à un carburant diesel à base de soja.

AP/WWP/NREL

Utilisée à bon escient, la biotechnologie contient en germe la promesse d'aliments plus sains et disponibles en plus grande quantité, la diminution de notre dépendance vis-à-vis des combustibles fossiles et la mise au point de traitements médicaux plus efficaces. Les enzymes qui dégradent les matières végétales sous la forme de biocarburants, tel l'éthanol, finiront bien par déboucher sur la production de produits bioénergétiques durables et rentables. Un nouveau type de riz transgénique enrichi à la vitamine A pourrait contribuer à faire reculer la cécité liée à une carence vitaminique qu'on observe dans les pays en développement.

Pour autant, les applications de la biotechnologie comportent des risques qu'il convient de gérer par le biais de régimes de réglementation, lesquels doivent notamment porter sur les questions de sécurité. En outre, les gouvernements et d'autres organisations doivent monter au créneau et investir dans la recherche biotechnologique et le développement de produits propres à venir en aide aux pays en développement pour que ces derniers puissent développer leur capacité de tirer parti des innovations dans ce secteur.

Jennifer Kuzma est directrice associée du Centre pour les sciences, la technologie et la politique d'intérêt public à l'université du Minnesota.

« La science peut simplement affirmer ce qui est, et non ce qui devrait être, et en dehors de son champ d'investigation les jugements de valeur de toutes sortes demeurent nécessaires. »

Albert Einstein

Depuis des siècles, l'homme exploite les capacités des systèmes biologiques en vue d'améliorer son existence et le monde dans lequel il vit. D'aucuns arguent que la biotechnologie a vu le jour il y a des milliers d'années, quand l'homme a commencé à sélectionner des traits spécifiques chez certains végétaux et à fabriquer de la bière à l'aide de micro-organismes. D'autres font remonter l'origine de la biotechnologie au développement des techniques précises de manipulation et de transfert de gènes d'un organisme à un autre. La découverte de la structure de l'acide désoxyribonucléique (ADN), dans les années 1950, inaugure cette ère. Les gènes contiennent de l'ADN et ils sont exprimés dans des protéines, lesquelles exécutent des opérations chimiques et forment les structures qui nous confèrent tel trait plutôt que tel autre. Dans les années 1970, les scientifiques ont découvert le pouvoir des « ciseaux » naturels – des protéines dites enzymes de restriction – avec lesquels ils peuvent extraire un gène d'un organisme en vue de son insertion dans un autre, que celui-ci soit apparenté au

premier ou non. Ainsi est née la technologie de l'ADN recombinant, que la plupart des experts ont aujourd'hui rebaptisée la biotechnologie moderne.

Les pionniers de la biotechnologie n'auraient jamais pu imaginer ce que nous pouvons faire aujourd'hui : modifier le patrimoine génétique des plantes pour les rendre résistantes aux maladies, amener des animaux à produire certains médicaments qu'on extrait de leur lait ou encore fabriquer des particules minuscules capables de cibler les cellules cancéreuses et de les détruire. Pour autant, la biotechnologie représente plus qu'un ensemble de manipulations génétiques : c'est aussi une trousse d'outils qui nous permettent de comprendre les systèmes biologiques. Fondée sur ces outils, la génomique est l'étude des gènes et de leurs fonctions. Grâce à la biotechnologie, nous avons déterminé la composition de la totalité des gènes de l'être humain (on parle de « séquençage ») et de plusieurs autres organismes. Les données génomiques nous aident à mieux évaluer les points communs et les différences parmi les organismes et les êtres humains, à comprendre les maladies, à les guérir et même à concevoir des traitements sur mesure spécifiques à chaque individu.

Comme toute autre technologie, la biotechnologie n'existe pas dans un vide. Elle est le fruit des efforts de l'homme et elle se ressent de l'environnement social, culturel et politique. C'est la société qui fait avancer la technologie et qui la régleme, dans le souci d'en atténuer les inconvénients et d'en maximiser les avantages. Nombreux sont les experts, dans le domaine des sciences naturelles et physiques, qui aimeraient voir une distinction bien nette s'établir entre les préoccupations sociales et éthiques d'une part, et les sciences et la



Nati Harnik/AP/WVWP

Une technicienne de laboratoire verse des pastilles en plastique réalisé à partir de maïs.

technologie d'autre part. Les controverses récemment suscitées par le recours à des organismes génétiquement modifiés (OGM), tant dans l'alimentation que dans l'agriculture, montrent que cette distinction est loin d'être claire. Les aliments OGM suscitent des inquiétudes quant à leur salubrité, et ils sont acceptés plus difficilement dans certains pays que dans d'autres, en fonction de considérations culturelles.

Certes, le contexte international des technologies a son importance, et il faut en tenir compte. La biotechnologie n'est pas une panacée universelle, mais c'est un outil très prometteur s'il est utilisé à bon escient. Par ailleurs, il y a des systèmes sociaux qui sont affectés par les nouvelles technologies et qui redoutent l'aggravation de la fracture sociale entre les nantis et les pauvres si la technologie n'est pas accessible à l'ensemble des secteurs de la société. À cet égard, le présent article aborde plusieurs défis à l'échelle planétaire et il examine la façon dont la biotechnologie peut être mise à profit pour les relever de manière durable et équitable.

LE DÉFI ÉNERGÉTIQUE, LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET L'ENVIRONNEMENT

Les combustibles fossiles constituent une ressource énergétique présente en quantité limitée, et nous les consomons plus vite que la nature ne les reconstitue. La biotechnologie a un rôle à jouer dans le recours à un nombre accru de sources d'énergie renouvelable. L'énergie de la biomasse, par exemple, est neutre en carbone parce qu'au bout du compte les plantes en absorbent autant qu'elles en libèrent dans l'atmosphère. Les chercheurs produisent des cellulases de meilleure qualité, c'est-à-dire des enzymes qui dégradent les matières végétales en biocarburants, tel que l'éthanol. À terme, on peut donc envisager la production de produits bioénergétiques durables et moins coûteux.

Certaines personnes pensent que le changement climatique sera particulièrement lourd de conséquences pour les pauvres, dont les facultés d'adaptation et la mobilité sont limitées, ce qui est un handicap quand une catastrophe naturelle s'abat sur eux ou que leur cadre de vie change. Outre ses effets positifs sur l'environnement, la transition à l'énergie de la biomasse pourrait aussi favoriser le développement économique dans les collectivités rurales du monde entier. Les agriculteurs pourraient cultiver des plantes capables de les nourrir, de servir de fourrage à leurs animaux et de répondre à leurs besoins énergétiques. Toutefois, ils doivent avoir accès à la technologie qui rend possible la conversion de

la biomasse. La mise à la disposition de cette technologie aux collectivités rurales et le renforcement de la capacité de faire fonctionner ces systèmes se révéleront des tâches difficiles.

On pourrait citer d'autres exemples des applications de la biotechnologie dans le secteur de l'énergie et de l'environnement, notamment la fabrication de micro-organismes transgéniques capables de produire de l'hydrogène à partir de déchets organiques, la mise au point de plantes transgéniques qui fabriquent des polymères biodégradables, le recours aux dispositifs moléculaires fondés sur des protéines végétales photosynthétiques qui captent l'énergie solaire, les bactéries transgéniques qui dégradent les agents polluants et les biocapteurs qui détectent rapidement la présence d'agents nocifs dans l'environnement. Les applications environnementales de la biotechnologie sont souvent négligées et insuffisamment financées, et ce alors même que la question de la survie de notre planète face à l'explosion démographique qu'elle connaît revêt une importance capitale.

AGRICULTURE, QUALITÉ ALIMENTAIRE ET SÉCURITÉ

La biotechnologie a pris son envol dans le secteur alimentaire et agricole. Par exemple, le coton, le soja, le maïs et d'autres végétaux ont été génétiquement modifiés de façon à ce qu'ils contiennent des protéines issues de la bactérie *Bacillus thuringiensis* (Bt) qui les protègent contre certains insectes. Les cultures Bt sont courantes dans un grand nombre de pays. La culture du coton Bt en Chine a entraîné la baisse considérable de l'épandage de pesticides chimiques qui sont dangereux pour la santé, ce dont les agriculteurs se félicitent.

En revanche, les cultures Bt ont à l'occasion suscité des inquiétudes. La variété de maïs transgénique Starlink était autorisée aux États-Unis uniquement pour le fourrage des animaux, parce qu'on craignait qu'elle ne soit potentiellement allergène pour l'être humain. Malheureusement, des traces de Starlink ont été retrouvées dans certains produits à base de maïs destinés à la consommation humaine. De même, des gènes qui codent pour la protéine Bt ont été découverts dans des variétés de maïs mexicain, alors que le maïs transgénique fait l'objet d'un moratoire au Mexique. Cette contamination s'est révélée préoccupante parce que ce pays est le centre géographique de la diversité du maïs, et que beaucoup de personnes veulent préserver les variétés indigènes pour des raisons culturelles et agronomiques. Dès lors, si l'on veut recueillir les avantages des cultures

transgéniques, il est important de se doter de solides régimes internationaux sur la biosécurité de façon à éviter les bavures et à rehausser la confiance du consommateur dans ces produits.

Par ailleurs, la biotechnologie facilite le développement d'aliments plus sains et plus nutritifs. Par exemple, plus de cent millions de personnes souffrent d'une carence en vitamine A, carence qui est responsable de centaines de milliers de cas de cécité chaque année. Des chercheurs ont mis au point une variété de riz qui contient le précurseur métabolique à la vitamine A. Ce « riz doré » est croisé avec des variétés locales de façon à maximiser ses perspectives de croissance dans les pays en développement. Les obstacles liés à la propriété intellectuelle ont été levés, et ce riz a été distribué gratuitement aux cultivateurs qui pratiquent une agriculture de subsistance. Cette démarche s'avère particulièrement importante parce que le coût des semences serait prohibitif pour eux. Des chercheurs travaillent à la mise au point d'autres cultures à teneur accrue en fer, en vitamine E, en acides aminés essentiels et en huiles plus saines.

À l'avenir, de nouvelles applications de la biotechnologie dans le domaine alimentaire et agricole pourraient se révéler utiles. Le Programme des Nations unies pour l'environnement classe les



Jay Laprete/AP/WWP

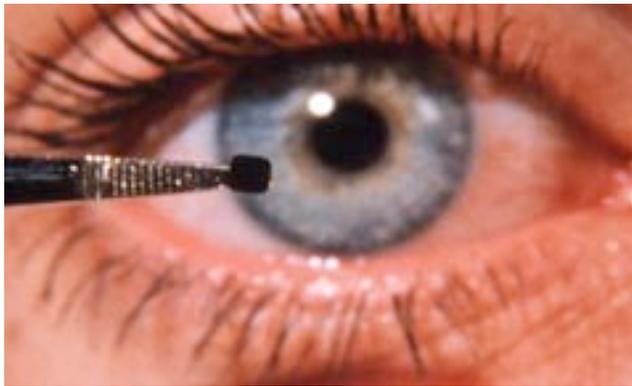
Un patient subit une intervention ayant recours à la thérapie génique.

pénuries d'eau douce au deuxième rang des problèmes environnementaux, derrière le changement climatique, qui sévront au XXI^e siècle. L'élaboration de cultures résistantes à la sécheresse et à la salinité, et spécifiques aux besoins des pays en développement, pourrait considérablement renforcer la sécurité alimentaire dans les régions aux terres peu productives et sujettes aux catastrophes naturelles, avec le spectre de la famine en

perspective. Grâce à la génomique et à la biotechnologie moderne, nous parvenons à mieux comprendre, à identifier et à manipuler les nombreux traits responsables de l'utilisation de l'eau et du sel par les plantes.

SANTÉ ET MÉDECINE

Le public connaît mieux les applications médicales de la biotechnologie. La recherche sur les cellules souches et le clonage sont deux sujets qui occupent le devant de



Markus/Matzel/Peter Arnold, Inc.

Microdispositif destiné à être implanté dans la rétine.

la scène politique nationale et internationale à un degré inhabituel pour des questions scientifiques. Les cellules souches sont celles qui sont présentes dès le début de la formation d'un organisme et qui sont capables de produire des cellules pour divers tissus de l'organisme. Elles ont été utilisées pour remplacer ou réparer des tissus endommagés chez l'animal, et les expériences ont été concluantes, ce qui permet d'espérer qu'elles pourront servir à traiter la maladie d'Alzheimer ou le diabète chez l'homme. Si la vaste majorité des gens s'accordent à juger inacceptable le clonage humain à des fins de reproduction (dit clonage génésique), le clonage thérapeutique, qui vise simplement à recueillir des cellules souches, est vivement débattu. Parce qu'il pourrait fournir des cellules souches faites sur mesure pour chaque individu, le clonage thérapeutique atténuerait les risques graves associés au rejet de tissus. Ces méthodes sont riches de promesses. Quoi qu'il en soit, les considérations éthiques et culturelles aussi bien que les questions d'orientation vont continuer de retenir l'attention des scientifiques et des hommes politiques dans un avenir prévisible.

Une application fondamentale de la biotechnologie dans le domaine de la médecine concerne la découverte de médicaments. Aussi loin qu'on remonte dans l'histoire, l'homme a cherché à utiliser des substances naturelles comme produits thérapeutiques, en procédant à tâtons. Aujourd'hui, la génomique et le domaine connexe de

la protéomique, qui s'intéresse aux protéines, nous permettent de découvrir de nouveaux médicaments de manière plus systématique. L'automatisation des essais de liaisons biochimiques qui sont effectués dans des microréseaux, c'est-à-dire des puces, offre aux scientifiques la possibilité d'évaluer très rapidement l'efficacité potentielle de milliers de composants chimiques contre diverses protéines responsables de maladies. Ce criblage à haut rendement, pour appeler cette technique par son nom, n'aurait jamais vu le jour si la recherche biotechnologique fondamentale n'avait pas bénéficié de solides investissements pendant des années.

Grâce à l'analyse par microréseau, on peut mesurer rapidement l'activité de milliers de gènes. Quantité de chercheurs exploitent toutes les possibilités de cet outil pour déterminer le comportement des gènes chez l'homme dès que des agents pathogènes infectent l'organisme. On envisage de créer des tests de dépistage rapide et non invasif, lesquels se révéleront particulièrement importants face aux maladies qu'il faut traiter sans perdre de temps pour éviter qu'elles ne se propagent et ne fassent un grand nombre de victimes ; c'est le cas, par exemple, des infections consécutives à une attaque biologique. On est en train de mettre au point des nanocapteurs, à partir de particules d'une taille environ cinquante mille fois inférieure au diamètre d'un cheveu, qui sont destinés à détecter l'expression de protéines et de gènes dans les cellules de l'organisme. Ces dispositifs devraient donc permettre d'évaluer l'état des cellules dès les premières étapes d'une maladie. Le gouvernement des États-Unis consacre des millions de dollars à la mise au point de nanocapteurs qui pourraient être placés dans les vaisseaux sanguins des astronautes afin de surveiller leur exposition aux rayonnements dans l'espace.

La thérapie génique, qui permet d'introduire dans des organes ou des tissus malades des gènes capables de corriger des déficits métaboliques ou d'autres affections, est un autre domaine prometteur. L'usage de virus comme vecteurs de gènes ayant été associé à des risques pour la santé de l'homme, les essais qui portent sur cette technique sont controversés. La convergence de la nanotechnologie et de la biotechnologie laisse présager la mise au point de vecteurs autres que des virus. Des nanoparticules de synthèse capables d'acheminer des gènes ou des substances thérapeutiques dans des cellules endommagées font actuellement l'objet d'essais sur l'animal.

Par ailleurs, la biotechnologie joue un rôle important dans la prévention des maladies. Les vaccins produits

à l'aide des méthodes de l'ADN recombinant sont généralement plus sûrs que les vaccins classiques parce qu'ils contiennent des protéines virales ou bactériennes isolées, et non pas des agents pathogènes tués ou atténués. Toutefois, beaucoup d'habitants des pays en développement n'ont pas accès à quelque vaccin que ce soit, et à plus forte raison à ceux qui sont issus de la biotechnologie. À l'heure actuelle, la plupart des vaccins doivent être réfrigérés et être administrés par injection. Dès lors, les chercheurs tentent de modifier le patrimoine génétique de certaines plantes destinées à la consommation humaine pour tenter de leur faire produire des vaccins. On estime par exemple que le coût de l'administration du vaccin contre l'hépatite B réalisé à partir de plantes et administré par voie orale représente le sixième seulement de celui des vaccins classiques contre cette infection. On pourrait produire sur une superficie de 80 hectares seulement tous les antigènes dont on a besoin pour vacciner la totalité des bébés qui naissent chaque année dans le monde. Malheureusement, comme dans le cas des cultures Bt, les cultures pharmaceutiques suscitent des inquiétudes du fait du risque de pollinisation croisée avec d'autres plantes cultivées dans le même champ. Il sera particulièrement important d'adopter des mesures de biosécurité qui rendront obligatoire l'utilisation de cultures incapables de pollinisation croisée (plantes mâles stériles, par exemple) ou l'isolement des cultures pharmaceutiques (dans des serres, par exemple).

LES DÉFIS

Il est frappant de constater qu'un certain nombre des exemples susmentionnés se rapportent à la Déclaration du Millénaire, accord conclu en 2000 par plus de 170 pays déterminés à relever le défi de la pauvreté, du développement économique et de la préservation de l'environnement. Malgré cela, la science et la technologie sont rarement intégrées aux programmes internationaux qui sont axés sur le développement social et économique. Des progrès notables ont été réalisés dans la voie de certains objectifs énoncés dans la Déclaration du Millénaire, tels que le recul de la pauvreté, l'élargissement de l'accès à l'enseignement primaire, le renforcement de l'égalité sexospécifique et la baisse de la mortalité infantile. En revanche, on progresse plus lentement dans la lutte contre les maladies mondiales et dans la protection de l'environnement. Ce sont des défis que la biotechnologie peut contribuer à relever.

Les investissements dans les sciences et la technologie, quels que soient les pays qui les consentent, finiront tôt ou tard par porter leurs fruits au plan économique. Toutefois, les investissements dans la recherche de solutions aux questions sociales, politiques, culturelles et éthiques qui se greffent sur les applications de la biotechnologie revêtent une importance égale. Il y a de bonnes façons d'encourager un dialogue franc sur ces questions. Peut-être ne parviendrons-nous jamais à nous entendre sur certains points, par exemple le clonage thérapeutique. Il n'empêche que le dialogue ouvre la voie à une meilleure compréhension des vues des uns et des autres et au respect des différences.

Nous ne devons pas minimiser les risques potentiels de la biotechnologie pour la santé et l'environnement. Nous devons financer des études, à confier à des organismes indépendants, qui viseront à élucider ces effets. En outre, il convient de simplifier les mécanismes de réglementation en vue d'en rehausser l'efficacité, l'efficience et la transparence. À l'heure actuelle, il n'y a guère d'incitations à la réalisation d'études indépendantes qui soient consacrées aux dispositifs et à la politique de réglementation.

Enfin, il nous faut investir dans les technologies qui visent à aider les pays en développement et à renforcer les capacités dans leurs collectivités, notamment par le biais de l'éducation, de la formation et de l'assistance liée aux questions de propriété intellectuelle. Ce sont principalement les pays développés qui bénéficient des investissements dans la biotechnologie, surtout dans la perspective de la fabrication de produits laissant entrevoir un bon rendement financier. Si une telle démarche n'a rien de surprenant dans le secteur privé, il faut cependant en élargir la portée. Les gouvernements et d'autres organisations doivent monter au créneau pour investir dans la recherche dans les pays en développement et pour encourager la création de produits susceptibles de leur être utiles. Si nous nous montrons plus sensibles au contexte social de la biotechnologie et que nous redoublons d'ardeur pour régler les questions qui demeurent, nous pouvons envisager un avenir dans lequel les bienfaits de la biotechnologie seront mis de manière responsable au service de l'ensemble des pays et des peuples. ■

Les opinions exprimées dans le présent article ne reflètent pas nécessairement les vues ni la politique du gouvernement des États-Unis.

UNE RÉACTION CHIMIQUE POUR LA BIOTECHNOLOGIE Le prix Nobel 2005

Cheryl Pellerin

Cette année, une réaction chimique au potentiel économique considérable pour l'industrie pharmaceutique, la biotechnologie et le secteur agro-alimentaire a retenu l'attention de l'Académie royale des sciences de Suède. Cette dernière a en effet décerné le prix Nobel de la chimie à trois scientifiques (dont deux américains, Robert Grubbs et Richard Schrock, et un français, Yves Chauvin) qui ont mis au point une réaction chimique capable de simplifier le développement et la production industrielle de médicaments, de plastiques et d'autres substances transgéniques : elle fait baisser les coûts de fabrication et se révèle plus conviviale pour l'environnement.

« La métathèse est (...) une arme importante dans la chasse aux nouveaux produits pharmaceutiques capables de traiter toute une panoplie de maladies qui sévissent à l'échelle mondiale », a fait savoir l'Académie royale des sciences de Suède en annonçant le prix. Les travaux des lauréats, a-t-elle dit, aideront les chercheurs à mettre au point des médicaments issus de la biotechnologie qui pourront traiter diverses maladies, dont les infections bactériennes, l'hépatite C, le cancer, la maladie d'Alzheimer, la trisomie, l'ostéoporose, l'arthrite, les inflammations, la fibrose et le VIH/sida.

La réaction que l'on doit à MM. Grubbs, Schrock et Chauvin porte le nom de métathèse de l'« oléfine ». Tout commence par une chaîne de carbone qui a une double liaison carbonique, d'ordinaire difficile à briser. Est ensuite ajouté un catalyseur spécial – c'est-à-dire une substance qui accroît le taux de réaction sans être consommée pendant la réaction –, lequel comporte une double liaison carbone-métal. Pendant la réaction, tous les éléments de la chaîne de carbone et le catalyseur

se combinent pour former un seul anneau. L'anneau se désintègre, et un atome de carbone provenant de la double liaison carbone-métal change de place avec un atome de carbone de la double liaison carbone-carbone. Les deux substances qui en résultent sont un nouveau composé chimique et un catalyseur modifié. Il aurait été très compliqué de synthétiser ce nouveau composé d'une autre façon, et il aurait fallu introduire un plus grand nombre d'étapes dans la réaction.

« La découverte de la métathèse a montré de nouvelles façons de briser les liaisons [carbone-carbone] et de les modifier très facilement dans des conditions faciles à reproduire, explique Charles Casey, professeur de chimie à l'université du Wisconsin et ancien président de l'American Chemical Society.

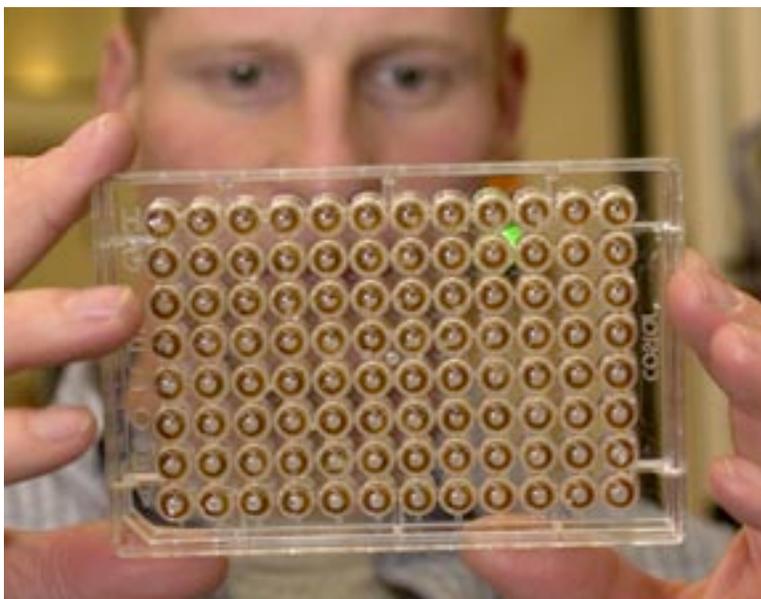
Quantité d'entreprises du secteur de la biotechnologie industrielle se servent de la métathèse de l'oléfine pour produire divers composés, dont des substances susceptibles d'être utilisées comme médicaments. En outre, la métathèse permet de synthétiser une substance qui existe dans la nature, par exemple une hormone sécrétée par un insecte, et de la produire en grande quantité, pour fabriquer un insecticide naturel.

« Il existe toutes sortes de molécules organiques complexes que nous aimerions synthétiser, et ces réactions [la métathèse] offrent des moyens particulièrement efficaces pour y parvenir », résume Charles Casey. ■

Cheryl Pellerin est rédactrice scientifique au département d'État.

LE POUVOIR DE TRANSFORMATION DE LA BIOTECHNOLOGIE MÉDICALE

Bill Snyder



Elise Amendola/AP/WWP

Des échantillons d'ADN purifié sont préparés en vue du séquençage. Cette activité s'insère dans le Projet du génome humain.

Des pas de géant ont été faits depuis les premiers temps de l'épissage génétique, point de départ de l'industrie de la biotechnologie. La mise au point de nouveaux médicaments et vaccins, l'amélioration et l'accélération de la pharmacothérapie, le renforcement des capacités de diagnostic et les autres utilisations médicales ne laissent pas place au doute sur ce point. De l'avis de nombreux scientifiques, les progrès enregistrés à ce jour n'en sont qu'à leurs balbutiements. Dans un avenir pas si lointain que ça, disent-ils, l'affinement des « thérapies ciblées », qui s'attaquent au fondement biologique même des maladies, devrait considérablement améliorer l'innocuité et l'efficacité des médicaments, et le développement de techniques prédictives pourrait inaugurer une ère nouvelle dans le domaine de la prévention des maladies, en particulier dans certains pays à la croissance économique rapide. Pour autant, il ne s'agit pas de fermer les yeux sur les risques, dans la mesure où toute évolution et toute nouvelle découverte entraînent dans leur sillage de nouvelles questions, notamment d'ordre éthique, en particulier dans les domaines de la thérapie génique, de la recherche sur les cellules souches et de l'utilisation des informations génomiques.

Bill Snyder est rédacteur scientifique de haut niveau au centre hospitalo-universitaire Vanderbilt situé à Nashville, dans le Tennessee.

Il y a trente ans, plus d'une centaine d'experts scientifiques de renommée internationale se réunissaient au palais des congrès Asilomar, sis à Pacific Grove (Californie), pour débattre des risques potentiels du génie génétique. Inquiets à l'idée que la technologie de l'ADN (acide désoxyribonucléique) recombinant puisse transformer des microbes inoffensifs en agents pathogènes dangereux pour l'homme, les scientifiques convinrent d'un moratoire volontaire sur certaines expériences.

Les prévisions désastreuses se révélèrent dénuées de fondement. Bien au contraire, l'épissage a fomenté de multiples révolutions dans le domaine médical : la mise au point de méthodes de détection rapide d'infections et de surveillance du taux de cholestérol, le développement de nouveaux vaccins et de voies thérapeutiques entièrement

nouvelles, et des percées au niveau de la compréhension de toutes sortes de maladies, tels la mucoviscidose ou le cancer.

C'est des premières expériences sur l'épissage génétique qu'est née l'industrie de la biotechnologie, pleine d'enthousiasme – et très rentable. La recombinaison de l'ADN a rendu possible le séquençage du génome humain et jeté les bases de la bioinformatique, de la nanomédecine et des thérapies individualisées. Quantité de scientifiques en sont convaincus: au cours des vingt prochaines années, l'affinement des « thérapies ciblées », qui s'attaquent au fondement biologique même des maladies, devrait considérablement améliorer l'innocuité et l'efficacité des médicaments, tandis que le développement de techniques prédictives, notamment dans le domaine de la protéomique, pourrait inaugurer une ère nouvelle dans la prévention des maladies.

Pour autant, des inquiétudes persistent quant aux risques de la thérapie génique, à l'éthique de la recherche sur les cellules souches et au danger d'une utilisation abusive des données génomiques. En fonction de son point de vue, on considère que la biotechnologie porte en germe bien des promesses, ou bien des périls, ou encore les deux à la fois.

LES PREMIÈRES ÉTAPES

En 1982, l'Administration des produits alimentaires et pharmaceutiques des États-Unis (FDA) approuve le premier médicament obtenu par génie génétique, à savoir une forme de l'insuline humaine recombinante. Jusqu'à cette date, l'insuline était extraite de pancréas de bœuf ou de porc, et sa production était limitée. En insérant dans une bactérie le gène humain qui code pour l'insuline, les scientifiques ont réussi à faire produire par la bactérie d'importantes quantités de cette protéine d'importance vitale. Dans un avenir proche, il n'est pas à exclure que les personnes atteintes de diabète puissent absorber l'insuline par inhalation au lieu de continuer de se faire des piqûres.

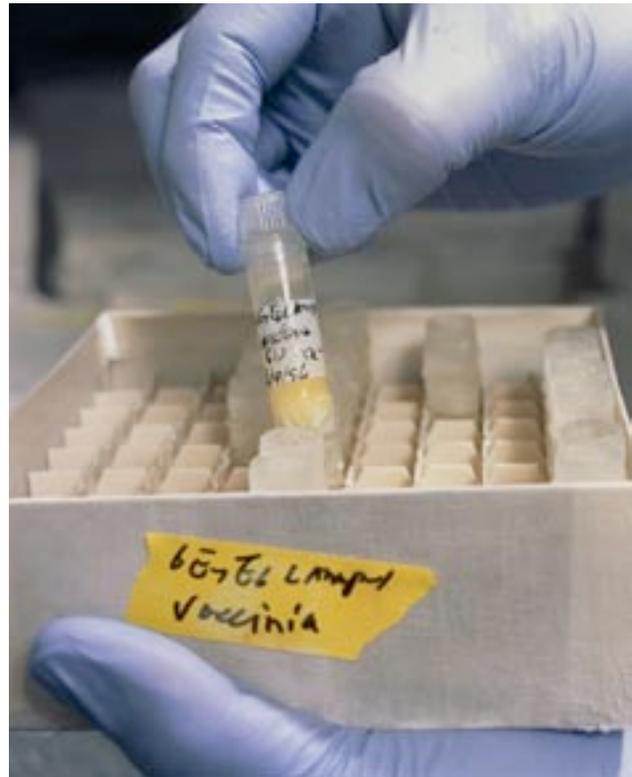
Le premier vaccin recombinant, approuvé en 1986, contient un fragment de gène provenant du virus de l'hépatite B et qui est inséré dans une levure. Le dispositif moléculaire de cette dernière utilise le fragment pour produire un antigène, protéine présente sur la surface du virus et qui stimule la réponse immunitaire. Dès lors, il n'est plus nécessaire d'extraire l'antigène du sérum des personnes infectées par l'hépatite B.

De nos jours, le nombre de vaccins et de médicaments recombinants dépasse la centaine. Efficaces, inoffensifs et relativement bon marché, les tests de diagnostic

moléculaire et les vaccins recombinants pourraient présenter un intérêt particulier dans le contexte de la lutte contre les maladies qui sévissent depuis fort longtemps dans les pays en développement, dont la leishmaniose (maladie tropicale infectieuse qui provoque de la fièvre et des lésions) et le paludisme.

AMÉLIORATION DES CAPACITÉS DE DIAGNOSTIC

Par ailleurs, la biotechnologie a considérablement amélioré les capacités de diagnostic. La réaction en chaîne de la polymérase, méthode décrite vers le milieu des années 1980 et qui permet, par un phénomène d'amplification, de produire un grand nombre de copies de fragments minuscules d'ADN, a joué un rôle crucial dans le développement de tests de dépistage sanguin rapide de certaines infections, dont l'exposition au virus de



David Parker/Photo Researchers, Inc.

Vaccin contre le cancer du col de l'utérus réalisé à partir d'un virus qui a fait l'objet de manipulations génétiques.

l'immunodéficience acquise humaine (VIH).

Le développement des anticorps monoclonaux, en 1975, a lui aussi entraîné une révolution médicale. L'organisme produit normalement toute une gamme d'anticorps, protéines du système immunitaire qui ont pour fonction de détruire les micro-organismes et autres corps étrangers. En faisant fusionner des cellules

productrices d'anticorps avec des cellules de myélome, les scientifiques ont réussi à produire des anticorps capables, tels des « projectiles magiques », d'aller chercher des cibles précises, y compris des marqueurs uniques, appelés antigènes, présents à la surface des cellules inflammatoires.

Parmi les premiers anticorps monoclonaux qui ont été fabriqués, on compte ceux qui empêchent le système immunitaire de rejeter les greffes d'organes. Un autre anticorps monoclonal qui a été particulièrement bien accueilli est l'Herceptin, médicament utilisé depuis 1998 dans le traitement du cancer avancé du sein. D'autres encore ont été approuvés pour traiter la sclérose en plaques et la polyarthrite rhumatoïde, et ils font actuellement l'objet d'essais visant à déterminer s'ils peuvent être prescrits dans le traitement de l'asthme, de la maladie de Crohn et la dystrophie musculaire.

Couplés à des radioisotopes ou à des substances de contraste, les anticorps monoclonaux aident à localiser les cellules cancéreuses, ce qui a pour effet d'améliorer la précision des interventions chirurgicales ou de la radiothérapie et de montrer, en l'espace de 48 heures, si une tumeur est sensible à la chimiothérapie. De même, les protéines peuvent acheminer une dose mortelle d'un médicament toxique dans les cellules cancéreuses tout en épargnant les tissus sains.

LES ANIMAUX TRANSGÉNIQUES

À l'heure actuelle, il existe des tests génétiques de dépistage de nombreuses maladies rares, dont l'hémophilie, qui est due à la mutation d'un seul gène. Malheureusement, on ne peut pas faire grand-chose pour prévenir ou retarder l'évolution de ces maladies, et les causes sous-jacentes de maladies plus complexes, comme le cancer, la cardiopathie et les maladies mentales, sont encore mal comprises.

La situation commence à évoluer, en partie depuis le début des années 1980, quand les scientifiques ont réussi à insérer de l'ADN humain dans des souris et d'autres animaux.

Comme ils expriment des gènes humains, les animaux « transgéniques » peuvent être étudiés comme modèles pour suivre l'évolution du diabète, de l'athérosclérose et de la maladie d'Alzheimer. En outre, ils peuvent produire de grandes quantités de protéines humaines qui pourraient avoir un effet thérapeutique chez l'homme. Par exemple, une substance qui permet de prévenir la formation de caillots de sang et qui est issue du lait de chèvres transgéniques fait actuellement l'objet d'essais sur des humains.

Le séquençage du génome humain, achevé il y a deux ans seulement, a mis entre les mains des scientifiques une liste de « pièces détachées » incroyablement détaillée qui leur permet de comprendre le pourquoi et le comment des maladies. En outre, le séquençage du génome humain rend d'autant plus utile le profilage d'expression des gènes, méthode qui permet de surveiller l'expression simultanée de milliers de gènes sur une lamelle en verre, et dite microréseau à base d'ADN. Dans certains cas, cette technique permet de prédire le degré d'agressivité du cancer du sein.

Un autre domaine en mutation rapide est celui de la protéomique, c'est-à-dire l'ensemble des techniques, dont la spectrométrie de masse, qui permettent de détecter la présence de biomarqueurs dans le sang, lesquels pourraient être des signes précurseurs d'une maladie, décelables avant même les premiers symptômes. La protéine C-réactive est un exemple de biomarqueur : elle indique la présence de phénomènes inflammatoires dans les parois des vaisseaux sanguins qui laissent présager l'athérosclérose.

Le dépistage à haut rendement, réalisé à l'aide de techniques robotiques et informatiques de pointe, permet aux scientifiques de tester des dizaines de milliers de petites molécules en l'espace de vingt-quatre heures pour savoir si elles sont capables de se lier à une « cible », tel un récepteur d'un neurotransmetteur dans le cerveau, ou bien d'en moduler l'activité. L'objectif visé consiste à accélérer et à affiner la découverte de médicaments tout en faisant baisser le coût des produits pharmaceutiques qui arrivent sur le marché et en les rendant plus sûrs.

LA RÉPONSE À LA RÉSISTANCE AUX ANTIBIOTIQUES

Par ailleurs, la biotechnologie apporte une réponse au problème urgent et croissant que pose la résistance aux antibiotiques.

Avec l'aide de la bioinformatique (liée à l'utilisation de programmes informatiques puissants, capables d'analyser des millions de fragments de données tirées de la séquence génomique), les scientifiques sont en train de briser le code génétique des bactéries et de découvrir leurs « points faibles », c'est-à-dire leur vulnérabilité aux attaques par des composés identifiés au moyen du dépistage à haut rendement. Ce sont ces travaux qui ont débouché, en 2000, sur l'autorisation de mise sur le marché du Zyvox, le premier antibiotique entièrement nouveau à être commercialisé depuis 35 ans.

Les bactériophages lytiques, virus capables d'infecter et de tuer des bactéries, laissent entrevoir une autre façon de combattre la résistance aux antibiotiques. Utilisée dans



Lawrence Jackson/AP/WWP

Des chercheurs de l'université Howard construisent une banque de données génétiques sur les Afro-Américains.

le traitement d'infections dès les années 1920, la thérapie bactériophage s'est trouvée largement éclipsée quand les antibiotiques ont fait leur apparition. Or cette année, des chercheurs de l'ancienne république soviétique de Géorgie ont rapporté que l'utilisation conjuguée d'un polymère biodégradable imprégné de bactériophages et de l'antibiotique Cipro avait permis de guérir des lésions infectées par une bactérie résistante aux médicaments.

La nanomédecine est un autre domaine qui évolue rapidement. Des scientifiques sont en train de mettre au point toutes sortes de nanoparticules et de nanodispositifs, d'à peine quelques millimicromètres de diamètre, lesquels sont destinés à améliorer le dépistage du cancer, à stimuler la réponse immunitaire, à réparer des tissus endommagés et à bloquer l'athérosclérose. Cette année, l'Administration des produits alimentaires et pharmaceutiques des États-Unis (FDA) a donné son aval à l'utilisation d'une nanoparticule liée au médicament anticancéreux Taxol dans le cadre du traitement du cancer avancé du sein. Une autre nanoparticule visant à prévenir le rétrécissement de l'artère coronaire fait actuellement l'objet d'essais aux États-Unis parmi des sujets qui ont subi une angioplastie.

Les études réalisées sur les cellules souches d'embryons humains dans la perspective du remplacement des cellules endommagées par le diabète, le cancer ou la maladie d'Alzheimer suscitent des controverses aux États-Unis parce que ces travaux impliquent la destruction d'un potentiel de vie. Pour autant, la recherche va bon train dans les laboratoires privés des États-Unis et d'autres pays.

LE DÉFI DU TRANSFERT DE GÈNES

Dans le domaine de la biotechnologie médicale, certaines démarches se sont révélées plus compliquées que d'autres. Le transfert de gènes, par exemple, concerne le remplacement d'un gène défectueux par un autre en bon état. Dans la plupart des cas, le gène normal est acheminé dans les tissus visés par un adénovirus qui a été génétiquement modifié de façon à être inoffensif.

La première expérience de ce type, tentée en 1990 à l'Institut national de la santé des États-Unis (NIH), a corrigé un déficit enzymatique chez une fillette de quatre ans. Neuf ans plus tard, toutefois, le décès d'un autre patient, apparemment suite à une violente réaction immunitaire au virus vecteur du gène, a entraîné l'adoption de procédures plus strictes en matière d'essais cliniques.

Depuis, on progresse à petits pas, encore que le transfert de gènes fasse actuellement l'objet d'études, aux États-Unis et dans d'autres pays, comme traitement potentiel de la maladie artérielle périphérique, de la maladie de Parkinson et de certaines formes de cancer. Le gouvernement chinois a récemment donné son aval au premier transfert commercialisé de gènes pour le traitement du cancer de la tête et du cou.

Les scientifiques ne croient pas qu'une maladie soit liée à la présence d'un seul gène. Dès lors, ils étudient les liens entre les gènes et les variations individuelles dans le code génétique de populations données, également appelées polymorphismes de nucléotides simples. Les différences observées peuvent signaler un risque accru pour telle ou telle maladie ou déterminer la réaction d'un individu à un certain médicament.

L'extraordinaire pouvoir que nous avons d'assigner des risques et des réactions aux variations génétiques est la locomotive du mouvement vers la « médecine individualisée ». L'ambitieux objectif visé est celui de la prévention, du diagnostic précoce et des thérapies à l'efficacité renforcée, parce que les interventions prescrites correspondent précisément aux caractéristiques génétiques des patients.

À LA CONQUÊTE DE NOUVELLES POSSIBILITÉS

Face à la crainte que les compagnies d'assurance-maladie ou les employeurs ne rejettent certaines personnes en fonction des renseignements qu'ils auraient obtenus sur leur risque de maladies, toute une série de lois portant interdiction de la discrimination génétique ont été promulguées aux États-Unis, au niveau fédéral comme à celui des États.

Dans le même temps, l'Institut national de la santé (NIH), fervent partisan de la recherche médicale aux États-Unis, encourage les établissements d'enseignement supérieur à pousser toujours plus loin cette nouvelle science et les possibilités qu'elle recèle. Ainsi le centre hospitalo-universitaire Vanderbilt, sis à Nashville, procède-t-il en ce moment à la révision de son plan stratégique de recherche de façon à mettre l'accent sur la médecine personnalisée, la découverte de médicaments et les modalités optimales de la prestation de soins médicaux.

La poursuite de la recherche de pointe « nous rapproche de notre objectif ultime, à savoir l'élimination des déficiences et des maladies grâce aux soins les plus performants que la médecine moderne puisse offrir », explique le docteur Harry Jacobson, vice-chancelier de l'université Vanderbilt chargé des affaires relatives à la santé.

La biotechnologie est un outil neutre ; ses capacités suscitent néanmoins des questions troublantes d'ordre éthique. Les futurs parents doivent-ils avoir le droit de recourir aux manipulations génétiques pour choisir les caractéristiques physiques de leur bébé ? Est-il bon que la science fasse des retouches à la lignée germinale, ou va-t-elle modifier de manière profonde et irrévocable l'identité même de l'être humain ?

De manière plus immédiate, les chercheurs ne devraient-ils pas appliquer la biotechnologie (s'ils le peuvent) à l'élimination des disparités liées à la santé entre les divers groupes raciaux et ethniques ? Si les variations génétiques ne constituent qu'un seul facteur parmi tant d'autres (avec l'environnement, le milieu socioéconomique, l'accès aux soins médicaux, le stress et les comportements, par exemple) qui contribuent aux différences en matière de résultats pour la santé, la capacité croissante d'exploiter les bases de données sur l'ADN provenant de populations diverses devrait permettre aux scientifiques d'analyser le rôle que jouent tous ces facteurs.

« La compréhension du fondement génétique de la cardiopathie et du cancer facilitera la mise au point d'outils de dépistage et d'interventions qui pourront contribuer à enrayer la propagation de ces affections dévastatrices dans les pays dont l'essor économique est le plus rapide, notamment en Extrême-Orient », dit le docteur Jeffrey Balser, vice-chancelier associé de l'université Vanderbilt chargé de la recherche.

À elle seule, la biotechnologie ne saurait résoudre les problèmes complexes de santé. Il convient non seulement de se doter de structures sanitaires d'appui en vue de garantir l'accès aux tests de dépistage, aux vaccins et aux médicaments qui seront mis au point, mais aussi de surmonter les obstacles culturels, économiques et politiques au changement. La recherche doit inclure un nombre plus important de représentants de groupes désavantagés, ce qui signifie qu'il faudra trouver le moyen d'atténuer les réserves que certains d'entre eux nourrissent de longue date envers les sciences médicales.

« Il sera en outre essentiel de s'assurer que les nouvelles connaissances et les nouvelles technologies ne seront pas utilisées de façon discriminatoire à l'encontre de certaines personnes et de certains groupes », ajoute le docteur Ellen Wright Clayton, codirectrice du Center for Biomedical Ethics and Society de l'université Vanderbilt. « Les lois qui ont été promulguées représentent un pas dans la bonne direction, mais il reste encore du travail à faire si l'on veut voir s'épanouir la société inclusive et saine à laquelle nous aspirons. » ■

Les opinions exprimées dans le présent article ne reflètent pas nécessairement les vues ni les politiques du gouvernement des États-Unis

LA COURSE CONTRE LE DOPAGE GÉNIQUE

Huntington Willard

Ces quelques dernières années, le débat public sur l'usage de substances visant à améliorer la performance des sportifs a atteint une virulence certaine. Après avoir solennellement affirmé au Congrès, en mars 2005, qu'il n'avait jamais eu recours à des stéroïdes, le joueur de baseball Rafael Palmeiro, de l'équipe



Roberto Borea/AP/WWP

Rafael Palmeiro, de l'équipe de baseball des Orioles, bondit pour arrêter une balle.

des Orioles de Baltimore, longtemps pressenti comme futur lauréat du Baseball Hall of Fame, s'est vu infliger dix jours de suspension au mois d'août. Son crime ? Un test de dépistage positif aux stéroïdes. Les dépositions qui avaient été faites devant un jury de mise en accusation dans le cadre d'une enquête sur un laboratoire de San Francisco, et qui avaient été divulguées clandestinement, semblaient impliquer plusieurs autres sportifs de haut niveau, y compris dans le domaine de l'athlétisme. Dans d'autres pays, les responsables de la lutte contre le dopage soumettent régulièrement les cyclistes de compétition à des tests de dépistage et ils sanctionnent ceux qui obtiennent des résultats positifs. Récemment, l'analyse rétrospective de 70 échantillons d'urine prélevés lors du Tour de France 1998 a permis de déceler de l'EPO dans 40 d'entre eux. L'EPO est une hormone de synthèse qui accroît la formation de globules rouges et qui peut ainsi donner un coup de fouet à l'organisme. À l'époque, en 1998, les tests de dépistage de cette hormone n'étaient pas considérés fiables.

Nonobstant les manchettes récentes de journaux consacrées à l'usage d'anabolisants stéroïdiens dans le monde du football américain et à celui de l'EPO dans le cyclisme européen, le dopage génique de pointe

pourrait bientôt avoir le triste honneur de rendre ces produits obsolètes. Le commissaire de la National Football League des États-Unis, Paul Tagliabue, l'a bien laissé entendre au cours d'une déposition faite au Congrès, un mois à peine après les dénégations de Rafael Palmeiro :

« Le jour où [le dopage génique] fera

son apparition, les questions [de dopage] dont débat aujourd'hui la société seront aussi dépassées qu'un forgeron l'est à l'ère de l'automobile », a-t-il affirmé.

Le dopage génique, c'est-à-dire l'usage non thérapeutique de gènes ou de cellules en vue d'augmenter la performance sportive, est susceptible d'offrir à l'athlète malhonnête un organisme chargé à fond qui lui permettra de courir plus vite et de sauter plus haut, mais sans risque que la supercherie soit décelée. Si un athlète s'injecte des copies supplémentaires d'un gène déjà présent dans son organisme, comment pourra-t-on distinguer l'original de la copie ? Seule une biopsie musculaire coûteuse pourrait permettre de déceler la présence d'un gène synthétique, c'est-à-dire qui aurait été légèrement modifié.

Nous savons que la prouesse physique est dans une grande mesure câblée dans le génome de l'individu. Une étude récente faite parmi des jeunes gens qui suivaient un entraînement de cyclisme donne à penser qu'il pourrait y avoir jusqu'à cinq cents gènes et marqueurs d'ADN, éparpillés dans le génome, qui pourraient contribuer à la performance athlétique et à la forme physique. On sait aussi que les souris dont le gène codant pour la myostatine a été invalidé ont

tendance à être très musclées et à avoir des fibres musculaires de plus gros diamètre: on affuble ces rongeurs du sobriquet de «souris Schwarzenegger».

Combien de culturistes pourraient résister à ce phénomène ?

Cette méthode de dopage, comme toutes les autres d'ailleurs, devrait inciter les athlètes à la réflexion. L'usage abusif de l'EPO, par exemple, peut avoir des conséquences catastrophiques. Cette hormone a tendance à épaissir le sang au point de

provoquer des arrêts cardiaques, en particulier chez les athlètes de haut niveau dont le rythme cardiaque au repos est typiquement très faible. Peu après l'apparition de l'EPO sur la scène du cyclisme, dix-huit cyclistes belges et danois ont été foudroyés par une crise cardiaque. La question mérite d'être posée: quels seront les risques du dopage génétique à l'EPO quand la crainte d'être pris en faute sera nulle ?

D'aucuns arguent que le meilleur moyen de contrôler le dopage génétique, c'est de le légaliser. Après tout, si Tiger Woods peut bénéficier d'une intervention chirurgicale oculaire au laser pour améliorer son acuité visuelle, avec les avantages que l'on devine pour un joueur de golf, pourquoi un cycliste ne pourrait-il pas modifier son patrimoine génétique ? En outre, poursuivent les partisans de la légalisation du dopage, la réglementation de cette pratique rendrait possible l'imposition de normes.

Mais le dopage génétique ne contredit-il pas l'esprit même du sport ? Jusqu'à présent, les responsables des fédérations sportives répondent par l'affirmative. Ces dernières années, le Comité international olympique et l'Agence internationale antidopage ont ajouté le

dopage génétique à leur liste de substances interdites. (L'Union cycliste internationale reste étrangement muette sur la question.) Reste à avoir si l'on peut

trouver un moyen pratique de faire respecter ces interdictions.

Dans le climat de compétition qui domine notre société, le désir de gagner est omniprésent. Au début de l'année 2005, quand l'U.S. Major League Baseball a fini, la honte au front, par durcir quelque peu son programme de dépistage

du dopage aux stéroïdes, le Bureau

du commissaire du baseball a rendu public le nom de 41 joueurs de ligue mineure dont le test de dépistage effectué au printemps, à la reprise de la saison, s'était révélé positif. Chose étonnante, ces athlètes avaient continué à consommer des substances interdites alors qu'ils savaient qu'ils seraient probablement testés, pris en faute et identifiés publiquement. Et que dire de Rafael Palmeiro ? S'il a pris des produits stéroïdiens en toute connaissance de cause, n'a-t-il donc pas compris que de héros il deviendrait paria s'il se faisait prendre ?

Le dopage classique va peut-être disparaître comme l'a fait le forgeron, mais il semble plus que probable que le dopage génétique va bientôt s'imposer pour de bon. Quel sens donnerons-nous alors aux compétitions sportives ? ■

Huntington Willard, directeur de l'Institute for Genome Sciences and Policy et vice-président du département des sciences génomiques au Centre médical de l'université Duke

Les opinions exprimées dans le présent article ne reflètent pas nécessairement les vues ni les politiques du gouvernement des États-Unis



Les cyclistes du Tour de France arrivent à Paris.

Michel Spingler/AP/WWP

ALIMENTATION, ÉNERGIE, SANTÉ

Les apports de la biotechnologie végétale

Richard Hamilton, Richard Flavell et Robert Goldberg

Le monde devra produire plus d'aliments pour les hommes et les animaux et plus de fibres au cours du demi-siècle à venir que durant toute l'histoire de l'humanité. La génomique et la révolution technologique qui en résulte offrent la possibilité de parvenir à ce but. Les cultures transgéniques résistantes aux herbicides et aux insectes ont l'avantage de réduire les coûts des aliments tant pour les hommes que pour les animaux, ainsi que ceux des fibres, de diminuer la consommation de pesticides, de conserver les sols et de contribuer à la sauvegarde de l'environnement. Et contrairement à ce qu'en disent les critiques, il a été démontré que les cultures biotechnologiques sont largement aussi sûres que les cultures classiques. À l'avenir, les progrès de l'agrobiotechnologie produiront des cultures qui, entre autres caractéristiques souhaitables, toléreront mieux la sécheresse, la chaleur et le froid, exigeront moins d'engrais et de pesticides, et produiront des vaccins pour prévenir les grandes maladies contagieuses.

Richard Hamilton et Richard Flavell sont respectivement président-directeur général et directeur scientifique de Ceres, Inc., entreprise privée de biotechnologie. Robert Goldberg est professeur de biologie moléculaire à l'université de Californie de Los Angeles.

Les végétaux et l'agriculture jouent un rôle important dans le développement et le progrès de la civilisation. Les plantes sont une source durable de nourriture pour les êtres humains et les animaux, de fibres pour la construction et l'habillement, de produits pharmaceutiques et de médicaments, de parfums, de produits chimiques à usage industriel, d'énergie pour la cuisson des aliments et le chauffage et, usage plus récent, de biomasse pour répondre à la demande croissante de carburant pour le transport. Les plantes jouent également un rôle de premier plan dans l'environnement, en prévenant l'érosion des sols, en accroissant la teneur en oxygène de l'atmosphère, en absorbant une partie des émissions de gaz carbonique dues à la combustion des carburants fossiles et en enrichissant le sol par des apports d'azote.

L'AGRICULTURE AU XXI^e SIÈCLE

Si la croissance démographique se poursuit conformément aux prévisions, nous devons produire plus d'aliments et plus de fibres au cours du demi-siècle à venir que durant toute l'histoire de l'humanité. Et nous devons le faire sur une superficie de terres arables de plus en plus réduite.

Ceci présente plusieurs grands défis agricoles au XXI^e siècle :

- Afin de satisfaire la demande croissante et de préserver les espaces naturels Il faudra accroître les rendements des cultures au-delà des augmentations spectaculaires obtenues au XX^e siècle.
- Il faudra réduire les volumes d'intrants nécessaires à l'exploitation agricole intensive, tels que l'eau et les fertilisants.
- Il faudra mettre au point des végétaux capables de prospérer dans des conditions difficiles, de manière à pouvoir utiliser des terres de qualité inférieure pour produire des cultures importantes, à prolonger les saisons de croissance et à faire en sorte que les rendements ne soient pas affectés par la sécheresse, la chaleur, le froid et autres conditions difficiles.
- Il faudra réduire l'effet sur l'environnement des pesticides, des herbicides et des engrais utilisés dans l'agriculture. Ceci exigera, par exemple, la conception de cultures capables de résister aux parasites, d'absorber les nutriments du sol plus efficacement et de mieux utiliser l'eau et la lumière du soleil que les mauvaises herbes.
- Il faudra optimiser les cultures vivrières en fonction des besoins humains médicaux et nutritionnels de l'homme, pour assurer les apports essentiels de vitamines, d'acides aminés et de protéines et contribuer ainsi à éliminer la malnutrition et la maladie.
- Il faudra développer de nouvelles cultures énergétiques à haut rendement comme source de biomasse renouvelable pour nous fournir des carburants qui limiteront notre dépendance vis-à-vis du pétrole.
- Nous devons opérer un « retour vers le futur » et concevoir des cultures spécialisées pouvant être utilisées en tant qu'usines de produits chimiques et de protéines

destinées à diverses applications industrielles et médicales, pour produire, par exemple, des précurseurs de plastiques et des vaccins contre les pathogènes humains et animaux.

Ces défis exigent l'application des techniques de sélection et des techniques moléculaires les plus évoluées dont nous disposons actuellement, ainsi que le développement de nouvelles techniques. Toutefois, il n'y a jamais eu d'époque aussi passionnante pour la biologie végétale et l'agriculture, et la révolution technologique de l'ère génomique offre la possibilité de parvenir à ces buts au cours de deux décennies à venir, si ce n'est avant.

PRODUCTION DE NOUVELLES CULTURES GRÂCE À LA BIOTECHNOLOGIE

La plupart des plantes que nous cultivons aujourd'hui ne sont pas issues d'un jardin d'Éden mythique et ne poussent pas « naturellement ». Au contraire, la plupart des principales cultures ont été créées par nos ancêtres au fil des millénaires à partir de plantes sauvages en sélectionnant les caractéristiques particulièrement désirables pour l'homme. Ces premiers généticiens avaient appris à reconnaître les mutations fortuites survenues dans les populations de plantes sauvages et à exploiter cette variabilité génétique pour créer nos cultures vivrières d'aujourd'hui. Le maïs, par exemple, a été obtenu à partir du téosinte, une graminée sauvage, il y a 10 000 ans, en sélectionnant quelques gènes qui contrôlent la taille de la rafle, la disposition et le nombre des grains, et l'architecture du plant. La quasi-totalité des cultures actuelles, blé, soja, riz, pomme de terre, chou, brocoli et tomates, ont été créés de manière analogue, c'est-à-dire au moyen de techniques de reproduction sélective visant à produire de nouvelles combinaisons de gènes puis par la sélection des traits les plus désirables sur la descendance.

Les innovations les plus significatives qui transforment l'agriculture sont le génie génétique qui permet d'isoler, de manipuler et de réinsérer de nouveaux gènes dans les cultures vivrières; la capacité de régénérer pratiquement n'importe quelle espèce végétale à partir d'une culture tissulaire pour obtenir une plante fertile; et l'élaboration de techniques génomiques à haut débit. Ces dernières permettent de dresser la cartographie et de séquencer des génomes végétaux entiers et d'identifier les gènes qui contrôlent tous les processus végétaux, y inclus ceux qui peuvent contribuer à relever les défis agricoles de l'avenir, tels que les gènes qui déterminent la résistance aux maladies, la résistance à la sécheresse et la taille et le nombre des graines.



Comparaison dans le temps de tomates génétiquement modifiées pour résister à la moisissure et tomates ordinaires.

Volker Steger/Peter Arnold, Inc.

Au niveau génétique, la sélection de cultures se fonde sur l'introduction fortuite de mutations, appelée variabilité génétique, dans le génome d'une plante. On choisit ensuite, sur une vaste population, un sous-ensemble limité de changements qui se traduisent par une modification positive. Dans la vaste majorité des cas, les changements génétiques ainsi opérés sont inconnus. En revanche, le génie génétique offre une méthode plus précise et, de ce fait, permet de développer de nouveaux traits génétiques désirables en une fraction du temps qu'il faudrait pour le faire au moyen des techniques peu précises de la simple sélection. On peut ainsi introduire, de manière précise et ciblée, des gènes dont les caractéristiques ont été soigneusement étudiées dans des plantes cultivées pour produire des cultures nouvelles, génétiquement améliorées, possédant des caractéristiques impossibles à obtenir par la sélection classique.

DÉVELOPPEMENT ET AVANTAGES DES CULTURES BIOTECHNOLOGIQUES

Les premières cultures transgéniques développées au début des années 1980 étaient résistantes aux herbicides et aux insectes. Aujourd'hui, la majorité des cultures biotechnologiques présentent ces deux caractéristiques, la résistance aux herbicides et aux insectes. Au cours des vingt dernières années, on a assisté à un effort mondial visant à isoler les gènes qui produisent toute une série de caractéristiques désirables pour les éleveurs, les agriculteurs, les consommateurs et les industriels. La biotechnologie et le génie génétique sont aujourd'hui des activités majeures dans le secteur public et le secteur privé et commencent à jouer un rôle significatif dans la sélection végétale sur tous les continents. En fait, l'agriculture n'a jamais connu d'époque aussi



Betsy Blaney/AP/WWP

Champ de coton.

passionnante: en effet, les puissantes technologies génomiques actuelles permettent d'identifier des gènes qui sont susceptibles de révolutionner la production végétale au cours des cinquante prochaines années.

En 2005, nous fêtons dix ans de production de cultures transgéniques. Au cours de cette période, les cultures génétiquement améliorées se sont étendues sur une superficie de 400 millions d'hectares. Elles ont été adoptées par les agriculteurs du monde entier plus rapidement que n'importe quelle variété cultivée de toute l'histoire de l'agriculture, plus rapidement même que les maïs hybrides à haut rendement du siècle dernier. Depuis leur introduction en 1996, les cultures transgéniques se sont développées à un rythme de plus de 10 % par an et en 2004, selon un rapport de l'ISAAA (International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications), leur adoption a progressé de 20 %. Les principales cultures portant des gènes nouveaux issus de la biotechnologie sont le soja, le maïs, le coton et le canola; elles représentent respectivement 56 %, 14 %, 28 % et 19 % des superficies cultivées dans le monde. Dans leur ensemble, elles occupent près de 30 % de la superficie totale consacrée dans le monde à ces cultures. Aux États-Unis, le soja transgénique (résistant aux herbicides),

le maïs transgénique (résistant aux herbicides et aux insectes) et le coton transgénique (résistant aux herbicides et aux insectes) représentant respectivement environ 85 %, 75 % et 45 % des superficies totales consacrées dans le pays à ces cultures.

Les États-Unis sont le premier producteur de cultures transgéniques, avec plus de 48 millions d'hectares cultivés, suivis par l'Argentine (16 millions d'hectares), le Canada (6 millions d'hectares), le Brésil (4,8 millions d'hectares) et la Chine (4 millions d'hectares). La valeur de ces cultures est de près de 5 milliards de dollars, soit 15 % de la valeur de la production agricole mondiale et 16 % de la production semencière mondiale. Les cultures transgéniques ont l'avantage de réduire les coûts des aliments (humains et animaux) et des fibres, de diminuer la consommation de pesticides, de conserver les sols et de contribuer à la protection de l'environnement. En outre, selon des données récentes de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, elles ont produit une augmentation appréciable des revenus des agriculteurs pauvres des pays en développement. Ce sont ces agriculteurs, et non les fournisseurs de technologie, qui ont bénéficié de la majorité de la valeur ajoutée des cultures transgéniques.



Joerg Boethling

Plants de riz transgénique.

PRÉOCCUPATIONS LIMITANT L'EXPANSION DES CULTURES TRANSGÉNIQUES

Si les cultures issues de la biotechnologie et du génie génétique ont été adoptées à une vitesse record et sont les plus testées et les plus étudiées de l'histoire de l'humanité, l'agrobiotechnologie n'est pas exempte de controverses. L'opposition à la biotechnologie et aux organismes génétiquement modifiés est en grande partie concentrée en Europe, où des militants nombreux mais déterminés ont suscité une levée de boucliers au sein de l'opinion publique.



Scott Olson/Getty Images

Culture de divers maïs hybrides destinés à la production d'éthanol.

Dans un climat où des alertes alimentaires sans rapport avec la biotechnologie, par exemple la maladie de la vache folle et les dioxines, inquiètent le public européen et sapent sa confiance dans la valeur de la réglementation et de la supervision de la chaîne alimentaire, des associations sont parvenues à inspirer une méfiance considérable à l'égard de la biotechnologie agricole. Cette méfiance n'est pas justifiée : après plus de 10 ans de consommation sans problèmes et la mise en culture de plus de 400 millions d'hectares de terres produisant des variétés génétiquement améliorées, les craintes hypothétiques ne se sont pas matérialisées. Il n'y a pas d'exemples connus d'effets nocifs de ces cultures chez l'homme, et leurs avantages pour l'environnement sont démontrables. En fait, d'importantes études, qui ont été publiées ces cinq dernières années dans des revues fiables et impartiales, indiquent que les cultures transgéniques sont essentiellement équivalentes à leurs homologues non transgéniques, que les rendements ont augmenté, que les applications de pesticides ont diminué, que des surfaces considérables de terres ont été préservées et que les bonnes pratiques de gestion ont permis de prévenir ou de minimiser la résistance de certains insectes aux cultures résistantes aux insectes. Certes aucune technologie n'est totalement exempte de risques, mais il a été démontré que la sécurité des cultures transgéniques était égale ou supérieure à celle des cultures classiques.

QUE NOUS RÉSERVE L'AVENIR ?

Au cours de la prochaine décennie, l'agrobiotechnologie continuera d'enregistrer des progrès et de produire des cultures qui ont une tolérance accrue à la sécheresse, à la chaleur et au froid, qui exigent moins d'engrais et de pesticides, qui produisent des vaccins afin de prévenir les grandes maladies contagieuses, qui

possèdent des graines plus grosses, plus nombreuses et un contenu nutritionnel supérieur, et qui sont capables de se régénérer en l'absence de fertilisation, du fait de la vigueur des hybrides. On produira également des cultures vivrières améliorées pour lutter contre la malnutrition dans le monde en développement. À l'heure actuelle, selon un article récent de Jacqueline Paine et d'autres auteurs, des cultivars du « riz doré 2 » en cours d'essais de plein champ n'apportent pas moins de 30 microgrammes de bêta-carotène, précurseur de la vitamine A. Une portion de 60 grammes de ce riz devrait apporter au moins 50 % de la dose quotidienne recommandée de vitamine A pour les enfants.

En sus de sa capacité d'accroître la production d'aliments et de fibres, la biotechnologie effectue des contributions substantielles dans le domaine de l'énergie. Les progrès de la biotechnologie ont permis de produire de grandes quantités de cellulases peu coûteuses servant à convertir la cellulose en sucres simples qui peuvent à leur tour, par fermentation, produire du carburant tel que l'éthanol. Des estimations récentes du ministère de l'énergie des États-Unis indiquent que, d'ici à 2020, 30 % au moins des carburants de transport du pays pourraient provenir de la biomasse. L'agrobiotechnologie pourrait encore accroître cette proportion en augmentant le rendement de la biomasse, en améliorant les caractéristiques de traitement de la biomasse utilisée et en réduisant les besoins d'intrants agricoles tels que l'eau, les engrais et les pesticides.

Plusieurs pays clés, notamment les États-Unis et la Chine, sont particulièrement actifs dans le domaine de l'agrobiotechnologie ; ils effectuent les investissements nécessaires dans la recherche et le développement, et se dotent des systèmes de réglementation requis aux fins de l'introduction et de la commercialisation des nouvelles cultures transgéniques.

Si nous voulons créer, au XXI^e siècle, une nouvelle forme d'agriculture qui soit à la fois durable, productive et capable d'assurer la sécurité alimentaire et l'autosuffisance énergétique, nous devons faire usage de toutes les innovations et de tous les instruments scientifiques disponibles, notamment de la biotechnologie et du génie génétique, et poursuivre notre cheminement sur la voie des découvertes ininterrompues sur laquelle sont engagées les sciences agricoles qui font progresser l'humanité depuis des millénaires. ■

Les opinions exprimées dans le présent article ne reflètent pas nécessairement les vues ni les politiques du gouvernement des États-Unis.

INSECTES GÉNÉTIQUEMENT MODIFIÉS

Après les cures et les aliments miracles, les insectes génétiquement modifiés suscitent un intérêt indéniable dans la communauté scientifique en tant que prochain « miracle » de la biotechnologie. Un emploi efficace de ces insectes pourrait, selon certains scientifiques, améliorer de façon spectaculaire la santé publique, en particulier dans les pays en développement, accroître la production agricole et améliorer l'environnement naturel. Il pourrait également amener les gens à y réfléchir à deux fois avant d'écraser un moustique qui se serait posé sur leur cou, car il pourrait bien être un agent de lutte, et non de propagation, de maladies.

On distingue deux types d'insectes génétiquement modifiés qui font actuellement l'objet de recherches : les insectes paratransgéniques et les insectes transgéniques. Les premiers sont créés en introduisant un fragment d'ADN manipulé en laboratoire (dit transgène) dans les microbes présents naturellement dans l'appareil digestif des insectes. Les gènes exprimés dans ces microbes peuvent modifier les caractéristiques de l'insecte hôte. Les seconds, les insectes transgéniques, sont le produit de l'introduction physique de transgènes dans les chromosomes de l'insecte.

Pour que la modification génétique d'un insecte se transmette aussi à ses descendants, il faut que l'intégration initiale du transgène ait lieu dans les chromosomes des cellules qui produiront le sperme ou les ovules (la reproduction est sexuée chez la plupart des insectes). Les insectes génétiquement modifiés doivent avoir des caractéristiques facilement visibles pour que les chercheurs ou les utilisateurs puissent les repérer facilement pendant les recherches, pour séparer les mâles des, par exemple.

Les scientifiques s'efforcent de produire toute une gamme d'insectes possédant de nouvelles caractéristiques qui les rendraient utiles dans la lutte contre la propagation de maladies infectieuses, des mauvaises herbes et des insectes nuisibles, et dans la fabrication de produits pharmaceutiques. Les abeilles, par exemple, peuvent être génétiquement modifiées pour accroître leur résistance aux maladies et aux parasites ; les vers à soie génétiquement modifiés peuvent produire des protéines industrielles utilisables pour créer de nouveaux matériaux.

Mais quelle que soit la productivité potentielle de ces abeilles et de ces vers à soie, les insectes génétiquement modifiés les plus intéressants sont ceux qui pourront peut-être sauver des vies humaines. Selon l'Organisation mondiale de la santé, les moustiques propagent le paludisme, qui infecte de 300 à 500 millions de personnes et en tue 1 million chaque année. Les pesticides chimiques utilisés actuellement ont des effets nocifs sur la santé humaine et l'environnement. En outre, l'émergence d'insectes résistants à de nombreux pesticides réduit l'efficacité de ce moyen de lutte.

Les moustiques génétiquement modifiés promettent



AP/WWP/USDA

d'apporter une solution propre et radicale au problème du paludisme. Les scientifiques cherchent à modifier les moustiques mâles pour les élever, les stériliser et les lâcher dans la nature où ils s'accoupleront avec des moustiques femelles. En faussant ainsi le mécanisme de la reproduction, on aboutirait à l'éradication ou tout au moins à une réduction considérable de la population naturelle de moustiques.

Une autre approche consiste à infiltrer des gènes pour accroître la résistance au paludisme chez ces insectes. Pratiquée suffisamment fréquemment, cette infiltration pourrait freiner la transmission de la maladie, dit Anthony James, professeur de biologie et de chimie biologique à l'université de Californie d'Irvine.

Les premiers essais en champs confinés ont déjà eu lieu et certains projets devraient parvenir au stade des lâchers inondatifs d'ici trois à cinq ans. Mais nous sommes loin de voir apparaître des nuées d'insectes génétiquement modifiés. Selon Luke Alphey du département de zoologie de l'université d'Oxford, divers obstacles technologiques et autres s'opposent à ce que les chercheurs et les entreprises commerciales procèdent à des lâchers d'insectes transgéniques de grande envergure dans les 5 ou 10 ans à venir sinon davantage.

Chercheurs et organismes de réglementation doivent également faire face à l'incertitude quant aux effets possibles de ces insectes sur les écosystèmes, la santé publique et la sécurité alimentaire. En outre, le fait que les insectes ne s'arrêtent pas aux frontières internationales pose en matière de réglementation des défis que ne présentent pas les cultures transgéniques. Les États-Unis, de même que beaucoup d'autres pays, ne possèdent actuellement pas de politique générale sur les modalités d'examen des insectes transgéniques et les organisations internationales n'ont pas encore engagé le processus de réglementation approprié à ce niveau. Ceci a amené la Pew Initiative on Food and Biotechnology à conclure dans un rapport de 2004 que la recherche risquait de prendre de vitesse la préparation de la réglementation. Le rapport signale que si les autorités publiques et les scientifiques souhaitent mettre en place un ensemble de règles clairement définies avant les essais en champs non confinés, c'est dès à présent qu'ils doivent entamer les discussions. ■

Source : Adaptation de documents produits par la Pew Initiative on Food and Biotechnology, notamment de communications de la conférence de septembre 2004 sur les insectes génétiquement modifiés.

CONCEVOIR DE NOUVEAUX MATÉRIAUX ET DES MACHINES MOLÉCULAIRES

Shuguang Zhang

En imitant la nature, les chercheurs conçoivent des structures moléculaires radicalement nouvelles qui peuvent servir d'épures à la production de nouveaux matériaux et de machines moléculaires sophistiquées. Dans le domaine naissant de la nanotechnologie, ils emploient des éléments constitutifs naturels fondamentaux tels que les acides aminés pour produire des structures telles que des peptides et des protéines en vue d'applications médicales et énergétiques. Les biologistes spécialistes de la nanotechnologie ont commencé à exploiter les possibilités d'autoassemblage des molécules comme instrument de fabrication de nouvelles nanostructures biologiques telles que les nanotubes pour le coulage de métaux, les nanovésicules pour l'encapsulation de médicaments et les réseaux de nanofibres pour la régénérescence tissulaire. Ils ont également construit des photosystèmes nanoscopiques à extrêmement haute densité et des machines moléculaires ultralégères qui captent l'énergie solaire. Une meilleure compréhension de ces phénomènes apparemment inexplicables semble présenter certaines difficultés, pourrait permettre, un jour, grâce à des nanodispositifs, de réparer divers organes ou de rajeunir la peau, d'accroître les capacités humaines, d'exploiter l'énergie solaire inépuisable et de réaliser divers accomplissements considérés aujourd'hui comme impossibles.

Shuguang Zhang est directeur associé du Centre de l'ingénierie biomédicale de l'Institut de technologie du Massachusetts.

Il y a environ 10 000 ans, les hommes ont commencé à domestiquer les végétaux et les animaux. Il est temps, à présent, de domestiquer les molécules.

Susan Lindquist, Institut Whitehead de recherche biomédicale, Institut de technologie du Massachusetts

La biotechnologie, connue principalement pour ses applications médicales et agricoles, se concentre de plus en plus sur la confection de nouveaux matériaux et de machines biologiques aux structures, fonctions et destinations d'une étonnante diversité, et l'avènement de la nanotechnologie est venu accélérer cette tendance. Tirant des enseignements de la nature

qui, au fil de milliards d'années a affiné et façonné des structures moléculaires pour leur permettre d'exécuter une multitude de tâches, les nanobiotechnologues conçoivent aujourd'hui des motifs moléculaires entièrement nouveaux, élaborés de toutes pièces, composante par composante, pour produire de nouveaux matériaux et des machines moléculaires sophistiquées. Nous assisterons, dans les années à venir, à des progrès tels que l'emploi de nouveaux matériaux pour réparer les lésions tissulaires et des machines moléculaires permettant d'exploiter l'énergie solaire grâce aux molécules d'acides aminés et de lipides les plus petites possible, qui auront selon toute vraisemblance d'immenses répercussions sur notre société et sur l'économie mondiale.

Nous devons déjà à la biotechnologie moderne tout un éventail de produits utiles, tels que l'insuline humaine et de nouveaux vaccins, mais nous évoluons vers des découvertes encore plus révolutionnaires. C'est pourquoi les pays, grands et petits, et les entreprises industrielles locales et internationales s'efforcent de plus en plus d'attirer les compétences biotechnologiques et les investissements dans ce domaine. Il est incontestable que la biotechnologie, avec l'aide des outils de la nanoscience, se développe à un rythme accéléré et que le meilleur est encore à venir.

imiter la nature

La nature est passée maître lorsqu'il s'agit d'élaborer des matériaux et de construire des machines moléculaires extraordinaires, atome par atome, molécule par molécule. Coquillages, perles, coraux, os, dents, bois, soie, corne, collagène, fibres musculaires et matrices extracellulaires ne sont que quelques exemples de matériaux naturels. Les assemblages moléculaires multifonctionnels, tels que l'hémoglobine, les polymérases et les canaux membranaires, sont tous essentiellement des machines moléculaires de remarquable conception.

Au fil de milliards d'années de sélection et d'évolution moléculaire, la nature a produit un ensemble d'éléments constitutifs de base comprenant 20 acides aminés, quelques nucléotides – qui sont les unités

de construction des acides nucléiques tels que l'acide ribonucléique (ARN) et l'acide désoxyribonucléique (ADN) – une douzaine environ de molécules lipidiques et une bonne vingtaine de sucres. À partir de ces éléments constitutifs apparemment simples, les processus naturels façonnent toute une gamme d'unités de fabrication d'une extraordinaire diversité capables elles-mêmes de s'auto-organiser en structures, matériaux et machines moléculaires raffinés qui sont non seulement dotés d'une précision, d'une flexibilité et de capacités remarquables de correction d'erreurs, mais qui s'entretiennent eux-mêmes et qui évoluent. Il en est ainsi par exemple des systèmes de photosynthèse de certaines bactéries et de toutes les plantes vertes qui absorbent la lumière du soleil pour la convertir en énergie chimique; lorsque la quantité de lumière se réduit, en eau profonde, par exemple, les systèmes de photosynthèse doivent évoluer pour recueillir la lumière de façon plus efficace.

Au début des années 1990, les biotechnologues sont parvenus à manipuler les éléments constitutifs naturels de dimensions comprises entre un nanomètre (un milliardième de mètre) et 100 nanomètres pour fabriquer



CGhim Wei Ho/Mark Welland, Nanostructure Center, Université de Cambridge

Nanomatérial tridimensionnel produit à partir de minuscules gouttelettes de métal liquide déposées sur une surface de silicium.

de nouvelles structures moléculaires, marquant ainsi l'entrée de la science et de la technologie dans l'ère des matériaux moléculaires de synthèse. À l'instar de l'argile et de l'eau que l'on peut combiner pour produire des briques à multiples usages, qui peuvent être employées à leur tour pour construire des ouvrages tels que la

Grande muraille de Chine, des maisons ou des routes, les éléments constitutifs naturels peuvent servir à créer des structures, telles que les peptides et les protéines, qui peuvent être utilisées à diverses fins. C'est ainsi, par exemple, que les animaux ont une peau qui produit du pelage pour éviter la déperdition de chaleur, que les coquillages ont des coquilles pour protéger leurs tissus, que les araignées tissent du fil pour attraper des insectes et que nos cellules produisent de grandes quantités de collagènes qui assurent leur cohésion pour former les tissus et les organes.

Si nous réduisons la taille des unités de construction un milliard de fois pour arriver à l'échelle du nanomètre, nous pouvons construire des matériaux et des machines moléculaires de façon analogue au processus de construction des maisons à partir d'éléments préfabriqués.

Les peptides formés par les aminoacides sont des unités moléculaires architecturales qui s'avèrent très utiles pour le développement de nouveaux matériaux nanobiologiques. Dans l'eau et les fluides corporels, ces peptides forment des charpentes bien ordonnées de nanofibres utiles pour la croissance tissulaire tridimensionnelle et pour la médecine régénératrice. Les chercheurs ont pu ainsi fabriquer du cartilage et de l'os artificiels pour remplacer les tissus endommagés en se servant de réseaux biologiques et de cellules. Ils ont également démontré que les nanofibres peptidiques de synthèse qui s'autoassemblent peuvent stopper les hémorragies instantanément, propriété utile en chirurgie. Les nouveaux peptides s'avèrent d'une remarquable utilité pour l'acheminement de médicaments, de protéines et de gènes, car ils encapsulent certains médicaments insolubles dans l'eau et les véhiculent jusqu'à l'intérieur des cellules ou en divers points de l'organisme. Ils sont aussi essentiels aux fins de la fabrication de machines moléculaires qui produisent de l'énergie à partir de la lumière du soleil en se servant du système de photosynthèse des feuilles d'épinards et de feuilles d'arbres.

AUTOASSEMBLAGE MOLÉCULAIRE

Toutes les biomolécules, notamment les peptides et les protéines, interagissent et s'auto-organisent naturellement pour former des structures bien définies dotées de fonctions précises. En observant les processus naturels d'assemblage des structures moléculaires biologiques, les nanobiotechnologues ont commencé à exploiter les possibilités d'autoassemblage des molécules en tant qu'instrument de fabrication de nouvelles nanostructures biologiques telles que des

nanotubes pour le coulage de métaux, des nanovésicules pour l'encapsulation de médicaments et les réseaux de nanofibres pour la régénéscence tissulaire.

Dans l'autoassemblage moléculaire, les liaisons sont généralement faible intensité, comparables à un serrement de mains : elles peuvent se faire et se défaire rapidement, contrairement aux liaisons de forte intensité telles que celles qui attachent nos bras à notre corps. Considérées individuellement, les liaisons moléculaires faibles, telles que la liaison hydrogène (ou polaire) et la liaison ionique, sont d'une force insignifiante, mais elles jouent collectivement un rôle indispensable dans toutes les structures et dans leurs interactions. La liaison hydrogène, dans laquelle de nombreuses molécules d'eau établissent

un pont pour relier deux éléments distincts, est d'une importance particulière pour les systèmes biologiques, car tous les matériaux biologiques interagissent avec l'eau. Cette liaison, présente dans tous les collagènes, a pour effet d'accroître l'humidité pendant une durée prolongée.

Quant aux éléments constitutifs moléculaires, les peptides de synthèse ressemblent aux pièces du jeu de Lego, avec leurs embouts et leurs trous disposés de manière précise, qui peuvent s'assembler pour former des structures déterminées. Souvent appelées « peptides Lego », ces nouvelles pièces moléculaires s'imbriquent spontanément, dans certaines conditions, pour former des nanostructures.

Dans l'eau, les molécules de peptides Lego s'autoassemblent pour former des nanofibres bien ordonnées, qui s'assemblent elles-mêmes pour former des réseaux. L'un de ces matériaux à nanofibres réticulées, disponible dans le commerce, est le PuraMatrix™, ainsi

dénommé en raison de sa pureté en tant que matrice de synthèse biotechnologique. Les chercheurs l'emploient actuellement dans le monde entier en biomédecine pour étudier les cellules cancéreuses et les cellules souches, ainsi que pour réparer le tissu osseux.

Étant donné que ces structures de nanofibres possèdent des pores de 5 à 200 nanomètres et qu'elles ont une teneur en eau extrêmement élevée, elles sont d'une utilité potentielle dans l'élaboration de cellules tridimensionnelles, dans la croissance tissulaire et en médecine régénérative. En outre, les dimensions réduites de leurs pores autorisent une libération lente de médicaments, ce qui évite aux patients des prises multiples, une seule étant suffisante pour une période beaucoup plus longue: on peut implanter dans

la peau une telle nanostructure chargée d'une dose de médicament qui est libérée lentement dans l'organisme pendant des mois, voire des années.

CRÉER PLUS D'ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DE BASE

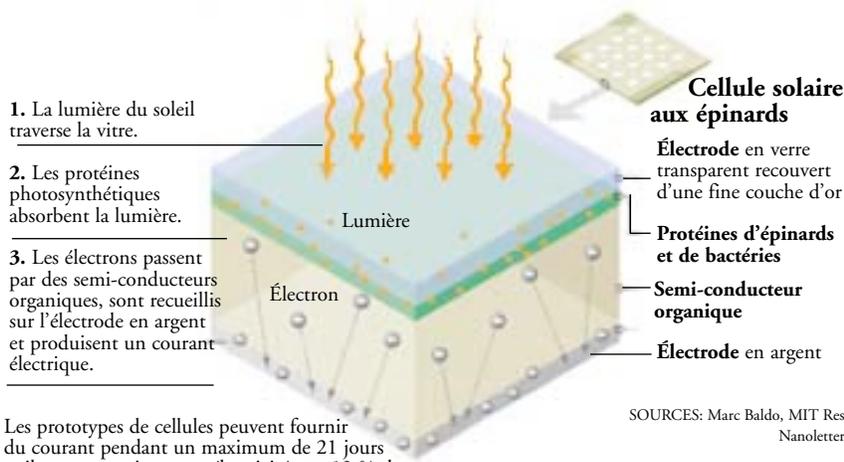
En se servant des lipides naturels comme modèle, les chercheurs ont produit une nouvelle catégorie de peptides

détergents comparables aux lipides. Ces peptides possèdent sept ou huit aminoacides, ce qui leur donne une longueur analogue à celle des lipides naturels, qui constituent des parois cellulaires dont l'épaisseur est d'un vingt millièème du diamètre d'un cheveu.

Les peptides détergents analogues aux lipides produisent des structures remarquablement complexes et dynamiques selon le même processus d'assemblage qui, à partir de multiples éléments simples, permet d'élaborer un grand nombre d'édifices architecturaux de formes différentes.

Capter l'énergie solaire grâce aux épinards

Des chercheurs ont fabriqué une cellule solaire qui emploie des protéines végétales pour convertir la lumière du soleil en énergie électrique.



Les prototypes de cellules peuvent fournir du courant pendant un maximum de 21 jours et ils ne convertissent en électricité que 12 % de la lumière absorbée. La plupart des cellules solaires classiques ont une efficacité de 20 à 30 %.

Figure 1. Puce aux épinards et machine moléculaire captrice d'énergie solaire. Les photons (provenant du soleil ou d'une autre source de lumière) peuvent être convertis directement en électricité au moyen d'une combinaison d'un système de photosynthèse naturelle des plantes vertes, d'un matériau semi-conducteur au carbone C60 et d'électrodes en or et en argent.

Avec l'aimable autorisation du Boston Globe

Certains peptides détergents se sont avérés d'une grande efficacité pour la stabilisation, particulièrement difficile, des protéines membranaires (molécules de protéines attachées ou associées aux membranes des cellules), ouvrant ainsi des perspectives prometteuses en vue de la résolution d'un problème majeur en biologie : l'obtention d'images claires des protéines membranaires omniprésentes.

De nombreux médicaments agissent par l'intermédiaire des protéines membranaires, mais leurs mécanismes d'interaction avec ces protéines au niveau moléculaire sont toujours essentiellement inconnus à l'heure actuelle. Les peptides détergents de synthèse ouvrent ici des possibilités et peuvent nous aider à élucider les interactions médicaments-protéines membranaires et donc à produire des médicaments plus efficaces et à réduire ou à éliminer leurs effets adverses.

EXPLOITER L'ÉNERGIE SOLAIRE

L'étude détaillée du fonctionnement des protéines membranaires au niveau moléculaire n'est qu'un exercice visant à les comprendre. En approfondissant nos connaissances des modalités de communication des cellules avec leur environnement, nous acquerrons aussi des connaissances sur les réactions de tous les systèmes biologiques à leur environnement. Forts de ce savoir, les nanobiologistes ont commencé à fabriquer des machines moléculaires perfectionnées capables d'élaborer des capteurs extrêmement sensibles pour la détection médicale ou pour l'exploitation de l'énergie solaire. Dans le passé, les médecins chinois sentaient leurs patients pour diagnostiquer leurs affections, car ils croyaient que la maladie pouvait modifier les odeurs ou les sécrétions corporelles. En médecine moderne, on utilise un certain nombre d'instruments pour faire un diagnostic précis. À l'avenir, un capteur olfactif aussi sensible que le nez d'un chien pourrait aider à distinguer les personnes malades et celles qui sont en bonne santé. Au Royaume-Uni, des chiens ont déjà démontré leur capacité de repérer les gens atteints d'un cancer en reniflant leur odeur.

Une source d'énergie abordable, durable et respectueuse de l'environnement est, nul n'en disconvient, indispensable à notre civilisation moderne. Du fait des dégâts environnementaux causés par la pollution résultant de l'emploi des carburants fossiles et de la demande croissante d'énergie à l'échelle planétaire, les problèmes d'énergie sont plus urgents aujourd'hui que jamais. Les solutions de substitution, dont on débat depuis des lustres, mais qui sont rarement envisagées

sérieusement, font actuellement l'objet d'un intérêt soutenu par un sentiment d'urgence.

Par ailleurs, la mobilité croissante de l'informatique et des communications et l'ultraminiaturisation des matériaux et des machines moléculaires exigent le développement de sources d'énergie de faible encombrement, légères et capables de s'autoentretenir. Une source évidente d'énergie inépuisable est le soleil. La nature a produit un système efficace de conversion des photons en électrons, puis en énergie chimique, mécanisme que les plantes vertes ainsi que d'autres organismes biologiques utilisent depuis des milliards d'années.

La majeure partie de l'énergie disponible sur terre est obtenue par photosynthèse, au moyen de photosystèmes, qui sont les mécanismes les plus efficaces de recueil de l'énergie. Si nous trouvons un moyen d'exploiter l'énergie produite par les photosystèmes naturels, nous disposerons d'une source d'énergie propre et pratiquement inépuisable.

S'inspirant des photosystèmes des bactéries et des plantes vertes, les nanobiotechnologues ont démontré qu'il était possible de convertir les photons directement en électrons au moyen de nouvelles machines moléculaires biosolaires. Par une combinaison d'ingénierie de précision et d'ingénierie biologique, ils ont construit des photosystèmes nanoscopiques à densité extrêmement élevée et des machines moléculaires ultralégères qui captent l'énergie solaire.

Il faut deux composantes pour fabriquer une machine moléculaire qui capte l'énergie solaire : un système de production d'énergie biosolaire (photosystème) à partir de feuilles de plantes vertes, et des peptides détergents de synthèse. Pour la production d'énergie biosolaire, les chercheurs ont utilisé un photosystème simple. Ils ont commencé par purifier le système de photosynthèse des épinards et ils sont parvenus récemment à purifier celui de l'érable, du pin et du chêne, ainsi que celui des feuilles de bambou. Le photosystème complet, d'une taille de 20 nanomètres seulement, a été placé sur une plaquette recouverte d'or.

Les expériences se poursuivent pour trouver le moyen d'accroître la quantité d'énergie produite et la durée de production de cette nouvelle machine moléculaire du plus haut intérêt (figure 1).

QUE POUVONS-NOUS ATTENDRE ?

La poursuite du développement des nanomatériaux et des machines moléculaires viendra accroître nos

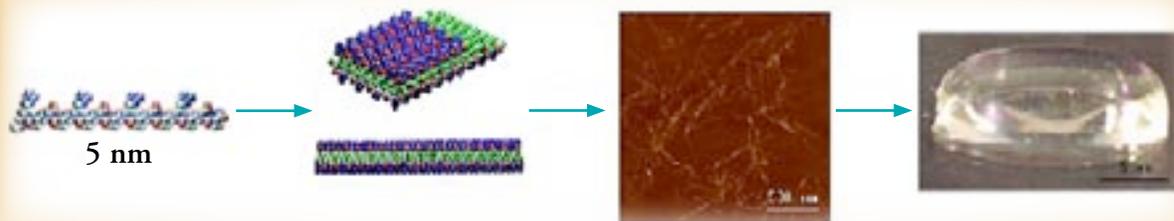
connaissances et notre compréhension de phénomènes apparemment inexplicables. La nanoingénierie, sous forme de conception moléculaire de peptides autoassembleurs, est une technologie porteuse qui est appelée à jouer un rôle de plus en plus important dans le domaine de la biologie et à changer notre vie dans les décennies à venir. C'est ainsi, par exemple, que les tissus lésés et vieillissants pourront être remplacés au moyen de réseaux qui stimulent les cellules pour réparer divers organes, par exemple la peau. Il nous sera peut-être donné de nager et de plonger comme des dauphins ou d'escalader des montagnes avec un nanodispositif porteur d'oxygène qui nous permettra de mieux respirer en altitude. Nous verrons peut-être, la chose n'est pas inconcevable, des automobiles et des maisons peintes avec des machines moléculaires capables de photosynthèse qui permettront, à tous les habitants de notre planète et pas seulement pour quelques privilégiés, d'exploiter l'énergie solaire illimitée.

Nous sommes au début d'un long voyage durant lequel nous ferons un grand nombre de découvertes inattendues. Si les nanotechnologues ont encore de multiples défis à relever, ils s'emploieront activement à résoudre les nombreux problèmes liés à la fabrication moléculaire de matériaux composites et de machines moléculaires. Les peptides autoassembleurs peuvent être considérés comme les éléments constitutifs de matériaux nouveaux et des futures machines moléculaires de synthèse. Ils peuvent également être combinés à d'autres éléments constitutifs fondamentaux tels que les sucres, les lipides, les acides nucléiques et de nombreux cristaux métalliques. La nature nous a inspirés et nous a ouvert les portes sur ses secrets. À nous maintenant de faire usage de notre imagination pour faire fond sur ses matériaux et ses machines moléculaires et pour en poursuivre le développement. ■

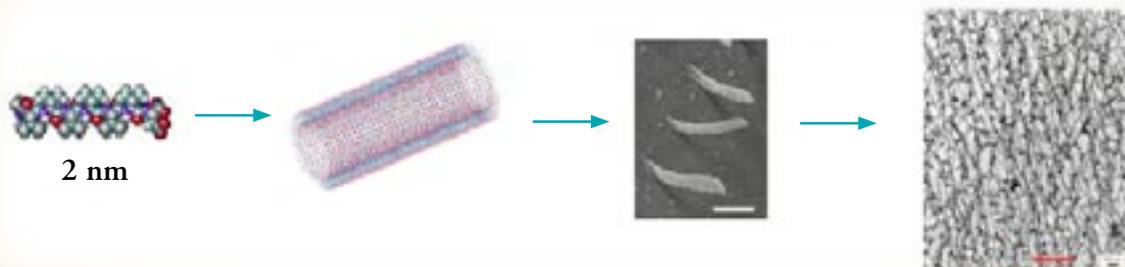
Les opinions exprimées dans le présent article ne reflètent pas nécessairement les vues ni les politiques du gouvernement des États-Unis.

Exemples de nouveaux matériaux issus de la nanobiotechnologie

Peptide Lego



Peptides détergents



Encre peptidique



Le peptide Lego, également dit peptide ionique autocomplémentaire, possède 16 aminoacides, d'environ cinq nanomètres de long. Les molécules de ce peptide forment des réseaux de nanofibres qui peuvent servir à l'étude des cellules cancéreuses et des cellules souches, ainsi qu'à favoriser la régénération des tissus osseux. Les peptides détergents, d'environ deux nanomètres, peuvent s'autoassembler en nanotubes et en nanovésicules d'un diamètre de 30 à 50 nanomètres. Ces nanotubes forment ensuite des réseaux interconnectés qui peuvent servir à la mise au point de médicaments plus efficaces et aux effets secondaires réduits. L'encre peptidique, d'environ quatre nanomètres, peut être utilisée dans une imprimante à jet d'encre pour imprimer directement n'importe quelle forme sur une surface. Comme l'encre bleue et l'encre rouge, elle modifie instantanément les propriétés de la surface et permet aux cellules de s'y fixer. Elle peut être utilisée pour produire des capteurs cellulaires et des revêtements pour implants médicaux. Lorsque l'on applique de l'encre peptidique selon un certain tracé sur le substrat, on peut y fixer, comme illustré ici, des cellules neurales de rat pour former les initiales M.I.T.

LA NANOTECHNOLOGIE AUJOURD'HUI ET DEMAIN

Akhlesh Lakhtakia

«Penser petit et rêver grand». Ce slogan illustre bien la promesse dont est porteuse la nanotechnologie et les espoirs qu'elle suscite au sein de la communauté scientifique. Relevant jadis de la pure fiction, la nanotechnologie est de plus en plus associée aux progrès réalisés en biotechnologie et en technologies de l'information. Les dépenses annuelles consacrées à la recherche dans ce domaine se chiffrent aux États-Unis à plus de 2,6 milliards de dollars en 2004 (estimation), le préfixe « nano » a fait son entrée dans la culture populaire, des horoscopes quotidiens jusqu'aux dessins humoristiques de journaux.

Toutefois, vu le nombre relativement faible d'applications qui sont arrivées au stade de l'emploi industriel, il s'agit là de « progrès « évolutionnaires » plus que révolutionnaires », note le rapport rédigé en 2004 par un groupe d'experts de la Royal Society of London et de la Royal Academy of Engineering.

La nanotechnologie n'est pas un processus unique et elle ne concerne pas non plus un type de matériau précis. En fait, le terme de nanotechnologie recouvre tous les aspects de la production de dispositifs et de systèmes ayant recours à la manipulation de la matière à l'échelle du nanomètre.

Prenez un fil d'un centimètre de long et coupez-le en 10. Coupez ensuite l'un de ces morceaux en un million et vous obtiendrez des fils d'environ un nanomètre de long. De nombreux établissements de recherche, tant dans l'enseignement que dans l'industrie, sont capables de manipuler la matière à cette échelle. Selon la définition de la « nanoéchelle » donnée par le Conseil national de la recherche des États-Unis, l'une des dimensions, au moins, du matériau concerné doit se situer entre 1 et 100 nanomètres. Les revêtements ultraminces ont une dimension à cette échelle ;

les nanofils et nanotubes en ont deux et les trois dimensions des nanoparticules sont à la nanoéchelle.

On distingue trois catégories de nanotechnologie. L'utilisation industrielle de nanoparticules dans les peintures pour automobiles et les cosmétiques relève de la nanotechnologie dite incrémentielle. Les

nanocapteurs qui exploitent la fluorescence de disques appelés « points quantiques » (de 2 à 10 nanomètres de diamètre) et les propriétés électriques des nanotubes de carbone (de 1 à 100 nanomètres de diamètre) appartiennent à la nanotechnologie « évolutionnaire », mais ils en sont encore au stade embryonnaire. La nanotechnologie radicale, celle des romans de science-fiction, n'apparaît nulle part à l'horizon technologique.

Les propriétés des matériaux sont différentes à la nanoéchelle du fait des

dimensions extrêmement élevées des surfaces par rapport au volume unitaire. Les effets quantiques interviennent également à cette échelle. Ces propriétés et ces effets devraient transformer les pratiques actuelles dans les domaines de l'électronique intégrée, de l'optoélectronique et de la médecine. Mais le passage du laboratoire à la production industrielle se heurte à des obstacles considérables, et la manipulation fiable de la matière à la nanoéchelle reste très difficile à mettre en œuvre de manière économiquement rentable. On dispose en outre de très peu de données sur les dangers de la nanotechnologie.

La nanotechnologie est en train de naître à un stade crucial de notre civilisation, où s'esquisse une intégration de la nanotechnologie, de la biotechnologie et de la technologie de l'information. Leur symbiose présente des perspectives extrêmement positives, telles, notamment, que de nouveaux traitements médicaux tant préventifs que curatifs, des systèmes de surveillance



pour les bâtiments, les barrages, les navires, les aéronefs et autres structures exposées aux calamités naturelles et aux actes de terrorisme, et des systèmes de production à haut rendement énergétique produisant très peu de déchets.

Ces trois technologies sont appelées à converger. On est actuellement en train de développer des molécules de protéines telles que la kinésine, pour transporter un chargement d'autres molécules sur des distances de l'ordre d'un millimètre, en vue de leur utilisation dans des systèmes de nanocapteurs intelligents et de systèmes moléculaires de production. Cellules, bactéries et virus sont utilisés pour produire des matrices complexes afin de faire précipiter des molécules utiles sans dégager de molécules indésirables dans des usines pharmaceutiques. On a également recours à la nanotechnologie pour fabriquer des labopuces en vue d'analyser certains fluides biologiques, avec possibilité d'accès optique, de stockage et de traitement électronique des données. Les nanosystèmes de vectorisation de médicaments seront implantés dans les organismes vivants pour modifier certaines fonctions biologiques, afin d'induire ou de renforcer l'immunité à certains pathogènes déterminés, par exemple.

Cette convergence vient renforcer l'urgence de la mise en place de meilleurs mécanismes de réglementation et de surveillance. Étant donné que la plupart des travaux sont menés dans le secteur public, il faut accorder un droit de regard renforcé aux groupes de particuliers et aux organisations non gouvernementales à fonction de chien de garde, ainsi qu'aux groupes scientifiques du secteur privé. Il faut parallèlement élaborer des lois pour guider la conduite des personnes chargées des programmes gouvernementaux et des entrepreneurs privés dans le domaine de la nanotechnologie.

La nanotechnologie en est sans doute parvenue aujourd'hui au stade où était Mozart à l'âge de cinq ans : porteuse d'immenses promesses et en passe de donner ce qu'elle a de meilleur après quelques années d'orientation et de soins nourriciers. ■

Akhlesh Lakhtakia est professeur d'ingénierie et de mécanique à l'université d'État de la Pennsylvanie.

Les opinions exprimées dans le présent article ne reflètent pas nécessairement les vues ni les politiques du gouvernement des États-Unis.

LE PROJET INTERNATIONAL DE SÉQUENÇAGE DU GÉNOME DU RIZ

Étude de cas

C. Robin Buell



Peter Beyer/Université de Fribourg

Riz doré et riz blanc ordinaire.

Ce qui, au départ, était un projet de recherche japonais est devenu une entreprise de recherche internationale qui a fourni un outil clé pour progresser vers une seconde « révolution verte ». En faisant intervenir des chercheurs et des ressources de nombreux pays, le Projet international de séquençage du génome du riz (IRGSP) a dressé, en 2005, une « carte » de la composition génétique du riz. Cette carte permettra aux phytogénéticiens d'accélérer leurs programmes de reproduction et de mettre au point des variétés de riz plus robustes et aux agriculteurs d'améliorer leurs méthodes culturales et de prolonger la saison des cultures. En outre, les scientifiques ont pu utiliser le génome complet du riz pour faire progresser leur étude d'autres céréales.

C. Robin Buell est chercheur associé à l'Institut de recherche génomique et a participé à l'IRGSP.

Selon un ancien proverbe chinois, « les objets précieux ne sont ni les perles ni le jade mais les cinq céréales, le riz étant la plus parfaite de toutes ». En effet, si on se base sur la consommation mondiale quotidienne, le riz est plus précieux que les perles : environ la moitié des habitants de la planète consomment du riz chaque jour. Pour un fort pourcentage d'entre eux,

le riz est la principale, voire la seule, source de calories.

Produire en quantités suffisantes un riz riche en nutriments est indispensable pour satisfaire les besoins de la population mondiale. Si l'obtention de nouvelles variétés de riz par les moyens classiques a considérablement augmenté la production de riz, les programmes de collaboration internationale ont permis de mieux comprendre le génome du riz, ce qui laisse entrevoir la mise au point de nouvelles variétés donnant de plus gros rendements et offrant une plus grande résistance aux maladies.

UNE SECONDE RÉVOLUTION VERTE

Au cours de 40 ou 50 dernières années, les scientifiques ont pu améliorer considérablement le rendement, la résistance aux maladies et la valeur nutritive du riz et d'autres plantes. Ils ont obtenu ces résultats en appliquant des méthodes classiques de croisements génétiques entre des variétés de plantes et la sélection par le phytogénéticien de la lignée la plus désirable. Cette phase de l'amélioration de la production agricole a été appelée la « révolution verte » et un éminent généticien, Norman Borlaug, a obtenu le prix Nobel de la paix



Participants à l'IRGSP: l'auteur est la troisième personne à partir de la gauche, au premier rang.

en 1970 pour sa contribution à l'accroissement de la production agricole mondiale.

Toutefois, au XXI^e siècle, l'accroissement de la population mondiale, ajouté à la diminution des superficies consacrées à l'agriculture, complique considérablement la capacité qu'a le monde de se nourrir. Une seconde «révolution verte» est donc nécessaire.

Un outil qui peut favoriser cette seconde révolution verte est déjà utilisé: c'est la génomique, qui implique la compréhension des gènes contenus dans un organisme et la façon dont ils affectent sa croissance et son développement. La génomique a fait un grand pas en avant il y a une dizaine d'années quand les scientifiques de l'Institut de recherche génomique des États-Unis ont réussi à déterminer la séquence complète (la carte de la composition génétique) d'un micro-organisme autonome, *Haemophilus influenzae*, la bactérie qui cause la grippe. Les techniques mises au point à l'Institut sont à présent largement utilisées pour déterminer la composition génétique de tous types d'organismes, y compris les animaux, les végétaux et les champignons.

LE GÉNOME DU RIZ

Au début des années 1990, des scientifiques japonais avaient entamé des recherches sur le séquençage du génome du riz. Dans le but d'accélérer ces travaux et de mettre à profit une expertise internationale, un groupe de chercheurs de plusieurs pays, dirigé par des scientifiques japonais, a lancé, en 1998, le Projet international de séquençage du génome du riz. Grâce à des fonds fournis par de nombreux pays dont le Japon, la Chine, la Corée, la Thaïlande, l'Inde, la France, le Brésil, Taiwan et les

États-Unis, des centaines de scientifiques de nombreux pays ont contribué au séquençage du génome du riz. Cette collaboration internationale a permis une division du travail et la répartition des coûts parmi les participants. Elle a également donné aux pays participants un enjeu précis dans le projet et la possibilité d'obtenir la reconnaissance de leur participation au séquençage complet ou partiel d'un chromosome. Ce projet a été mené à bien en décembre 2004 et les résultats ont été publiés en août 2005.

L'IRGSP a permis d'identifier la présence de plus de 37 000 gènes dans le génome du riz, soit un nombre de gènes plus élevé que dans le génome humain. L'analyse d'autres séquences du génome du riz avec la séquence IRGSP a permis de repérer plus de 80 000 nouveaux marqueurs génétiques – les gènes qui produisent un trait reconnaissable – ce qui permettra aux phytogénéticiens d'accélérer leurs programmes de reproduction et de mettre au point des variétés de riz plus robustes.

Avant même que l'IRGSP n'ait achevé sa tâche, les chercheurs du projet mettaient leurs découvertes à la disposition des scientifiques du monde entier en vue de leur utilisation dans une vaste gamme de recherches sur la biologie végétale. Ainsi a notamment été découvert le gène qui détermine la date de floraison du riz. La durée du jour, c'est-à-dire la durée de la lumière du jour par opposition à l'obscurité, qui varie selon les saisons, détermine la floraison des plantes telles que le riz et par conséquent la date de leur germination. En identifiant le mécanisme de floraison du riz, les scientifiques peuvent désormais tenter de mettre au point des variétés de riz qui fleurissent plus tôt, prolongeant ainsi la saison de croissance pour les agriculteurs.

DES APPLICATIONS PLUS VASTES

Indépendamment du rôle important qu'il joue dans l'agriculture mondiale, le riz présente un autre intérêt pour les scientifiques. On sait que les primates tels que les humains et les chimpanzés ont des gènes et génomes similaires. La même relation existe entre le riz et ses proches parents, des céréales telles que le blé, le maïs, l'orge, le sorgho et le millet. Pour des raisons financières et techniques, une séquence complète du génome n'est actuellement disponible que pour le riz. Mais étant donné les rapports étroits qui existent entre les céréales, les scientifiques qui font des recherches sur d'autres céréales ont été en mesure d'utiliser le génome du riz pour faire progresser leurs travaux. En fait, ils ont pu utiliser la séquence du génome du riz pour identifier un important

gène de l'orge impliqué dans la résistance de cette céréale à un champignon pathogène responsable d'une maladie, la rouille poudreuse.

Les avantages du projet du génome du riz sont manifestes :

- Au fur et à mesure que de nouvelles plantes et espèces végétales plus robustes seront obtenues et que l'on comprendra mieux la biologie fondamentale des plantes, on pourra mieux répondre aux besoins d'une population mondiale en expansion au XXI^e siècle.

- La collaboration qui caractérise les travaux de l'IRGSP montre l'ampleur des progrès scientifiques qui peuvent être réalisés quand des experts du monde entier ont accès à leurs travaux de recherche réciproques.

- L'IRGSP a montré, d'une part, qu'il n'est pas nécessaire que les travaux scientifiques les plus récents mettent en jeu uniquement les pays hautement développés, et d'autre part que les efforts internationaux de collaboration peuvent aider les pays moins développés à acquérir des technologies de pointe.

- L'expérience de l'IRGSP donnera vraisemblablement lieu à de nouveaux efforts caractérisés par une plus forte collaboration. Cela a déjà commencé avec le Rice Functional Genomics Consortium – collaboration entre scientifiques étrangers pour accroître la compréhension des fonctions des quelque 37 000 gènes du riz dans le but de faire face aux besoins mondiaux croissants en matière de production.

PARTENARIATS ENTRE SECTEURS PUBLIC ET PRIVÉ

Il est manifeste que mener à bien la mission de l'IRGSP a été une entreprise ardue et semée d'obstacles. Le plus gros problème à résoudre impliquait les travaux parallèles entrepris par Monsanto et Syngenta, deux géants de l'agro-industrie, et par un centre de recherche chinois, l'Institut de génomique de Beijing, en vue du séquençage du génome du riz. L'IRGSP a par la suite collaboré avec Monsanto et Syngenta, établissant un partenariat extrêmement productif entre les secteurs public et privé. Ce partenariat a permis d'incorporer des données du secteur privé dans les résultats de travaux publics de recherche.

Les avantages de ce type de partenariat ont largement compensé toutes les difficultés rencontrées. En plus de fournir une ressource précieuse aux scientifiques et agriculteurs du monde entier, le succès des travaux de l'IRGSP montre que la collaboration scientifique internationale est productive et qu'elle sert des objectifs plus importants que ses buts initiaux. Il est certain que la collaboration internationale devrait également être considérée comme une stratégie salubre pour d'autres importantes entreprises scientifiques. ■

Les opinions exprimées dans cet article ne reflètent pas nécessairement les vues ou la politique du gouvernement des États-Unis.

LA NAISSANCE DE LA BIOTECHNOLOGIE

Exploiter le potentiel de l'ADN

Dinesh Ramde

De la découverte de la structure de l'ADN à la thérapie génique, les progrès de la biotechnologie ont été marqués par des découvertes révolutionnaires et des progrès techniques fascinants. Ces avancées ont fait naître le sentiment que nous pouvons améliorer de façon spectaculaire les soins de santé, l'agriculture, la production d'énergie et d'autres domaines. Mais la rapidité avec laquelle l'industrie biotechnologique a pris son essor, l'ampleur de ses succès et de son impact ont surpris tout le monde, même ses pionniers. Ces considérations, déclarent les experts, incitent plus que jamais à penser que la biotechnologie tiendra dans un avenir relativement proche ses promesses initiales.

Dinesh Ramde est journaliste à l'Associated Press.

Prendre pour thème l'histoire de la biotechnologie équivaut à écrire son autobiographie dès l'adolescence – il semble curieux de se concentrer sur le passé quand l'avenir réserve tellement plus.

Et pourtant, la biotechnologie a fait un grand bond en avant depuis ses humbles débuts, il y a un quart de siècle, dans d'austères laboratoires. La croissance de cette industrie a été marquée dans le monde entier par des techniques scientifiques novatrices et par des découvertes décisives.

La biotechnologie intrigue, non pas à cause de tout le chemin qu'elle a parcouru, mais en raison des confins de la science qu'elles n'ont pas encore explorés. Les scientifiques entrevoient des changements révolutionnaires dans la façon dont nous nourrirons la population mondiale, dont nous vaccinerons nos enfants et dont nous assainirons notre atmosphère et notre eau.

Au moment où la biotechnologie est en plein développement, jetons un regard en arrière sur sa naissance et son enfance, en partie du point de vue des scientifiques et des hommes d'affaires qui l'ont engendrée.



Les chercheurs qui ont élucidé la structure de l'ADN, James Watson (à gauche) et Francis Crick, observent leur modèle d'une molécule d'ADN.

A. Barrington Brown/Photo Researchers, Inc.

LA NAISSANCE DE LA BIOTECHNOLOGIE

En 1863, le botaniste autrichien Gregor Mendel découvrit que les pois transmettaient leurs caractères héréditaires dans des unités biologiques discrètes qui seraient plus tard connues sous le nom de gènes. Six ans plus tard, le biochimiste suisse Johann Friedrich Miescher isolait des globules blancs la substance qu'on appellerait l'acide désoxyribonucléique, ou ADN.

Soixante-quinze années s'écouleraient encore avant que les deux découvertes ne soient

liées. En 1944, le biologiste canadien Oswald Avery démontra que l'ADN était le mécanisme par lequel les bactéries transmettaient leur matériel héréditaire. L'explication d'Avery fut toutefois accueillie avec scepticisme par ceux qui pensaient que les informations génétiques d'un organisme étaient trop complexes pour être contenues dans l'ADN.

Puis, en 1953, le biologiste américain James Watson et le biologiste moléculaire britannique Francis Crick élucidèrent la structure en double hélice de l'ADN, ce qui, à son tour, mena à toute une série de découvertes sur la façon dont l'ADN opère au niveau moléculaire.

Ces découvertes se limitaient au domaine de la biochimie. Ce n'est qu'en 1972 que des scientifiques découvrirent une façon de faire converger la biochimie et une technique qui a mené à la naissance de la biotechnologie. C'est en effet l'année où les biochimistes américains Herbert Boyer, Paul Berg et Stanley Cohen mirent au point l'ADN recombinant, molécule d'ADN modifiée, créée en combinant l'ADN de deux organismes n'ayant aucun lien de parenté entre eux.

Toute cellule d'un organisme vivant, qu'il s'agisse d'une bactérie ou d'un être humain, contient de l'ADN, lequel est constitué de quatre composantes appelées bases et désignées par les lettres A, T, G et C. De même que

les 26 lettres de l'alphabet romain peuvent être disposées, répétées et enchaînées pour former des phrases, les séries de quatre bases d'ADN sont enchaînées dans un ordre particulier à chaque être vivant.

L'ADN est un schéma permanent qui donne lieu à des copies temporaires de lui-même, l'acide ribonucléique ou ARN qui, en définitive, ordonne au mécanisme cellulaire de fabriquer des protéines uniques en leur genre. Chaque série de bases d'ADN qui codifie une protéine est appelée gène.

On peut considérer un gène comme une série d'instructions qui indiquent au mécanisme cellulaire la façon de combiner les acides aminés pour former une protéine. Le mécanisme de toute cellule, qu'elle soit bactérienne ou humaine, utilisera cette série d'instructions pour créer exactement la même séquence d'acides aminés, et par conséquent exactement la même protéine.

Si c'est effectivement le cas, raisonnaient Herbert Boyer et ses collègues, que se passera-t-il si nous prenons un gène humain qui crée une protéine vitale, si nous insérons ce gène dans l'ADN bactérien et si nous forçons la bactérie à fabriquer des réserves continues de cette protéine ? C'est lorsque son équipe a procédé à cette expérience, créant un ADN qui combinait de l'ADN humain et de l'ADN bactérien, que la biotechnologie est née. Les scientifiques avaient trouvé un moyen de transformer des organismes aussi simples que des bactéries en usines, en minuscules chaînes de montage qui fabriquent des protéines humaines essentielles comme l'insuline et l'hormone de croissance.

LE MONDE DES AFFAIRES RÉAGIT

Cette technologie naissante et les organismes génétiquement modifiés qu'elle produisait inspiraient autant de craintes que d'enthousiasme. « Nous devons être extrêmement prudents – ce n'est pas le genre de chose que l'on peut tout simplement verser dans une bouteille, déclare George Rathmann, directeur administratif d'Amgen, société de biotechnologie qui a son siège à Thousand Oaks (Californie). On risquerait d'obtenir un nouvel agent infectieux plus meurtrier que le virus de la variole ou le streptocoque, et ce serait encore plus grave s'il était combiné à un organisme viral. »

Ce sont des craintes de ce genre qui amenèrent les scientifiques à organiser la Conférence d'Asilomar à Pacific Grove (Californie) en 1975. Durant cette conférence, quelque 140 érudits ont établi des règles strictes pour fixer les limites dans lesquelles les recherches sur l'ADN recombinant devaient avoir lieu. La technologie devait



Expérience biotechnique dans une salle de Genentech consacrée au développement de cellules.

par exemple s'appliquer exclusivement aux organismes incapables de vivre indépendamment hors du laboratoire et ne devait pas être utilisée dans des gènes susceptibles d'être actifs chez l'homme.

« Cela soulevait assurément des craintes dans toute l'industrie, déclare George

Rathmann. Dans les laboratoires d'Abbott, on s'inquiétait tellement au sujet de l'ADN recombinant que le personnel devait porter un uniforme, un casque, pratiquement une combinaison spatiale complète. Certaines sociétés étaient si prudentes – si exagérément circonspectes – qu'elles ne purent jamais prendre leur essor. »

D'autres compagnies adoptèrent la nouvelle technologie. En 1976, Herbert Boyer s'associa à l'investisseur en capital-risque Bob Swanson pour fonder Genentech à South San Francisco. Dès le début, Herbert Boyer avait saisi le potentiel de cette nouvelle technologie. « C'était passionnant, la possibilité prometteuse de prendre ce projet de recherche dont je faisais partie et d'en faire quelque chose d'utile pour produire des médicaments dont bénéficieraient les gens », dit-il.

Il ne fallut pas longtemps à Genentech pour se distinguer avec la mise au point d'une insuline humaine produite par des bactéries obtenues par manipulation génétique. L'Administration des produits alimentaires et pharmaceutiques (FDA), organisme de réglementation du gouvernement américain, approuva le médicament en 1982. Dans les années qui suivirent, d'autres sociétés en firent autant avec des médicaments également issus de bactéries génétiquement modifiées, médicaments qui luttaient contre le rejet de greffes du rein, réapprovisionnaient en globules blancs les patients ayant subi une chimiothérapie et traitaient l'hémophilie.

Les plantes ont également bénéficié de la technologie de l'ADN recombinant. En 1987, Advance Genetic Sciences a créé une bactérie génétiquement modifiée qui

empêche le gel de se former sur les fraisières et les pieds de pommes de terre. Cette technologie a permis d'obtenir des produits alimentaires plus robustes et plus nutritifs. C'est ainsi que le riz a été génétiquement modifié pour être riche en vitamine A et les tomates pour produire



Ian Wilmut et sa création, Dolly, la première brebis clonée à partir d'une cellule d'animal adulte.

moins d'une substance responsable de leur pourrissement. Il s'agit là de changements que l'on n'aurait pas pu obtenir par simple reproduction sélective.

Les détracteurs de cette technologie affirment que les aliments génétiquement modifiés présentent des risques pour la santé qui n'existent pas dans les récoltes obtenues par les techniques traditionnelles de reproduction, ce qui n'a jamais été prouvé scientifiquement. Certains prétendent aussi que les sociétés qui créent des plantes génétiquement modifiées revendiqueront ultérieurement des droits intellectuels, et par conséquent financiers, sur ces plantes, au détriment des pauvres des pays en voie de développement. Or, jusqu'à présent, c'est le contraire qui s'est produit, les agriculteurs des pays en voie de développement bénéficiant des rendements supérieurs des cultures biotechnologiques.

LA BIOTECHNOLOGIE ENGENDRE DE NOUVELLES SCIENCES

Les techniques qui ont rendu possible la manipulation de l'ADN ont permis aux scientifiques de rechercher de nouvelles technologies. Dans les années 1980, PPL Therapeutics d'Édimbourg (Écosse) a utilisé les manipulations génétiques pour créer Rosie, une vache dont le lait contenait la protéine humaine alpha-lactalbumine. Ce lait peut être administré aux bébés prématurés qui sont trop petits pour téter, et l'enrichissement de la protéine fournit les acides aminés nécessaires au développement des nouveau-nés.

Des embryons de Rosie ont été utilisés pour créer des clones de la vache, clones à qui on permettra de

se reproduire normalement pour obtenir un troupeau de vaches laitières améliorées. Le processus de clonage impliquait le prélèvement d'ADN de l'une des cellules de Rosie et son utilisation pour remplacer l'ADN d'un embryon provenant d'une autre vache. Le veau qui en a résulté est donc génétiquement semblable à Rosie. De telles expériences avaient déjà lieu depuis des années sur les grenouilles, les souris et les moutons.

En 1997, les chercheurs de l'Institut Roslin, en Écosse, ont annoncé une nouvelle encore plus spectaculaire. Ils avaient cloné un mouton en extrayant de l'ADN d'une cellule de mouton et en l'introduisant dans une cellule mammaire et non pas dans un embryon, prouvant ainsi pour la première fois que même les cellules « adultes » pouvaient se transformer en cellules différentes. Jusque-là, on pensait généralement que ce processus se limitait aux cellules souches immatures.

Un an plus tard, le biologiste américain James Thompson cultivait pour la première fois des cellules souches embryonnaires, qui sont appréciées pour la faculté qu'elles ont de se développer en cellules spécifiques. Les scientifiques cherchent à savoir si les cellules souches peuvent être utilisées pour remplacer des cellules mortes ou endommagées, et donner ainsi aux patients souffrant de lésions cérébrales ou autres l'espoir d'une guérison.

En plus de la technologie du clonage, un autre projet révolutionnaire concernant l'ADN était en cours dans les années 1990. Depuis l'identification par MM. Watson et Crick de la cellule moléculaire de l'ADN, les scientifiques espéraient pouvoir identifier tous les gènes de l'ADN humain, tâche considérable si l'on songe qu'un être humain a de 20 000 à 25 000 gènes. En 1990, la technologie était suffisamment avancée pour qu'un consortium international se lance dans cette aventure audacieuse qu'est le Projet du génome humain.

Ce projet avait un triple objectif : identifier chaque gène humain ; déterminer l'ordre des trois milliards de paires de bases, c'est-à-dire des composantes A, T, G, et C de l'ADN humain ; et mettre la séquence à la disposition des chercheurs. Le projet a été mené à bonne fin en 2003, soit deux ans avant la date prévue, et les scientifiques étudient actuellement les données utilisables pour la thérapie génique médicale.

DES RÉSULTATS QUI DÉPASSENT TOUTES LES ESPÉRANCES

L'industrie de la biotechnologie s'est développée avec une rapidité que ni Herbert Boyer ni George Rathmann n'auraient pu prévoir.

« Quand on voit ce qui se passe aujourd'hui, on est sidéré, dit Herbert Boyer. Certes nous avons de grandes espérances et, quand nous avons débuté, nous étions sollicités de toutes parts, comme des enfants chez un marchand de bonbons. Je me souviens d'avoir pensé, dans les jours qui ont suivi la mise au point des techniques d'ADN recombinant, que cette technologie était sans limites. Mais nous ne pouvions tout de même pas anticiper tout cela. »

George Rathmann a abandonné une carrière paisible dans le diagnostic médical pour devenir directeur administratif d'Amgen et son troisième employé, décision qui témoigne, selon lui, de l'extrême confiance qu'il a dans la technologie. « Cette décision a été facile à prendre car la science était si prometteuse, dit-il. Mais on a tort de dire que l'industrie a évolué comme on le prévoyait. Ce n'est pas son succès qui est surprenant, mais l'ampleur de ce succès, son importance pour la médecine humaine. C'est réellement incroyable. »

Il se souvient d'avoir vu, dans les années 1980, des statistiques gouvernementales qui laissaient présager que l'industrie biotechnologique pourrait un jour devenir une industrie de 4 milliards de dollars. « Cela vous montre la médiocrité de notre imagination, dit-il. À elle seule, Amgen est devenue une compagnie qui vaut 95 milliards de dollars. »

Pour George Rathmann, toutefois, l'argent est une considération secondaire. À 77 ans, l'ancien directeur administratif d'Amgen prend presque chaque jour de l'Epogen, l'un des médicaments que cette société produit par manipulation génétique, dans le cadre de son traitement d'une maladie des reins. Il pense que les 25 premières années d'existence de l'industrie ne sont que le début d'une entreprise colossale.

« L'avenir était extrêmement prometteur en 1980, et il l'est encore beaucoup plus aujourd'hui en raison de l'ampleur des résultats obtenus sur le plan général. Je pense que nous allons assister à un épanouissement continu des effets de la biotechnologie. C'est une science magnifique. » ■

Les opinions exprimées dans cet article ne reflètent pas nécessairement les vues ou la politique du gouvernement des États-Unis.

Les 142 premières années de la biotechnologie

1863	Gregor Mendel découvre que les pois transmettent leurs caractères héréditaires dans des unités distinctes que l'on appellera ultérieurement des gènes.
1869	Johann Friedrich Miescher isole l'ADN de globules blancs humains.
1944	En étudiant des bactéries de pneumocoques, Oswald Avery et ses collègues déterminent que l'ADN est le matériel héréditaire.
1953	James Watson et Francis Crick découvrent la structure moléculaire en double hélice de l'ADN.
1955	Fred Sanger détermine la séquence des acides aminés de l'insuline.
1972-73	Paul Berg, Herbert Boyer et Stanley Cohen mettent au point la technique de l'ADN recombinant.
1975	Des scientifiques expriment la crainte que l'ADN recombinant ne mène à la mise au point d'organismes dangereux. À la Conférence d'Asilomar, un groupe de scientifiques établit des restrictions strictes concernant l'utilisation des techniques d'ADN recombinant..
1976	Herbert Boyer et Bob Swanson fondent la société Genentech, pionnière de la biotechnologie.
1978	La somatostatine devient la première protéine humaine mise au point en utilisant la technologie de l'ADN recombinant.
1984	La Chiron Corporation annonce qu'elle a entièrement cloné et séquencé le génome du VIH.
1985	Des plantes génétiquement modifiées pour assurer leur résistance aux insectes et aux virus font pour la première fois l'objet d'essais en champ.
1990	GenPhar International, compagnie biopharmaceutique, crée la première vache laitière transgénique, qui produit des protéines de lait humain pour l'allaitement des nouveau-nés.
1990	Le Projet du génome humain est lancé.
1993	L'Administration américaine des produits alimentaires et pharmaceutiques conclut que les aliments issus de manipulations génétiques ne sont pas intrinsèquement dangereux.
1997	Des chercheurs de l'Institut Roslin (Écosse) annoncent qu'ils ont cloné une brebis.
1998	Deux équipes de chercheurs réussissent à développer des cellules souches embryonnaires.
2003	Le projet du génome humain est mené à bonne fin.
2004	Des chercheurs coréens annoncent qu'ils ont réussi à cloner une cellule embryonnaire humaine.

LA RÉGLEMENTATION DE LA BIOTECHNOLOGIE AGRICOLE AUX ÉTATS-UNIS

Trois organismes du gouvernement fédéral – le ministère de l'agriculture (USDA), l'Agence de protection de l'environnement (EPA) et l'Administration des produits alimentaires et pharmaceutiques (FDA) – sont responsables du contrôle des plantes et produits transgéniques. Leurs responsabilités sont complémentaires et, parfois, se chevauchent. La culture des plantes transgéniques relève de la compétence du Service d'inspection zoosanitaire et phytosanitaire de l'USDA. L'analyse, la distribution et l'utilisation des pesticides introduits génétiquement dans les plantes sont du ressort de l'EPA et l'utilisation de tous les aliments tirés de plantes pour la consommation humaine et animale entre dans les compétences de la FDA. Le texte qui suit est une brève vue d'ensemble du rôle que jouent ces organismes dans la réglementation des organismes génétiquement modifiés.

SERVICE D'INSPECTION ZOOSANITAIRE ET PHYTOSANITAIRE DU MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE DES ÉTATS-UNIS

Au sein de l'USDA, le Service d'inspection zoosanitaire et phytosanitaire (Animal and Plant Health Inspection Service, ou APHIS) a pour responsabilité de protéger l'agriculture des insectes nuisibles et des maladies. En vertu de la Loi de protection des plantes, l'APHIS a un pouvoir réglementaire sur les produits de la biotechnologie moderne qui pourraient poser un tel risque. En conséquence, l'APHIS réglemente les organismes et produits que l'on sait être nuisibles aux plantes ou qu'on soupçonne de l'être ou de poser un risque aux végétaux, y compris ceux qui ont été modifiés ou produits par manipulation génétique. Ce sont les « articles réglementés ». L'APHIS réglemente l'importation, la distribution, le transport entre États et la mise en circulation dans l'environnement d'organismes réglementés résultant de manipulations génétiques, y compris les organismes faisant l'objet d'une utilisation expérimentale en laboratoire ou d'essais en champ. Les articles réglementés sont contrôlés pour garantir que, grâce à une manipulation, à un stockage et à un écoulement appropriés, ils ne poseront pas de risque

phytosanitaire dans les conditions d'utilisation envisagées.

La réglementation de l'USDA-APHIS prévoit le recours à une pétition pour obtenir qu'un organisme ne soit pas rangé dans la catégorie des articles réglementés. Si la pétition est approuvée, l'organisme en question ne sera plus considéré comme un article réglementé et cessera d'être soumis au contrôle de l'USDA-APHIS. Le requérant devra fournir divers renseignements tels que la biologie de la plante réceptrice, des données expérimentales et des publications, des descriptions du génotype et du phénotype de l'organisme transgénique et des rapports d'essais sur le terrain. L'USDA-APHIS évalue toutes sortes de questions, y compris la prédisposition de la plante à la maladie et aux insectes nuisibles; les effets des produits génétiques, des nouveaux enzymes ou des changements apportés au métabolisme des plantes; le croisement avec des mauvaises herbes et l'impact sur les plantes sexuellement compatibles; les méthodes agricoles et culturales; les effets sur les organismes non visés et le potentiel de transfert génétique à d'autres types d'organismes. Un communiqué à ce sujet est publié dans le Federal Register (journal officiel), les commentaires du public sont pris en considération lors de l'évaluation de l'effet de la biotechnologie sur l'environnement et la suite donnée à la pétition est publiée. Des copies des documents USDA-APHIS sont à la disposition du public.

Pour tous renseignements complémentaires (en anglais), consulter le site Internet <http://www.aphis.usda.gov/brs/>.

Aux termes de la loi sur les virus, les sérums et les toxines, les services vétérinaires de l'USDA-APHIS inspectent les établissements qui produisent des substances biologiques et ils délivrent des licences pour les substances biologiques vétérinaires, y compris les vaccins pour animaux issus de la biotechnologie.

Pour tous renseignements complémentaires (en anglais), consulter le site Internet <http://www.aphis.usda.gov/vs/>.

L'AGENCE DE PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT (EPA)

Grâce à un mécanisme d'enregistrement, l'EPA réglemente la vente, la distribution et l'utilisation des pesticides dans le but de protéger la santé et l'environnement, indépendamment de la façon dont le pesticide a été fabriqué ou dont il agit. Cela comprend la réglementation des pesticides produits par un organisme grâce aux techniques de la biotechnologie moderne. En vertu de la loi fédérale sur les insecticides, les fongicides et les rodenticides, la Division des biopesticides et de la prévention de la pollution de l'Office of des programmes relatifs aux pesticides réglemente la distribution, la vente, l'utilisation et l'expérimentation des pesticides introduits dans les plantes et les microbes. En général, des permis d'utilisation expérimentale sont accordés pour les essais sur le terrain. Les demandeurs doivent faire enregistrer les pesticides avant leur mise en vente et leur distribution, et l'EPA peut fixer leurs conditions d'utilisation dans le cadre de l'enregistrement. L'EPA établit également des seuils de tolérance pour les traces de pesticides présentes dans les produits destinés à l'alimentation humaine ou animale, ou bien accorde une exemption en vertu de la loi fédérale sur l'alimentation, les médicaments et les cosmétiques.

Pour tous renseignements complémentaires (en anglais), consulter le site Internet <http://www.epa.gov/pesticides/biopesticides>.

Le programme « Toxic Substance Control Act Biotechnology Program » du Bureau de prévention et des substances toxiques réglemente les micro-organismes destinés à des utilisations industrielles générales. Ce programme procède au contrôle, avant leur distribution sur le marché, des « nouveaux » micro-organismes, c'est-à-dire des micro-organismes obtenus par des combinaisons délibérées de matériel génétique extrait d'organismes classés dans diverses catégories taxinomiques.

Pour tous renseignements complémentaires (en anglais), consulter le site <http://epa.gov/oppt/biotech/>.

L'ADMINISTRATION DES PRODUITS ALIMENTAIRES ET PHARMACEUTIQUES (FDA)

La FDA a pour responsabilité d'assurer l'innocuité et l'étiquetage approprié de tous les produits issus de plantes et destinés à l'alimentation humaine ou animale, y compris les aliments transgéniques. Tous ces aliments, qu'ils soient importés ou non et qu'ils proviennent de récoltes modifiées par les techniques de reproduction classiques ou par manipulations génétiques, doivent répondre aux mêmes normes rigoureuses de sécurité de la FDA. En vertu de la Loi fédérale sur l'alimentation, les médicaments et les cosmétiques, les fabricants de produits destinés à l'alimentation humaine ou animale ont la responsabilité d'assurer que les produits qu'ils mettent sur le marché sont sans danger et correctement étiquetés. De plus, tout additif alimentaire, y compris ceux qui sont introduits dans les aliments par la phyto-génétique, doivent être approuvés par la FDA avant d'être commercialisés. (Le terme « additif alimentaire » se réfère aux substances, autres que les pesticides, qui sont introduites dans les aliments et qui ne sont généralement pas considérées comme étant sans danger par des experts scientifiques qualifiés.)

La FDA veille à ce que les fabricants de produits destinés à l'alimentation humaine ou animale s'acquittent de leurs obligations en vertu des pouvoirs coercitifs que lui confère la Loi fédérale sur l'alimentation, les médicaments et les cosmétiques. Pour aider les fabricants de produits destinés à l'alimentation humaine ou animale et résultant de manipulations génétiques à respecter leurs obligations, la FDA encourage ces derniers à participer à son programme de consultations facultatives. Tous les produits transgéniques destinés à l'alimentation humaine et animale actuellement sur le marché américain ont fait l'objet de telles consultations. À une exception près, aucun de ces aliments n'est considéré comme contenant un additif alimentaire et sa commercialisation a pu avoir lieu sans nécessiter d'approbation préalable.

Pour tous renseignements complémentaires (en anglais), consulter le site Internet <http://www.cfsan.fda.gov/~lrd/biotechm.html>

Source: Site Internet United States Regulatory Agencies Unified Biotechnology <http://usbiotechreg.nbio.gov/roles.asp>

GLOSSAIRE DE TERMES RELATIFS À LA BIOTECHNOLOGIE

Acides aminés (ou amino-acides) : Ce sont les composants les plus fondamentaux de la matière vivante. Les acides aminés sont des molécules qui contiennent à la fois des groupes fonctionnels d'acides aminés et d'acides carboxyliques.

ADN (acide désoxyribonucléique) : Matériel génétique de toutes les cellules et d'un grand nombre de virus; molécule qui stocke l'information génétique. L'ADN est une molécule à deux brins reliés faiblement ensemble par l'assemblage de paires de nucléotides. Les quatre nucléotides présents dans l'ADN sont l'adénine (A), la guanine (G), la cytosine (C) et la thymine (T). Dans la nature, les paires ne se forment qu'entre les nucléotides A et T d'une part, et G et C d'autre part; dès lors, on peut déduire la séquence des bases de chaque brin à partir de celle du brin complémentaire.

Agent phytoprotecteur intégré (Plant-incorporated protectants – PIPs) : Naguère baptisée phytopesticide, cette substance fait fonction de pesticide en étant produite et utilisée par la plante pour se protéger contre des insectes, des virus ou des champignons.

Anticorps monoclonal : Anticorps produit en grande quantité en laboratoire à partir d'un seul clone et qui reconnaît un seul antigène. En général, les anticorps monoclonaux sont issus de la fusion d'un lymphocyte B, cellule éphémère productrice d'anticorps, et d'une cellule qui se multiplie rapidement, une cellule cancéreuse par exemple. La cellule hybride ainsi produite, ou hybridome, se multiplie elle aussi rapidement et elle produit une grande quantité de l'anticorps visé.

Antigène : En général, c'est une protéine présente sur la surface d'un virus et qui stimule la réponse immunitaire, en particulier la production d'anticorps.

Autoassemblage moléculaire : Assemblage de molécules sans l'intervention d'une source extérieure. L'autoassemblage peut se produire spontanément dans la nature, par exemple dans les cellules (c'est ainsi le cas de l'autoassemblage de la double couche de lipides

de la membrane) et dans d'autres systèmes biologiques, aussi bien que dans les systèmes qui ont fait l'objet de manipulations génétiques. De fait, dans beaucoup de systèmes biologiques, diverses molécules et structures s'associent spontanément. L'imitation des opérations d'autoassemblage et la création de nouvelles molécules capables de s'associer spontanément pour former des structures supramoléculaires sont deux techniques importantes de la nanotechnologie.

Bioinformatique (ou génématique) : Il s'agit de l'utilisation des mathématiques appliquées, de l'informatique et de la statistique dans le contexte de l'étude des systèmes biologiques. Les principaux domaines de recherche regroupent l'alignement des séquences, la découverte de gènes, l'assemblage de génomes, l'alignement des structures protéiques, la prévision des structures protéiques, la prévision de l'expression génétique et les interactions entre protéines.

Biopesticides : Certains types de pesticides issus de matières naturelles, par exemple des animaux, des plantes, des bactéries et de certains minéraux. L'huile de colza et le bicarbonate de soude, par exemple, sont classés parmi les bioinsecticides.

Biotechnologie : Ensemble des techniques biologiques mises au point dans le cadre de la recherche fondamentale et appliquées à la recherche et au développement de produits. La biotechnologie englobe le recours à l'ADN recombinant, à la fusion cellulaire et aux nouveaux bioprocédés.

Cartographie génétique (ou des gènes) : Ensemble des méthodes qui permettent de localiser les gènes sur les chromosomes.

Cellulase : Enzyme complexe qui décompose la cellulose sous la forme de beta-glucose. Il est produit principalement par des bactéries symbiotiques présentes dans les poches de l'estomac des ruminants. À l'exception des ruminants, la plupart des animaux (l'homme y compris) ne produisent pas de cellulase: il leur est donc

impossible d'utiliser la plus grande partie de l'énergie contenue dans les plantes.

Cellule: L'unité structurelle et fonctionnelle de base de tous les organismes. Elle contient l'ADN et bien d'autres éléments qui permettent à la cellule de fonctionner.

Cellule souche: Cellule «générique» capable, par divisions successives et infinies, de produire des cellules spécialisées pour divers tissus de l'organisme, par exemple pour le muscle cardiaque, le tissu cérébral ou le tissu hépatique. Les scientifiques sont capables de conserver indéfiniment les stocks de cellules souches et de leur faire produire des cellules spécialisées sur demande. Il existe deux grandes catégories de cellules souches. La première est celle des cellules souches embryonnaires, qui proviennent des foetus avortés ou des embryons surnuméraires produits lors d'une fécondation in vitro. Elles sont utilisées à des fins médicales et de recherche parce qu'elles peuvent former toutes sortes de cellules différenciées. La deuxième catégorie est celle des cellules souches adultes, aussi dites somatiques. Ces dernières ne sont pas aussi polyvalentes parce qu'elles sont spécifiques à certains types cellulaires seulement: cellules sanguines, intestinales, cutanées et musculaires.

Chromosome: Structure génétique autorépliquable des cellules qui contient de l'ADN. Chez l'être humain, il existe 23 paires de chromosomes.

Collagène: Principale protéine du tissu conjonctif et protéine la plus abondante chez les mammifères. C'est aussi le principal composant des ligaments et des tendons.

Cry1A: Protéine issue de la bactérie *Bacillus thuringiensis* et qui est toxique pour certains insectes. Cette bactérie est très répandue dans la nature et elle est utilisée comme insecticide depuis des dizaines d'années, même si elle représente moins de 2 pour cent des insecticides utilisés.

Cultivar: En botanique, variété agricole synthétique ou obtenue par sélection.

Culture de tissus (ou tissulaire): Méthode ayant pour but d'assurer la prolifération in vitro des tissus d'une plante au lieu de la cultiver à partir de semences. Elle est utilisée aussi bien dans le contexte de la sélection classique des plantes que dans celui de la biotechnologie agricole.

Culture tolérante aux herbicides: Cultures qui ont été mises au point de façon à survivre à l'application d'au

moins un herbicide commercial du fait de l'introduction dans leur patrimoine génétique d'un ou de plusieurs gènes, que ce soit à l'aide de la biotechnologie, par exemple des techniques du génie génétique, ou de méthodes de sélection classiques, telle que l'introduction de mutations naturelles, chimiques ou induites par radiation.

Double hélice: Structure en forme d'échelle sinueuse que constituent les deux brins linéaires de l'ADN quand un nucléotide d'une hélice se lie à un nucléotide complémentaire situé sur l'hélice opposée.

Épissage: Voir Épissage génétique.

Épissage génétique: Prélèvement d'un gène d'un organisme pour l'introduire dans un autre organisme à l'aide des techniques de la biotechnologie.

Expression génétique: Ensemble des mécanismes qui assurent la transcription et la traduction de l'information génétique dans la structure et les fonctions d'une cellule.

Flux génétique (ou flux des gènes): Transfert de gènes d'une population à une autre de la même espèce, par exemple par migration ou par dispersion de graines et de pollen.

Gène: Unité physique et fonctionnelle fondamentale de l'hérédité. Un gène est une séquence ordonnée de nucléotides situés sur un point précis d'un chromosome donné et qui code pour un produit fonctionnel spécifique, par exemple une protéine ou une molécule d'ARN.

Génétique: Étude des modes de transmission héréditaire de caractéristiques particulières.

Génie génétique: Ensemble des techniques qui consistent à extraire, à modifier ou à introduire des gènes dans une molécule d'ADN en vue de modifier l'information que contient cette dernière. Le génie génétique permet ainsi de changer le type ou la quantité de protéines qu'un organisme est capable de produire, ce dernier pouvant alors fabriquer de nouvelles substances ou exécuter de nouvelles fonctions.

Génome: Ensemble de toute l'information génétique d'un organisme contenue dans ses chromosomes.

Gestion de la résistance: Recours à des stratégies propres à retarder l'apparition de phénomènes de résistance.

Par exemple, une stratégie de gestion de la résistance des insectes dans les champs cultivés prévoit la création d'un « refuge », c'est-à-dire d'une zone non traitée, afin d'assurer la présence d'une population d'insectes sensibles au pesticide utilisé dans le reste du champ.

Hélice alpha: Configuration spatiale de nombreuses protéines, présente en particulier dans les cheveux, la laine, les ongles et la corne des animaux, et caractérisée par une disposition hélicoïdale des acides aminés constitutifs qui sont stabilisés grâce à des liaisons hydrogènes.

Hybride: Semence ou plante qui provient du croisement de variétés différentes, par opposition aux variétés obtenues par pollinisation naturelle. Les semences hybrides sont sélectionnées de manière à posséder des traits de qualité supérieure (amélioration du rendement ou résistance aux ravageurs, par exemple).

Issu de la biotechnologie: Le recours à la biologie moléculaire et/ou à la technologie de l'ADN recombinant, ou au transfert de gènes *in vitro*, en vue de créer des produits ou d'insérer des capacités précises dans des végétaux ou d'autres organismes vivants.

Lignée germinale: Lignée de cellules germinales qui contiennent du matériel génétique susceptible d'être transmis à un descendant.

Machine moléculaire: Assemblage d'un nombre défini de composantes moléculaires destinées à remplir une fonction spécifique. Chaque composante moléculaire exécute une seule action, tandis que l'ensemble de la structure supramoléculaire remplit une fonction plus complexe qui résulte de la coopération des diverses composantes moléculaires.

Maïs Bt: Maïs mis au point à l'aide de la biotechnologie et dont les tissus libèrent une protéine qui est toxique pour certains insectes, mais non pour l'homme ni pour les autres mammifères.

Molécule d'ADN recombinant: Ensemble de molécules d'ADN d'origine différente qui sont unies à l'aide des techniques de l'ADN recombinant.

Mutation: Tout événement qui entraîne une altération héréditaire de la séquence de l'ADN.

Nanomédecine: Domaine scientifique en pleine évolution qui porte sur la réalisation de toutes sortes de nanoparticules et de nanodispositifs, d'à peine quelques millimicromètres de diamètre, lesquels sont destinés à améliorer le dépistage du cancer, à stimuler la réponse immunitaire, à réparer des tissus endommagés et à bloquer l'athérosclérose. En 2005, l'Administration des produits alimentaires et pharmaceutiques des États-Unis (FDA) a donné son aval à l'utilisation d'une nanoparticule liée au médicament anticancéreux Taxol dans le cadre du traitement du cancer évolué du sein. Une autre nanoparticule visant à prévenir le rétrécissement de l'artère coronaire fait actuellement l'objet d'essais aux États-Unis parmi des sujets qui ont subi une angioplastie.

Nanomètre: Un milliardième de mètre.

Nanotechnologie: Ensemble de systèmes visant à transformer la matière, l'énergie et l'information et qui se fondent sur des composants à l'échelle du nanomètre et aux caractéristiques moléculaires précisément définies. Ce terme s'applique aussi aux techniques qui produisent ou mesurent des caractéristiques d'une taille inférieure à 100 nanomètres.

Nucléotide: L'un des composants de base des molécules d'acide ribonucléique (ARN) et d'acide désoxyribonucléique (ADN). Dans les systèmes biologiques, les nucléotides sont liés par des enzymes pour former une longue séquence polynucléotidique bien définie.

Organisme génétiquement modifié (OGM): Les termes OGM et « transgénique » sont souvent utilisés pour parler d'organismes qui ont acquis de nouveaux gènes provenant d'autres organismes à la suite d'un transfert de gènes en laboratoire.

Pathogène: Agent qui cause une maladie. S'applique en particulier aux micro-organismes vivants, tels que les bactéries ou les champignons.

Peptide: Fragment de protéine, provenant d'une chaîne d'au moins deux acides aminés, un peu comme un bracelet perlé. Pendant la digestion, les protéines d'origine animale se dégradent en formant des peptides, lesquels se décomposent ensuite sous la forme des acides aminés qu'ils contiennent.

Pesticides microbiens: Pesticides qui ont un micro-organisme comme principe actif, par exemple une bactérie, un champignon, un virus ou un protozoaire. Les pesticides microbiens visent toutes sortes de ravageurs, mais chaque ingrédient actif est relativement spécifique à un ou à plusieurs ravageurs en particulier. Par exemple, il y a des champignons qui détruisent certaines mauvaises herbes, et d'autres qui s'attaquent à tel ou tel insecte. Les pesticides microbiens les plus utilisés sont des sous-espèces et des souches de la bactérie *Bacillus thuringiensis*, ou Bt.

Pollen: Les cellules qui transportent l'ADN mâle des spermaphytes.

Polymorphisme d'un nucléotide simple (PNS):

Liens entre les gènes et variations individuelles dans le code génétique de populations données. Les différences observées peuvent signaler un risque accru pour telle ou telle maladie ou déterminer la réaction d'un individu à un certain médicament.

Produits à base biologique: Il s'agit des carburants, des produits chimiques, des matériaux de construction, de l'énergie électrique ou des sources calorifiques qui sont produits à partir de matières biologiques. Ce terme peut aussi recouvrir tout produit énergétique, commercial ou industriel, autre que les aliments pour l'homme et les animaux, qui utilise des matières biologiques ou des matières renouvelables non importées, qu'elles soient agricoles (d'origine végétale ou animale, y compris marine) ou forestières.

Profilage d'expression d'un gène: Méthode qui permet de surveiller l'expression simultanée de milliers de gènes sur une lamelle en verre: on parle de microréseau à base d'ADN.

Protéine: Large molécule composée d'une ou de plusieurs chaînes d'acides aminés selon un ordre précis et qui est déterminé par la séquence des nucléotides dans le gène qui code pour la protéine. Les protéines sont nécessaires à la structure, au fonctionnement et à la régulation des cellules, des tissus et des organes, et chacune d'entre elles a des fonctions particulières.

Protéine membranaire: Molécule protéinique qui est attachée ou associée à la membrane d'une cellule.

Protéomique: Ensemble des techniques, dont la spectrométrie de masse, qui permettent de détecter la

présence de biomarqueurs dans le sang, lesquels pourraient être des signes précurseurs d'une maladie, décelables avant même les premiers symptômes. La protéine C-réactive est un exemple de biomarqueur: elle indique la présence de phénomènes inflammatoires dans les parois des vaisseaux sanguins qui laissent présager l'athérosclérose.

Réaction en chaîne de la polymérase (PCR, polymerase chain reaction): Technique *in vitro* permettant, par un phénomène d'amplification, de produire un grand nombre de copies de brins complémentaires d'une molécule d'ADN donnée. Des séquences d'ADN qui ne pourraient être autrement ni détectées ni étudiées peuvent ainsi être reproduites des millions de fois.

Recombinaison génétique: Phénomène conduisant à l'apparition dans une cellule ou un individu de gènes dont l'agencement est différent de celui observé chez les cellules ou les individus parentaux.

Reproduction sélective: Croisements intentionnels d'organismes pour que le descendant ait une caractéristique désirée provenant de l'un des parents.

Résistance à un pesticide: Changement génétique en réaction à la sélection par un pesticide et qui résulte du développement de souches capables de survivre à une dose mortelle pour la majorité des individus d'une population normale. Cette résistance peut apparaître chez les insectes, les plantes adventices ou les pathogènes.

Sélection classique: Modification des végétaux et des animaux par le biais de méthodes de reproduction sélective. Ces méthodes peuvent inclure certains aspects de la biotechnologie, telles que la culture de tissus et la sélection par mutations.

Sélection naturelle: Notion élaborée par Charles Darwin et selon laquelle les gènes qui produisent des caractéristiques plus adaptées à un milieu particulier seront plus abondants lors de la génération suivante.

Techniques de l'ADN recombinant: Techniques servant à unir des segments d'ADN en dehors d'une cellule ou d'un organisme. Dans des conditions propices, une molécule d'ADN recombinant peut pénétrer une cellule et s'y reproduire soit de façon autonome, soit après avoir été introduite dans un chromosome cellulaire.

Thérapie génique: Technique médicale expérimentale de traitement de maladies qui repose sur l'insertion de gènes dans les cellules et les tissus d'un individu malade. Normalement, un gène défectueux est remplacé par un gène en bon état. Dans la plupart des cas, le gène normal est acheminé dans les tissus visés par un adénovirus qui a été génétiquement modifié de façon à être inoffensif.

Transfert de gènes: Technique courante en biologie moléculaire et qui s'applique à la modification du patrimoine génétique d'un organisme par l'introduction d'ADN recombiné.

Transgénique: Qui contient des gènes modifiés par l'insertion d'ADN provenant d'un organisme étranger. Le transfert de gènes d'une espèce à une autre afin d'obtenir la caractéristique recherchée chez le descendant.

Variété: Subdivision d'une espèce de la taxonomie botanique. On l'emploie indifféremment à la place du mot « cultivar » pour désigner un groupe d'individus qui est génétiquement distinct d'autres groupes d'individus dans une même espèce. Une variété agricole est un groupe de plantes semblables que l'on peut distinguer des autres variétés de la même espèce grâce à leurs caractéristiques structurelles ou à leur performance.

Virus: Micro-organisme non cellulaire qui ne peut se reproduire que dans une cellule hôte. Les virus consistent en un acide nucléique recouvert de protéine; certains virus zoophiles sont aussi entourés d'une membrane. Dans la cellule infectée, le virus se sert de la capacité de synthèse de la cellule pour se reproduire. ■

Sources: *Agricultural Biotechnology: Informing the Dialogue*. Cornell University College of Agriculture and Life Sciences: Ithaca, NY. 2003; *McGraw-Hill Dictionary of Scientific and Technical Terms*. 6th ed. New York and Chicago: McGraw-Hill, 2002; Nill, Kimball R. *Glossary of Biotechnology Terms*. 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2002; *Wikipedia* at <http://en.wikipedia.org/>; *The McGraw-Hill Encyclopedia of Science & Technology Online* at <http://www.accessscience.com/> Encyclopedia.

BIBLIOGRAPHIE (EN ANGLAIS)

- Acquaah, George. *Understanding Biotechnology: An Integrated and Cyber-Based Approach*. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall, 2004.
- Bailey, Ronald. *Liberation Biology: The Scientific and Moral Case for the Biotech Revolution*. Amherst, NY: Prometheus Books, 2005.
- Barnum, Susan R. *Biotechnology: An Introduction*. 2nd ed. Belmont, CA: Thomson/Brooks/Cole, 2005.
- Chrispeels, Maarten J. and David E. Sadava. *Plants, Genes, and Crop Biotechnology*. 2nd ed. Boston, MA: Jones and Bartlett, 2003.
- Colwell, Rita. Testimony Before the U.S. House of Representatives Committee on Science Research Subcommittee, 12 June 2003.
<http://www.house.gov/science/hearings/research03/jun12/colwell.htm>
- Eicher, Carl K., Karim Maredia and Idah Sithole-Niang. *Biotechnology and the African Farmer*. Staff Paper 2005-08. East Lansing, MI: Michigan State University Press, 2005.
http://agecon.lib.umn.edu/cgi-bin/pdf_view.pl?paperid=16821&ftype=.pdf
- Farm Foundation. *Economics of Regulation of Agricultural Biotechnologies*. Issue Report; August 2005. Oak Brook, IL: Farm Foundation, 2005.
<http://www.farmfoundation.org/Issue%20Reports/documents/August2005ISSUEREPORTFINAL.pdf>
- Fedoroff, Nina V. and Nancy M. Brown. *Mendel in the Kitchen: A Scientist's View of Genetically Modified Foods*. Washington, DC: Joseph Henry Press, 2004.
- Freidberg, Susanne. *French Beans and Food Scares: Culture and Commerce in an Anxious Age*. New York, NY: Oxford University Press, 2004.
- Fumento, Michael. *BioEvolution: How Biotechnology Is Changing Our World*. San Francisco, CA: Encounter Books, 2003.
- Goodsell, David S. *Bionanotechnology: Lessons From Nature*. Hoboken, NJ: Wiley-Liss, 2004.
- Grace, Eric S. *Biotechnology Unzipped: Promises and Realities*. Rev. 2nd ed. Washington, DC: Joseph Henry Press, 2005.
- Huang, Jikun, Scott Rozelle, Carl Pray and Qinfang Wang. "Plant Biotechnology in China." *Science*, vol. 295, 25 January 2002, pp. 674-676.
- Kreuzer, Helen and Adrienne Massey. *Biology and Biotechnology: Science, Applications, and Issues*. Washington, DC: ASM Press, 2005.
- Loffler, Alicia, ed. *Kellogg on Biotechnology: Thriving Through Integration*. Evanston, IL: Northwestern University Press; London: Kogan Page, 2005.
- Miller, Henry I. and Gregory Conko. *The Frankenfood Myth: How Protest and Politics Threaten the Biotech Revolution*. New York, NY: Praeger, 2004.
- Pray, Carl, Jikun Huang, Ruifa Hu and Scott Rozelle. "Five Years of Bt Cotton in China: The Benefits Continue." *Plant Journal*, vol. 31, no. 4, August 2002, pp. 423-430.
- President's Council of Advisors on Science and Technology. *The National Nanotechnology Initiative at Five Years: Assessment and Recommendations of the National Nanotechnology Advisory Panel*. Washington, DC: President's Council of Advisors on Science and Technology, 2005.
<http://nano.gov/FINAL%5FPCAST%5FNANO%5FREPORT.pdf>
- Shetty, Kalidas, ed. *Food Biotechnology*. 2nd ed. New York: Dekker/CRC Press, 2005.

Shmaefsky, Brian. *Biotechnology in the Farm and Factory: Agricultural and Industrial Applications*. Philadelphia, PA: Chelsea House Publishers, 2005.

Smith, John E. *Biotechnology*. 4th ed. Cambridge, NY: Cambridge University Press, 2004.

Winston, Mark L. *Travels in the Genetically Modified Zone*. Cambridge, MA: Harvard University, 2004.

Wu, Felicia and William Butz. *The Future of Genetically Modified Crops: Lessons From the Green Revolution*. Santa Monica, CA: RAND, 2004.

<http://www.rand.org/publications/MG/MG161/>

Zhao, Xiaojun and Shuguang Zhang. "Fabrication of Molecular Materials Using Peptide Construction Motifs." *Trends in Biotechnology*, vol. 22, no. 9, September 2004, pp. 470-476.

SITES INTERNET (EN ANGLAIS)

GOVERNEMENT AMÉRICAIN

National Library of Medicine
National Center for Biotechnology Information
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>

National Nanotechnology Initiative
<http://www.nano.gov/>

U.S. Department of Agriculture

Animal Plant and Health Inspection Service
Biotechnology Regulatory Services
<http://www.aphis.usda.gov/brs/index.html>

Economic Research Service
Economic Issues in Agricultural Biotechnology
<http://www.ers.usda.gov/publications/aib762/>

United States Regulatory Oversight in
Biotechnology Responsible Agencies
<http://www.aphis.usda.gov/brs/usregs.html#usda>

U.S. Department of State
Bureau of International Information Programs
http://www.usinfo.state.gov/ei/economic_issues/biotechnology.html

U.S. Environmental Protection Agency
Toxic Substances Control Act Biotechnology Program
<http://www.epa.gov/opptintr/biotech/index.html>

U.S. Food and Drug Administration
Center for Food Safety and Applied Nutrition
<http://www.cfsan.fda.gov/~lrd/biotechm.html>

U.S. Regulatory Agencies Unified Biotechnology Web
Site
<http://usbiotechreg.nbio.gov>

ÉTABLISSEMENTS UNIVERSITAIRES ET DE RECHERCHE

AgBioWorld
<http://www.agbioworld.org>

Agricultural Biology Communicators
U.S. Land Grant Colleges and Universities
<http://agribiotech.info/>

American Institute of Biological Sciences
<http://www.actionbioscience.org/index.html>

American Phytopathological Society
<http://www.apsnet.org/media/ps/>

Center for Global Food Issues
<http://www.cgfi.com>

Cornell University
<http://www.nysaes.cornell.edu/agbiotech>

Council for Agricultural Science and Technology
<http://www.cast-science.org>

Donald Danforth Plant Science Center
<http://www.danforthcenter.org/>

Foresight Nanotech Institute
<http://www.foresight.org/>

Information Systems for Biotechnology
<http://www.isb.vt.edu>

International Service for the Acquisition of
Agri-biotech Applications
<http://www.isaaa.org/>

Iowa State University
<http://www.biotech.iastate.edu/>

National Agricultural Biotechnology Council
<http://www.cals.cornell.edu/extension/nabc>

Pew Initiative on Food and Biotechnology

<http://www.pewagbiotech.org>

University of California Biotechnology Program

<http://ucbiotech.org/>

University of Maryland

Medical Biotechnology Center

<http://www.umbi.umd.edu/~mbc/>

Agricultural Biotechnology

<http://agnic.umd.edu/>

INDUSTRIE

AGBIOS

<http://www.agbios.com/main.php>

Biotech Knowledge Center

<http://www.biotechknowledge.com>

Biotechnology Industry Organization

<http://www.bio.org/>

Council for Biotechnology Information

<http://www.whybiotech.com/>

CropLife America

<http://www.croplifeamerica.org>

ORGANISATIONS INTERNATIONALES

Consultative Group on International Agricultural Research

<http://www.cgiar.org>

EUROPA

(European Commission)

http://www.europa.eu.int/comm/food/food/biotechnology/index_en.htm

European Food Safety Authority

http://www.efsa.eu.int/science/gmo/catindex_en.html

Food and Agriculture Organization

<http://www.fao.org/biotech>

International Food Policy Research Institute

<http://www.ifpri.org/themes/biotech/biotech.htm>

International Rice Research Institute

<http://www.irri.cgiar.org>

International Service for National Agricultural Research

<http://www.isnar.cgiar.org/kb/Bio-index.htm>

Organization for Economic Cooperation and Development

http://www.oecd.org/topic/0,2686,en_2649_37437_1_1_1_1_37437,00.html

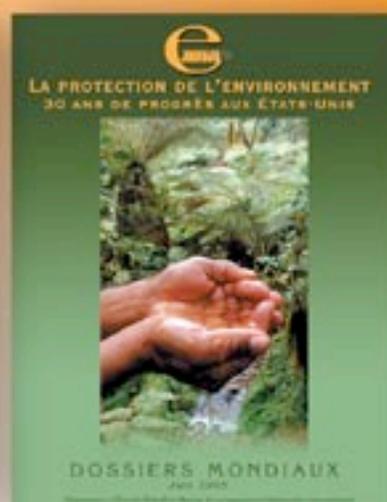
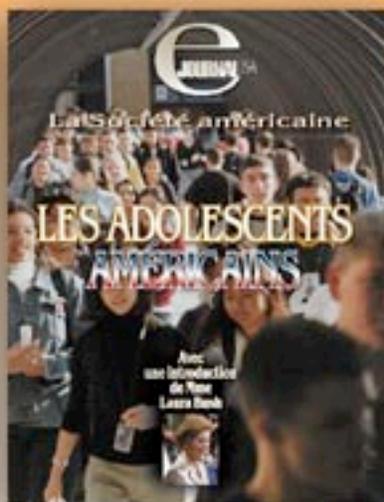
World Health Organization

<http://www.who.int/foodsafety/biotech/en/>

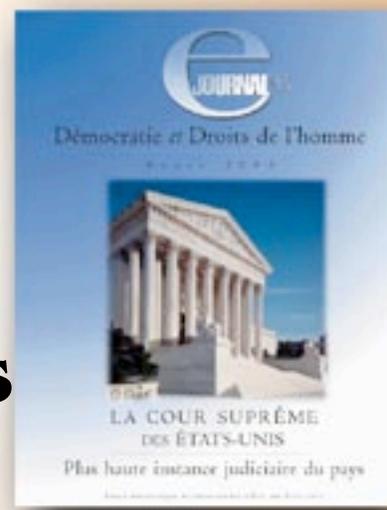
World Intellectual Property Organization

<http://www.wipo.int/tk/en/genetic/index.html>

Le département d'État n'est nullement responsable du contenu ou de l'accessibilité des sites Internet indiqués ci-dessus. Tous ces sites étaient accessibles en octobre 2005.



**UNE
REVUE
MENSUELLE
PROPOSÉE
DANS
DIFFÉRENTES
LANGUES**



CONSULTEZ LA LISTE COMPLÈTE DES TITRES
<http://usinfo.state.gov/journals/journals.htm>