

suspectes des programmes ou analyse des signatures ; il utilise le réseau pour envoyer tout programme suspect à un ordinateur d'administration du réseau.

À la réception d'un programme potentiellement infecté, l'ordinateur d'administration l'envoie à un ordinateur d'analyse de virus qui se comporte comme une «boîte de Pétri» numérique : les programmes de cette machine de test piègent le virus à l'aide de programmes spécialement conçus, nommés «leurres», qui sont exécutés, copiés ou manipulés. Cette phase est particulièrement utile pour faire se découvrir les virus polymorphes. Ces virus sont des virus de macros dont les lignes de programme sont cryptées, de sorte qu'un logiciel antiviral classique est en général incapable de reconnaître sa signature. De plus, lorsqu'ils se dupliquent, les virus polymorphes utilisent un code de chiffrement généré aléatoirement : les signatures sont modifiées à chaque copie. Pour se propager, un virus doit infecter des programmes qui sont souvent utilisés, si bien que l'activité des leurres fait ressortir le code du virus. Ainsi le virus se découvre, et on peut l'éradiquer. Pendant cette phase, on peut aussi comprendre d'autres caractéristiques du virus.

Les leurres infectés sont analysés par d'autres éléments du système immunitaire, qui extraient la signature du virus et fournissent des directives pour le détecter et l'enlever. À partir d'un programme infecté, l'analyste de virus met généralement moins de cinq minutes pour engendrer ses directives. La machine d'analyse envoie cette information à l'ordinateur qui a demandé de l'aide ; ce dernier incorpore l'information dans une base de données perma-

nente contenant les remèdes à utiliser pour les virus connus. Il peut alors localiser et enlever toutes les copies du virus, et il est définitivement protégé de futures rencontres.

Lorsque l'ordinateur infecté est relié à d'autres machines par l'intermédiaire d'un réseau local, il est tout à fait possible que le virus les ait également envahis. Aussi les nouvelles directives de surveillance et d'éradication sont-elles envoyées automatiquement aux ordinateurs voisins, de sorte que chaque machine peut vérifier immédiatement la présence éventuelle du nouveau virus. Puisque les virus informatiques utilisent le réseau pour se répandre rapidement, l'utilisation du réseau fournit l'antidote aux machines qui en ont besoin. En envoyant aux clients d'un site infecté les dernières directives, on peut, en principe, immuniser très rapidement toute la population des ordinateurs contre l'émergence d'un nouveau virus.

Malgré les efforts, les virus informatiques cohabiteront avec nos ordinateurs. Chaque type de virus évoluera à sa façon, mais, collectivement, la coévolution des virus informatiques et des techniques antivirales se poursuivra comme, en biologie, le font les parasites et leurs hôtes. Ces deux composantes évolueront aussi en réaction aux changements de l'environnement informatique. Par exemple, les agents logiciels itinérants devront être protégés des ordinateurs qu'ils traversent, tout comme ces derniers de la malveillance de certains agents logiciels. Peut-être les virus et les systèmes immunitaires informatiques sont-ils les précurseurs d'un riche écosystème de vie artificielle où les proies et les prédateurs vivront, mourront et coopéreront.

Jeffrey KEPHART, Gregory SORKIN, David CHESS et Steve WHITE travaillent au Centre de recherche Thomas Watson de la Société IBM, à Yorktown Heights.

Rogue Programs : Viruses, Worms and Trojan Horses, sous la direction de Lance J. Hoffman, Van Nostrand Reinhold, 1990.

Frederick B. COHEN, *A Short Course on Computer Viruses*, deuxième édition, John Wiley & Sons, 1994.

Robert SLADE, *Robert Slade's Guide to Computer Viruses*, Springer-Verlag, 1994.

Jeffrey O. KEPHART, Gregory B. SORKIN, William C. ARNOLD, David M. CHESS, Gerald J. TESAURO et Steve R. WHITE, *Biologically Inspired Defenses against Computer Viruses*, in *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Montréal, 20-25 août 1995, Morgan Kaufmann Publishers, Inc.

Mark LUDWIG, *Du virus à l'antivirus : guide d'analyse*, Éditions Dunod, 1997.

Des liens vers de nombreux sites qui traitent des virus sont sur notre site Web : <http://www.pourlascience.com>

Le riz génétiquement modifié

PAMELA RONALD

Les biologistes utilisent le génie génétique pour protéger le riz contre les maladies.

Le riz est l'aliment le plus important du Globe : près de deux milliards de personnes ont une alimentation essentiellement à base de cette céréale. Les rizières couvrent plus de 144 millions d'hectares et procurent 560 millions de tonnes de grains par an. Toutefois on ne récolte pas tout le riz qui pousse : les insectes, les bactéries, les virus et les moisissures prélèvent une dîme notable.

La nielle bactérienne, notamment, est un des pires fléaux de l'Asie et de l'Afrique : cette maladie est due à des bactéries *Xanthomonas oryzae*, qui se propagent rapidement par l'intermédiaire de l'eau, de plant à plant, de champ à champ. Une fois infectées, les feuilles se couvrent de lésions, puis jaunissent et se flétrissent en quelques jours. Dans les champs le plus gravement touchés, la nielle détruit jusqu'à la moitié de la récolte.

Cependant les plants de riz possèdent parfois des gènes qui les protègent contre de nombreuses maladies, notamment contre la nielle. Les agriculteurs admettent qu'aucune variété n'a tous les gènes de résistance contre toutes les maladies ; certains plants sont plus résistants que d'autres à certaines maladies, moins à d'autres. Aussi, depuis près d'un siècle, les agronomes cherchent à conférer les performances des variétés rustiques aux variétés cultivées, mais la sélection par la génétique classique est lente, et les sélectionneurs mettent des décennies à transmettre des caractères d'une variété à une autre.

Grâce aux techniques du génie génétique, on introduit aujourd'hui des gènes de résistance directement dans des plants de riz, et l'on gagne ainsi des années de travail. Mes collègues et moi avons récemment cloné le premier de ces gènes de résistance du riz – un gène protégeant contre des formes classiques de nielle –, puis nous l'avons utilisé pour créer des plants résistants.

1. LES PLANTS DE RIZ sont sensibles à de nombreuses maladies, telle la nielle bactérienne, qui se manifeste par des lésions des feuilles et un rendement réduit (à gauche). La maladie se propage par les gouttelettes d'eau contaminée par les bactéries, qui s'introduisent par des lésions des feuilles. En quelques jours, des lésions jaunes se développent sur les feuilles infectées. Les plants les plus jeunes succombent généralement à la maladie, sauf quand ils possèdent des gènes de résistance (à droite).



À la chasse au gène

L'histoire du clonage du premier gène de résistance du riz commence dans un pays en développement. *Oryza longistaminata* est un riz sauvage du Mali, inutilisable en agriculture, parce qu'il donne, avec un faible rendement, des grains insipides ; en revanche, il résiste bien à la nielle bactérienne. En 1977, des agronomes indiens évaluent la résistance de ce plant contre diverses souches de *Xanthomonas oryzae* et observent qu'il résiste à toutes.

L'année suivante, Gurdev Khush et ses collaborateurs de l'Institut international de recherche sur le riz, aux Philippines, commencent à utiliser des techniques de sélection classique, afin de transmettre la résistance d'*Oryza longistaminata* à une variété cultivée. Douze années de travaux débouchent sur une variété résistante, dont la résistance est due à une petite région d'un seul chromosome, peut-être même un seul gène, que l'on nomme *Xa21*.

En 1990, alors que les sélectionneurs récoltent les fruits de ce travail, j'étudie la nielle, à l'Université Cornell. Intéressée par le mécanisme de la résistance, je cherche à cloner la séquence *Xa21* en partant de la variété sélectionnée par l'Institut du riz. Les biologistes étudient très souvent des caractères sur des organismes entiers, mais il est difficile d'étudier des gènes sans les isoler du reste du génome des organismes. En outre, les techniques de génie génétique sont d'emploi plus facile quand on dispose de gènes isolés : on peut alors créer des copies de gènes par les méthodes de clonage.

Pour cloner la séquence *Xa21*, je devais identifier la région précise du génome du riz qui la contenait, puis je devais introduire cette séquence d'ADN dans des bactéries où elle serait propagée ; enfin, je devais introduire des copies de la séquence dans des plants de riz sensibles à *Xanthomonas oryzae* afin de prouver que l'ADN introduit conférerait la résistance à la nielle. Lorsque j'ai commencé ce travail, on connaissait l'existence d'un grand nombre de gènes contre des maladies des plantes ; on les utilisait, même, mais personne n'en avait encore cloné. Les deux difficultés principales étaient l'identification du gène *Xa21*, et sa transmission à des plants de riz qui ne l'avaient pas.

Un gène dans un chromosome est comme une aiguille dans une meule de foin. Or les génomes des plantes sont de très grosses meules. Ils sont également plus difficiles à manipuler que les génomes plus petits (par comparaison, le génome de la bactérie *Escherichia coli*, dont on peut assez facilement isoler des gènes, est 100 fois plus petit que celui d'*Oryza*). Ma quête de *Xa21* aurait pu prendre plusieurs années et nécessiter l'emploi de plusieurs techniques complexes, mais j'ai eu de la chance.

Tout d'abord, les biologistes qui cherchent à isoler des gènes de résistance de certaines autres céréales doivent analyser des génomes plus gros que ceux du riz. Le génome du blé, par exemple, est presque 3 500 fois plus grand que celui d'*Escherichia coli* et au moins cinq fois plus grand que celui de l'homme. Cloner un gène à partir de céréales comme le riz ou le blé est extrêmement difficile si, auparavant, on n'a



pas une vague idée de sa localisation dans le génome ou de sa séquence (il est plus facile de retrouver un ami à Paris si l'on connaît son adresse ou, au moins, son nom de famille et son prénom).

En 1990, toutefois, j'ai jugé que le clonage de la séquence *Xa21* était possible, car Steven Tanksley et Susan McCouch, à l'Université Cornell, venaient d'établir une carte qui pouvait guider l'exploration de l'énorme génome du riz. La technique de clonage que j'ai utilisée est « cartographique » : comme son nom l'indique, elle nécessite de connaître approximativement la position de repères, ou marqueurs, sur l'ADN. La carte génétique élaborée par S. Tanksley et S. McCouch indiquait l'existence de plusieurs centaines de marqueurs utiles sur les douze chromosomes du riz.

Pendant quelques années, nous avons utilisé cette carte pour pister *Xa21*. Nous avons examiné plus d'un millier de plants de riz, afin de mesurer à quelle fréquence les marqueurs connus de l'ADN étaient couplés avec une résistance à la nielle bactérienne. Nous examinions les échanges et les réarrangements entre chromosomes qui ont lieu au cours de la reproduction sexuée : plus deux sites sont proches sur un chromosome, moins ils ont de chances d'être séparés pendant la recombinaison génétique qui accompagne la reproduction sexuée. Ainsi plus la fréquence de transmission d'une résistance couplée à celle d'un marqueur donné était élevée, plus le gène de résistance devait être proche de ce marqueur.

Par un extraordinaire coup de chance, le premier marqueur chromosomique dont nous avons montré la proximité de *Xa21* fut particulièrement utile. Un dimanche de mai 1994, deux ans après avoir créé mon laboratoire à

l'Université de Davis, je découvris que la séquence du marqueur était identique à celle de nombreux gènes de résistance récemment clonés à partir de plants de tabac, de tomate, de lin et de moutarde. Seule au laboratoire ce matin-là, j'appelai mon collègue et ami John Salmeron, de l'Université de Berkeley, et lui demandai de comparer minutieusement ma séquence avec celle de son gène de résistance de tomate. Nous étions surpris et excités de trouver tant de ressemblances entre des gènes de plantes aussi différentes.

Avec mon équipe, nous avons alors passé toute l'année qui a suivi à cloner des séquences qui pouvaient être la séquence *Xa21* que nous cherchions et à préparer leur insertion dans des plants de riz. Nous savions que le test décisif serait le transfert de la séquence isolée dans un plant de riz normalement sensible à *Xanthomonas oryzae* : si nous avions cloné le bon gène, les plants transgéniques obtenus seraient résistants à la nielle bactérienne. Nous étions impatients de commencer ces expériences, mais nous devions résoudre un problème de taille : nous ne savions pas introduire des gènes dans des cellules de riz, et très peu de laboratoires savaient pratiquer ce procédé de « transformation » du riz.

Dans la ligne de mire

Le transfert de gènes dans des cellules de plantes est une opération difficile : de nombreux types de cellules végétales sont réfractaires à l'incorporation d'ADN étranger. Toutefois, en 1987, à l'Université Cornell, John Sanford mit au point un canon capable de projeter des particules microscopiques dans des cellules intactes (voir *Les plantes transgéniques*, par Charles Gasser et Robert Fraley, *Pour La Science*, août 1992). Les premiers prototypes de J. Sanford fonctionnaient à la poudre noire, mais les modèles ultérieurs utilisaient de l'hélium comprimé pour tirer de petites billes d'or d'un diamètre inférieur au centième de millimètre ; recouvertes d'ADN, elles apportaient ainsi l'ADN au cœur des cellules.

En 1991, personne n'avait encore appliqué cette technique au riz, mais, quand nous fûmes prêts à tester nos séquences clonées, le Laboratoire international de biotechnologie agricole tropicale accepta de nous aider : une équipe utilisa le canon de J. Sanford pour transformer des cellules de riz de

2. LES MÉTHODES CLASSIQUES DE SÉLECTION ne procurent que très lentement des variétés de riz résistant aux maladies. Quand on féconde un plant sensible à une maladie, mais qui possède un caractère utile (production d'un nombre élevé de grains ou bien de grains à goût agréable), avec le pollen d'un plant résistant, les descendants reçoivent un mélange aléatoire du matériel génétique des deux parents (*barres colorées*). Si l'on croise ensuite les descendants résistants avec le plant sensible initial, on obtient des descendants qui possèdent en proportion supérieure des caractères utiles des parents d'origine. À chaque croisement, la sélection des descendants résistants garantit la présence du gène de résistance (ici le gène *Xa21*).

la variété *Taipei 309* (une variété ancienne qui n'est plus cultivée, mais que nous avons choisie, car elle est sensible à la bactérie *Xanthomonas oryzae* et facilement transformable) avec notre ADN cloné. Nous avons cultivé 1 500 plants transformés ; chacun contenait dans son génome l'ADN cloné. Après six semaines de culture, nous avons testé leur résistance à la nielle bactérienne.

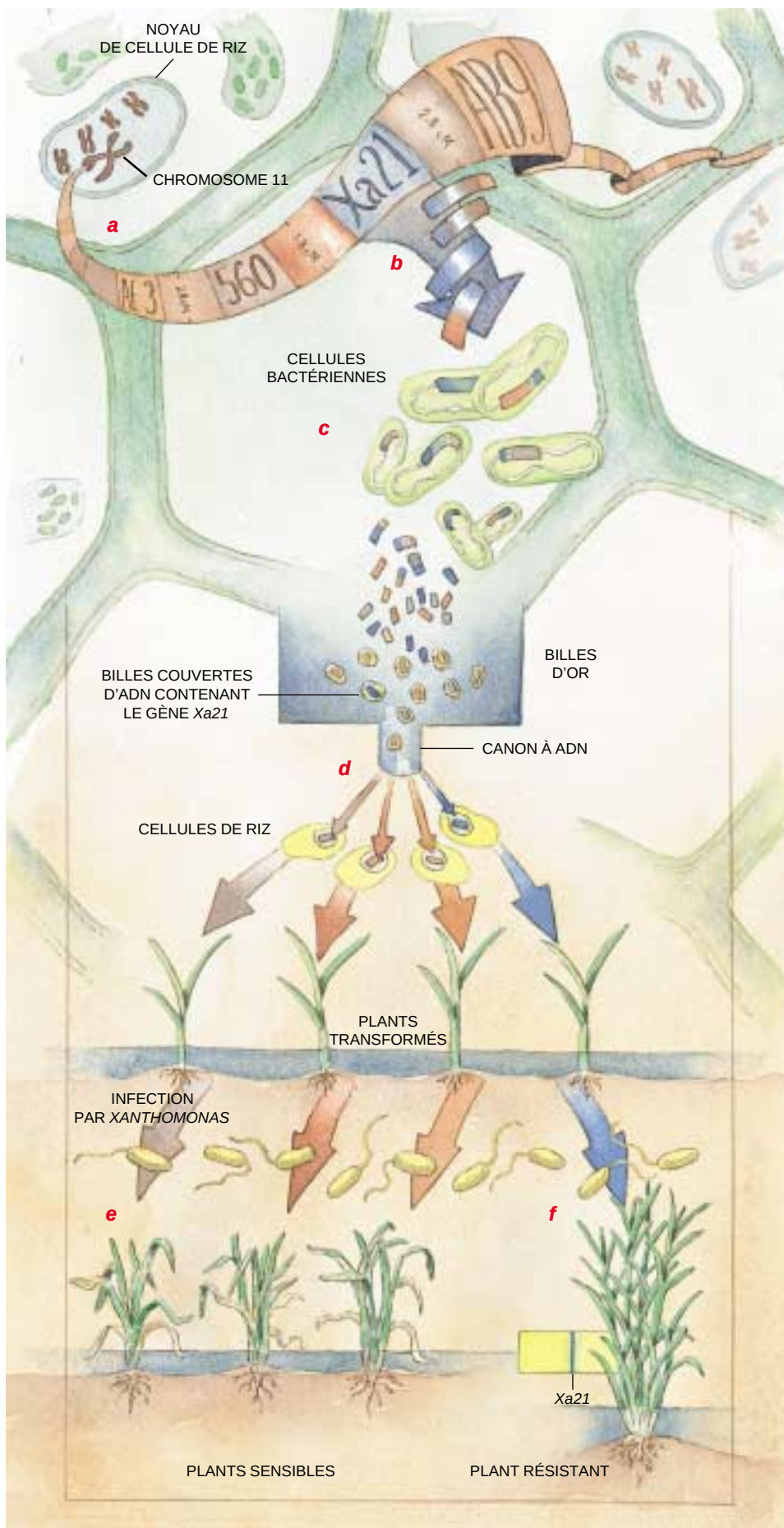
Nous avons infecté chaque plant transgénique en taillant ses feuilles à l'aide de ciseaux préalablement trempés dans une suspension bactérienne. Puis, dix jours plus tard, nous avons examiné les plants à la recherche de lésions dues aux bactéries. Cinquante des 1 500 plants transgéniques étaient résistants : leurs lésions étaient 75 à 90 pour cent plus réduites que celles des plants non transformés. Dans chacun des 50 plants résistants, le segment d'ADN transformé contenait un gène intact de résistance à la nielle.

La résistance distribuée

Ayant ainsi cloné la séquence *Xa21*, nous avons montré qu'elle se transmettait dans la descendance des plants transgéniques par autofertilisation. Nous avons soumis nos plants transgéniques à l'action de 31 souches différentes de *Xanthomonas oryzae* provenant de huit pays, d'Asie, d'Afrique et d'Amérique latine. Les plants résistèrent à l'infection par 29 de ces souches, exactement comme le riz sauvage africain.

Nous cherchons maintenant à introduire la séquence *Xa21* dans des variétés qui, contrairement à *Taipei 309*, sont importantes sur le plan agricole. En collaboration avec le Laboratoire international de biotechnologie agronomique tropicale, nous avons introduit la séquence *Xa21* dans deux variétés courantes – *IR64* et *IR72* – cultivées sur

3. LE GÉNIE GÉNÉTIQUE permet de transmettre une résistance à une maladie quand on connaît les gènes responsables de cette résistance. Pour isoler le gène *Xa21*, l'auteur a déterminé sa position approximative sur le chromosome 11 du riz (a), puis a fabriqué des segments d'ADN qui comprenaient cette région (b). L'ADN a ensuite été reproduit dans des bactéries (c), les copies ont été placées sur de petites billes en or, puis projetées dans les cellules de variétés de riz sensibles (d). Certaines cellules ont intégré l'ADN introduit, mais pas le gène de la résistance (e) ; quelques-unes seulement ont effectivement intégré dans leur génome le gène *Xa21* intact et ont formé ultérieurement des plants résistants (f).



environ neuf millions d'hectares en Asie et en Afrique. Nos nouveaux plants transgéniques résistent à la nielle. De même, nous avons communiqué la résistance à la variété *Ming Hui 63*, cultivée en Chine.

Simultanément, nous avons envoyé la séquence *Xa21* à de nombreux biologistes d'Europe, d'Afrique, d'Asie et des États-Unis, afin qu'ils fassent eux-mêmes l'insertion dans les variétés de riz locales, mieux adaptées aux conditions de culture des diverses régions du Globe. Ces variétés possèdent de précieuses qualités, telles que résistance à la sécheresse, tolérance au froid, petite taille (pour résister au vent), ou résistance à des maladies et à des fléaux locaux. Les versions génétiquement modifiées seront identiques aux plants d'origine, à l'exception du transgène cloné, qui confère la résistance à la nielle bactérienne.

Les agronomes devront ensuite tester l'intérêt des variétés transgéniques, afin de déterminer si les modifications n'ont pas réduit les rendements, le goût des grains ou la robustesse des plants ; si les variétés transformées se comportent aussi bien que les variétés initiales de chaque région, des programmes de reproduction pourront être mis en place. Le gène de résistance à la maladie étant transmissible, les fermiers des pays en développement recevront des semences qu'ils feront eux-mêmes pousser pour obtenir leurs propres semences pour la saison suivante.

Les récoltes du futur

Le génie génétique est bien plus rapide et flexible que la sélection classique : quelques mois de travail procurent des variétés améliorées, à condition que l'on ait initialement cloné les gènes utiles que l'on veut introduire. Aucune compatibilité n'est requise entre donneur et receveur : les gènes peuvent provenir de variétés, voire d'espèces différentes.

Aujourd'hui on peut protéger contre la nielle d'autres céréales que le riz. Une espèce de *Xanthomonas* infecte la plupart des cultures. En Floride, 99 pour cent des cultures d'arbres du genre *Citrus* y sont sensibles : les planteurs doivent surveiller de très près les infections bactériennes pour éviter les épidémies et, au milieu des années 1980, ils ont dû brûler plus de 20 millions d'orangers pour écarter tout risque d'épidémie. L'État américain a dépensé plus de 200 millions de francs pour éradiquer la maladie, et les pertes de production qui ont touché des centaines de producteurs ont été encore supérieures. Protégera-t-on les citronniers et les autres cultures en manipulant les gènes de résistance à la nielle bactérienne du riz ?

Le génie génétique peut également aider les agriculteurs à lutter contre

des maladies qui menacent les plants résistants en champ : après des mutations, certains agents pathogènes vainquent les défenses des plantes, de sorte que les producteurs doivent en permanence identifier les gènes utiles et les introduire, aussi bien par les techniques classiques que par génie génétique, afin de minimiser la sensibilité aux maladies. Comme on connaît aujourd'hui de nombreux gènes de résistance, on peut les cloner et, éventuellement, trouver des combinaisons de gènes qui conféreront une résistance renforcée ; de même, des combinaisons d'antibiotiques ou de médicaments antiviraux combattent plus efficacement que des médicaments isolés des micro-organismes tels que les bactéries de la tuberculose ou le virus de l'immunodéficience humaine.

Nous espérons également faire acquérir, en une seule transformation, une résistance à plusieurs agents pathogènes. Il arrive que des agriculteurs ne puissent pas utiliser des variétés de riz dotées de la résistance à la nielle bactérienne parce qu'elles ne résistent pas à d'autres agents pathogènes qui sévissent localement. L'un des plus graves fléaux est le criquet brun, un insecte qui cause des ravages considérables aux plants de riz dont il se nourrit, transmettant du même coup des agents pathogènes tels que les virus du rabougrissement. Nous collaborons avec des collègues chinois et anglais pour introduire une double résistance à la nielle bactérienne et au criquet brun dans plusieurs variétés importantes de riz, grâce à des gènes clonés, dont *Xa21*. Actuellement les biologistes clonent de plus en plus de gènes de résistance, et le nombre des combinaisons possibles s'accroît donc de façon exponentielle.

Les plantes transgéniques résistant aux maladies sont prometteuses. Bien que les agriculteurs n'en cultivent pas encore,



4. DES FEUILLES DE RIZ exposées à la bactérie *Xanthomonas oryzae* résistent à l'infection quand elles possèdent le gène *Xa21*, aussi bien dans notre variété transgénique *Taipei* (paire de gauche) que dans des plants sélectionnés de façon classique (paire de droite). D'importantes lésions jaunes (paires du centre) apparaissent sur les feuilles des plants sensibles qui sont infectées.

Pruniers et virus

Le maïs est la première plante génétiquement modifiée autorisée à la culture en France : c'est la preuve que les autorités ont accepté l'application du génie génétique pour l'amélioration des plantes. À Bordeaux, nous avons appliqué cette méthode à la lutte contre une maladie virale, la sharka.

Cette maladie, qui frappe surtout les arbres fruitiers à noyau (abricotiers, cerisiers, pêcheurs et pruniers), a été découverte en Bulgarie (en bulgare, son nom signifie «variole»), et elle s'est rapidement propagée dans tous les pays voisins. Les pays d'Europe centrale et les pays balkaniques en sont des foyers endémiques. La France a aujourd'hui une politique d'éradication très stricte : tout fruitier malade est arraché.

L'agent pathogène est un virus nommé plum pox virus (PPV). Les maladies à virus sont graves, parce que les plantes ne guérissent pas. Sélectionner des variétés résistantes semblait une démarche longue et incertaine, d'autant que l'on doutait de la nature monogénique ou polygénique des résistances. Entre temps, les arboriculteurs choisissaient des variétés fruitières tolérantes, dont la production fruitière n'est pas amoindrie par la maladie, mais qui propagent le virus.

Les progrès réalisés dans l'analyse du génome viral nous ont conduit à mettre en place une nouvelle stratégie de lutte, fondée sur la transgénèse, et qui consiste à intégrer le gène codant la protéine de capsid (l'«enveloppe») d'un virus, dans le génome d'une plante, afin de

produire des plantes résistantes. L'origine du travail est lié à l'identification de ce gène de capsid virale : nous avons découvert qu'une grosse protéine virale est traitée, après sa synthèse, par trois enzymes virales afin de former dix protéines, dont la protéine de capsid. C'est le gène qui code cette dernière qui nous intéressait. Nous l'avons identifié, puis intégré dans la bactérie *Agrobacterium tumefaciens*, en 1992.

Puis nous avons utilisé la bactérie transformée pour modifier la plante hôte herbacée *Nicotiana benthamiana*, au cycle végétatif court. Nous avons ainsi observé que le gène transféré conférait la résistance contre la sharka. Encouragés par ce succès, nous sommes passé aux plantes ligneuses : en collaboration avec Ralph Scorza, des services agronomiques américains, nous avons transformé des cellules de prunier avec les bactéries génétiquement modifiées. Des cals se sont développés sur un milieu de régénération, puis les cals se sont différenciés en plantules. L'inoculation des pruniers par les virus de la sharka a révélé leur résistance : le virus ne se réplique pas dans la plante, parce que les cellules de la plante rejettent le transgène et le virus envahisseur. Les pruniers résistants ont été plantés dans divers pays frappés par la sharka ; les résultats de ces essais devraient permettre de valider la résistance de ces plantes dans les conditions naturelles d'infection.

Michel RAVELONANDRO

Station de pathologie végétale INRA, Bordeaux

des sociétés américaines entreprennent la commercialisation de diverses plantes transgéniques. Par exemple, la Société *Calgene* a produit la première tomate à pourrissement retardé (la tomate *Flavr Savr*), et un soja résistant à l'herbicide *Roundup* est commercialisé depuis 1996. Enfin, un maïs résistant aux herbicides a récemment reçu une autorisation de mise sur le marché aux États-Unis et au Canada.

Les pays industrialisés seront sans doute les premiers à profiter des produits transgéniques, car les agriculteurs des pays en développement n'ont généralement pas les moyens d'utiliser des techniques qui imposent l'emploi d'herbicides coûteux. En revanche, les pays industrialisés comme les pays en développement accepteront sans doute mieux les graines transgéniques résistant aux maladies que les plantes transgéniques résistant aux herbicides ou produisant des insecticides (on craint que ces dernières ne favorisent rapidement l'apparition d'insectes résistant aux insecticides).

Les promesses commerciales des

cultures transgéniques résistant aux maladies soulèvent des questions de propriété. En 1996, l'Université de Davis a créé un fonds international pour reconnaître la contribution des pays en développement au succès des programmes de recherche tel le clonage de la séquence *Xa21*, breveté par l'université. Financé par les revenus tirés de la commercialisation des plantes transgéniques dans le Tiers-Monde, ce fonds subventionne les études dans les pays en développement et garantit que les planteurs de ces régions obtiendront des semences transgéniques au même prix que des semences classiques. Le fonds

permettra ainsi aux chercheurs de l'université de breveter leurs inventions et de les convertir en produits commerciaux, tout en reconnaissant la valeur des contributions du Tiers-Monde.

Les possibilités du génie génétique sont bien supérieures à la transmission de gènes de résistance aux maladies. Elles devraient permettre le clonage de nombreux gènes végétaux utiles, tel le gène de la tolérance au froid ou à la sécheresse. Les biologistes disposent d'une palette très large : en y puisant, ils permettront aux agriculteurs de récolter davantage à partir de ce qu'ils auront semé.

Pamela RONALD est professeur adjoint de biologie végétale à l'Université de Davis.

G. SCHUMANN, *Plant Diseases : Their Biology and Social Impact*, American Phytopathological Society, 1991.

Peter T. WHITE, *Rice, the Essential Harvest*, in *National Geographic*, vol. 185, n° 5, pp. 48-79, mai 1994.

B.J. STASKAWICZ et al., *Molecular Genetics of Plant Disease Resistance*, in *Science*, vol. 268, pp. 661-667, 5 mai 1995.

Wen-Yuan SONG et al., *A Receptor Kinase-like Protein Encoded by the Rice Disease Resistance Gene, Xa21*, in *Science*, vol. 270, pp. 1804-1806, 15 décembre 1995.

B. BAKER et al., *Signaling in Plant-Microbe Interactions*, in *Science*, vol. 276, pp. 726-733, 2 mai 1997.

Zimbabwe, cité africaine

WEBBER NDORO

Du XII^e au XVII^e siècle, la cité de Zimbabwe fut le principal centre commercial d'Afrique australe. Les colons européens, niant le passé de l'Afrique, en ont effacé de nombreuses traces.

Le plus beau et le plus grand site archéologique de l'Afrique subsaharienne est à la limite Sud du plateau du Zimbabwe, dans la zone de partage des eaux entre les fleuves Limpopo et Zambèze : une haute tour conique, de longs murs circulaires en pierre et des objets provenant d'Asie témoignent de la prospérité ancienne de la ville qui domina le commerce et la vie culturelle du Sud de l'Afrique entre le XII^e et le XVII^e siècle. La civilisation qui s'est développée à Zimbabwe a produit une architecture et des sculptures caractéristiques, tels ces énigmatiques oiseaux, taillés dans la stéatite, que l'on ne retrouve nulle part ailleurs. C'est en mémoire de ce passé prestigieux que le nom de Zim-

babwe a été donné à l'ex-Rhodésie, lors de l'accession à l'indépendance de cette colonie britannique, en 1980.

Zimbabwe est entré dans la légende. Au XVI^e siècle, des marchands portugais qui reviennent de leur visite des comptoirs fondés en Angola et au Mozambique mentionnent un royaume à l'intérieur de l'Afrique : s'agit-il d'Ophir où, selon la Bible, le roi Salomon avait envoyé ses vaisseaux s'approvisionner en or ? En 1667, dans son *Paradis perdu*, le poète anglais John Milton place d'ailleurs Ophir quelque part entre le Congo et l'Angola. Cette légende tenace, qui attribuait la construction de Zimbabwe à des populations sémites, a longtemps gêné l'étude archéologique de la cité ; puis le colo-

nialisme a empêché de reconnaître que la ville avait été créée par la culture shona, à l'Âge du fer africain.

Le contrôle de l'or

Construit entre 1100 et 1600, Zimbabwe ne semble pas avoir eu de plan directeur : la cité s'est adaptée aux évolutions de ses activités et de sa population. Beaucoup plus grand que les autres sites de la région, tels Danamombe, Khami, Naletale ou Domboshava, au Nord du Botswana, Manikweni, au Mozambique, ou Thulamela, au Nord de l'Afrique du Sud, Zimbabwe était une capitale économique et politique, sur la route la plus directe entre les gisements d'or du Nord, où les orpailleurs tamisaient

1. LES RUINES DE ZIMBABWE, sur le plateau de Zimbabwe, témoignent d'une civilisation et d'une culture florissante entre le XII^e et le XVII^e siècle. Les constructions les plus imposantes sont le Grand Enclos (au centre) et les ruines de la colline (en haut à gauche).