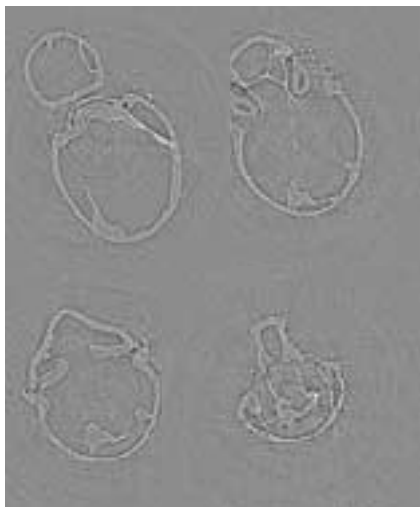
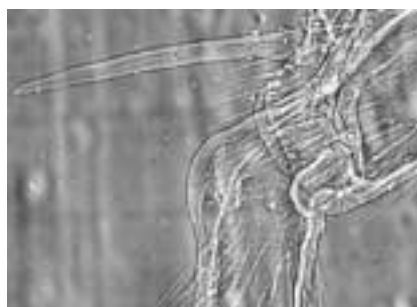




Analyt Sngirev, European Synchrotron Radiation Facility



6. LE GENOU D'UN MOUSTIQUE, vu au microscope à rayons X en contraste de phase, révèle des détails anatomiques de l'ordre de quelques micromètres, malgré l'absence de matériaux aussi denses que les os des vertébrés. À partir d'images prises sous différents angles, on reconstruit des coupes transversales du genou du moustique (à gauche).

court, et de suivre ainsi le comportement dynamique de molécules biologiques. Depuis les travaux de Max Perutz, à Cambridge, dans les années 1930 et 1940, on sait reconstituer, par diffraction des rayons X, la structure géométrique de molécules biologiques, telles les protéines, qui contiennent des milliers d'atomes. Cependant, les images obtenues sont statiques et n'apportent aucune information sur les réarrangements structuraux qui se produisent pendant que les molécules accomplissent leur fonction biologique.

Comment voir les molécules «bouger»? Le rayonnement X de l'ESRF est si brillant qu'une seule impulsion renferme assez de photons pour l'obtention d'un cliché de diffraction à partir duquel on reconstruit une protéine. Pour suivre les réarrangements structuraux de la myoglobine (une protéine des muscles qui absorbe et qui stocke l'oxygène) au cours de la libération d'une molécule d'oxygène et de la fixation d'une autre, Michael Wulff et Keith Moffat ont utilisé un laser afin de couper la liaison chimique entre l'oxygène (en fait, pour cette expérience, le monoxyde de carbone, qui se détache plus facilement de la myoglobine) et la myoglobine. Après cette impulsion laser, ils ont enregistré, avec un intervalle de temps variable à chaque expérience, un cliché de diffraction aux rayons X.

En remettant dans l'ordre chronologique les différentes positions de la molécule de myoglobine déduite de ces clichés cristallographiques, ils ont obtenu un film d'une milliseconde, qui montre que, quelques nanosecondes après le début de la réaction, la molécule de monoxyde de carbone est distante de 40 nanomètres de l'atome de fer de la

myoglobine auquel elle était initialement liée. En outre, à cet instant, le monoxyde de carbone a tourné de 90 degrés par rapport à son orientation initiale. Le monoxyde de carbone peut rester dans cette position d'«attente» durant des centaines de nanosecondes jusqu'à ce que s'établisse une configuration de l'environnement qui lui permet de quitter la protéine et qui le rend disponible pour participer aux réactions chimiques produisant l'énergie nécessaire à la contraction musculaire.

Tous les exemples que nous avons présentés sont les prémices de nouveaux développements techniques : de nombreuses heures de travail seront encore nécessaires avant que l'on utilise de telles méthodes en routine. L'un des éléments qui le permettrait serait un accroissement supplémentaire de la brillance des sources de rayons X. Les ingénieurs imaginent déjà les machines qui produiraient des brillances plusieurs dizaines de fois supérieures à celles dont on dispose aujourd'hui : des lasers à électrons libres, qui sont construits autour d'ondeurs très longs où les photons engendrés en amont interagissent avec des impulsions d'électrons et stimulent l'émission cohérente d'autres photons.

Massimo ALTARELLI dirige le synchrotron *Elettra*, à Trieste. Fred SCHLACHTER travaille dans l'équipe de l'ALS, à Berkeley. Jane CROSS est écrivain scientifique.

Herman WINICK, *Le rayonnement synchrotron*, in *Pour la Science*, janvier 1988.

Malcolm R. HOWELLS, Janos KIRZ et David SAYRE, *Les microscopes à rayons X*, in *Pour la Science*, avril 1991.

Ce magazine vous intéresse !



Vous y trouverez :

- ☐ Sciences-actualités
- ☐ L'actualité en astronomie
- ☐ Les actualités biomédicales
- ☐ Nouvelles de l'environnement
- ☐ Le texte intégral des conférences du samedi
- ☐ Le commentaire des expositions permanentes et temporaires
- ☐ Le programme des activités du Palais de la découverte

Je souscris un abonnement à la

REVUE DU PALAIS DE LA
DÉCOUVERTE

Je joins mon règlement par chèque
à l'ordre du

PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
(CCP 9065 48 J PARIS)

Tarif France : 170 F (10 numéros par an)

Tarif étranger : 200 F

par mandat international uniquement
(par avion, supplément de 80 FF)

Abonnement de soutien : 230 F

Nom (M., Mme, Mlle) :

Prénom :

Adresse :

.....

Ville :

Code postal :

Profession :

à retourner avec votre règlement à
Revue du PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
Av. Franklin-D.-Roosevelt - 75008 Paris.
Tél. : 01 40 74 80 00

La fabrication d'insectes utiles

DAVID O'BROCHTA
PETER ATKINSON

1. LES INSECTES TRANSGÉNIQUES, tels ces cinq moustiques *Aedes aegypti*, acquièrent parfois de nouvelles caractéristiques. Les individus normaux (*en haut*) ont des yeux de couleur noire, résultant de la présence d'une grande quantité de pigment rouge. Une version mutante de cet animal a des yeux blancs (*en haut, à droite*),

parce qu'elle ne possède pas l'enzyme nécessaire à la synthèse du pigment rouge. Le caractère «œil blanc» est modifié par l'insertion du gène codant l'enzyme manquante. Les moustiques ainsi obtenus produisent suffisamment de pigment pour avoir des yeux roses.

On modifie le génome d'insectes afin d'éradiquer des maladies infectieuses qui ravagent la population humaine et l'agriculture.

Un extraterrestre qui viendrait sur la Terre reconnaîtrait certainement que l'homme est l'espèce dominante de la planète. Cependant, après quelques observations sur le terrain qui lui montreraient que les individus appartiennent à des espèces qui se regroupent en genres, en familles, en ordres, en classes, en embranchements et en règnes, il placerait probablement en première position la classe des insectes : on en a identifié plus d'un million d'espèces, soit les cinq sixièmes de l'ensemble des espèces présentes sur la Terre, et les entomologistes pensent qu'il en reste trois millions encore inconnues. Les insectes ont une importance économique considérable (certains pollinisent les récoltes, par exemple ; d'autres les ravagent), et leur rôle en santé humaine n'est pas moindre.

Quelques espèces d'insectes, tels les hématophages (étymologiquement, «qui mangent du sang»), propagent des maladies animales, mais aussi des maladies humaines souvent mortelles, telles que le paludisme, la fièvre jaune, les trypanosomiasés et la dengue. Le paludisme frappe près de 300 à 500 millions de personnes par an, et il en tue 1,5 à 2,7 millions. Environ 200 000 personnes contractent la fièvre jaune chaque année, et 30 000 en meurent. Près de 50 millions de personnes contractent la dengue chaque année ; la mortalité atteint 15 pour cent en l'absence de traitement. Dans de nombreux pays en développement, des infections débilitantes telles que la dysenterie sont transmises par des insectes, y compris la mouche commune.

Aujourd'hui, les systèmes de santé publique luttent contre ces maladies de trois façons : la désinsectisation totale des zones infestées, l'utilisation de répulsifs chimiques (insecticides) et physiques (moustiquaires), et la mise au point de vaccins. La désinsectisation a donné de bons résultats dans certaines régions ; les répulsifs sont médiocrement efficaces, et les vaccins restent insuffisamment nombreux. À ces trois moyens de lutte, peut-on en

ajouter un quatrième, qui consisterait à éviter la transmission de la maladie par les insectes ?

Les morsures d'insectes, en elles-mêmes, ont peu de conséquences sur la santé : seuls les virus, les protozoaires ou les filaires (des vers fins et plats) qu'ils transmettent sont les agents pathogènes. Peut-on éviter leur transmission ?

Dès les années 1960, au Collège d'hygiène et de médecine tropicales de Londres, Chris Curtis proposa l'éradication du paludisme par la transformation génétique de son vecteur, les moustiques du genre *Anophèle*, en une forme qui ne transmettrait pas les protozoaires *Plasmodium*, vrais responsables de la maladie. On connaît des moustiques naturellement réfractaires au *Plasmodium* ou incapables de le transmettre. Les techniques actuelles de génie génétique permettront bientôt la mise en œuvre des idées de C. Curtis : on sait aujourd'hui intégrer le matériel génétique d'une espèce dans l'ADN d'individus d'autres espèces et modifier ainsi les caractéristiques des espèces receveuses. Les plantes ou les animaux ainsi obtenus sont dits transgéniques.



3. LA MOUCHE DES FRUITS de gauche a retrouvé la couleur naturelle de ses yeux par transgénèse. Les mutants aux yeux blancs (à droite) produisent le pigment rouge, mais ce dernier n'est pas transporté jusque dans les yeux. La mouche aux yeux rouges (à gauche) a reçu une séquence génétique nommée *piggyBac*, à laquelle on avait ajouté le gène qui assure le transport du pigment vers les yeux. La séquence *piggyBac* est un transposon : elle s'est spontanément intégrée au génome.



2. LES MOUCHES DES FRUITS ravagent les récoltes de café en attaquant les cerises du caféier. On utilise la transgénèse pour lutter contre ce type de fléau. Les méthodes génétiques de lutte contre la mouche des fruits, appliquées dans l'ensemble des pays producteurs, permettent déjà des économies s'élevant à plusieurs milliards de francs par an.

Les insectes transgéniques auraient bien d'autres applications que la médecine. L'insertion de gènes codant des produits utiles dans le génome de vaches et de chèvres a déjà permis la création d'animaux produisant des médicaments dans leur lait. Appliquée aux insectes, la technique des organismes transgéniques modifierait fondamentalement l'agriculture et la synthèse de certaines matières, par exemple le plastique.

Des gènes sauteurs

Dans les années 1960, les entomologistes utilisaient davantage la transgénèse pour analyser les gènes que pour des applications techniques. Pour modifier les génomes, on injectait de l'ADN dans un œuf d'insecte ou l'on plongeait

des œufs dans une solution d'ADN. Ces techniques étaient très inefficaces.

Puis, dans les années 1980, à l'Institut Carnegie de Washington, Gerald Rubin et Alan Spradling ont étudié chez les insectes d'étranges segments d'ADN nommés éléments transposables, ou transposons, qui se séparent continuellement des chromosomes et se ressouident à des chromosomes voisins. Ces «gènes sauteurs» avaient été découverts dans les années 1940 par la généticienne Barbara McClintock (prix Nobel en 1983 pour cette découverte).

Le transposon qu'ont étudié G. Rubin et A. Spradling provenait du génome de la mouche du vinaigre, *Drosophila melanogaster*. Sans impact sur l'agriculture, cette mouche est couramment utilisée dans les laboratoires de génétique depuis 70 ans.

Compte tenu de la propension des transposons à s'intégrer aux chromosomes, les généticiens ont eu l'idée d'y fixer le gène étranger destiné à la mouche. Ils ont alors introduit dans une cellule un transposon modifié qui s'est intégré à son chromosome, créant ainsi une mouche *Drosophila melanogaster* transgénique.

Le transposon de la drosophile, l'«élément P», avait été découvert dans les années 1970, lorsque les généticiens ont étudié les anomalies de développement, les mutations et les chromosomes de descendance issus de croisements entre des mâles d'une population et des femelles d'autres populations. Comme les entités génétiques en cause provenaient exclusivement de la lignée paternelle, elles ont été surnommées facteurs P. Identifié finalement comme étant un transposon, le facteur P a été renommé élément P ; il a servi d'outil pour l'étude des gènes isolés de la drosophile et leurs effets.

Malheureusement, en 1986, l'un de nous (D. O'Brochta) et son collègue Alfred Handler ont montré que l'élément P ne s'insère pas facilement dans d'autres espèces ; il n'a donc qu'une faible valeur pratique.

Les biologistes ont alors recherché des transposons fonctionnels dans des cas plus généraux. La plupart des chercheurs croyaient qu'il fallait s'en tenir à ce qui avait déjà fait ses preuves et chercher des transposons ressemblant à l'élément P : des éléments transposables à courte séquence inversée répétée. Notre laboratoire a mis au point des techniques de détermination rapide des capacités d'intégration

d'un transposon dans l'ADN d'une espèce d'insecte. Les premières tentatives avec des transposons ayant des structures similaires à celle de l'élément P ont confirmé la pertinence du choix de rester en terrain connu.

En 1995, Charalambos Savakis et ses collègues de l'Institut crétois de biologie moléculaire et de biotechnologie ont inséré avec succès un nouveau gène dans la mouche des fruits grâce à un transposon nommé *Minos*, isolé à partir de *Drosophila hydei*. Ils ont créé ainsi la première version transgénique de cette mouche. Elle avait des yeux rouges, alors que les individus

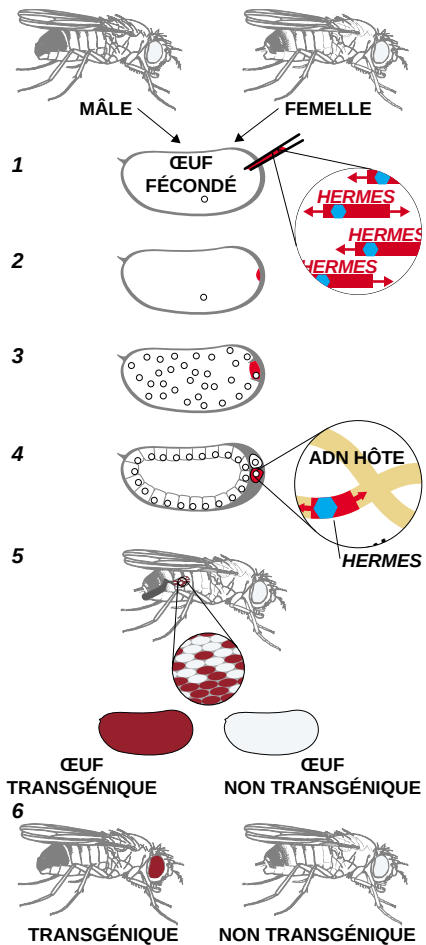
naturels possèdent des yeux incolores. Par la suite, A. Handler et ses collègues ont transféré à des mouches des fruits à l'œil non pigmenté le gène codant la pigmentation des yeux en utilisant un transposon nommé *piggyBac*, issu d'une chenille, l'arpeuteuse du chou.

En 1998, Anthony James et ses collègues de l'Université de Californie ont effectué deux transformations chez le moustique *Aedes aegypti*, qui transmet la fièvre jaune et la dengue. La transformation de cet insecte donne aux généticiens l'espoir de bientôt désarmer ce vecteur de maladie. Tout d'abord, les généticiens ont modifié *Aedes aegypti* à l'aide d'un transposon nommé *Hermes*, isolé de la mouche domestique. Contrairement à l'élément P, *Hermes* est un vecteur efficace pour la création de toute une variété d'insectes transgéniques, des papillons aux moustiques. Son utilisation permet de mieux comprendre la biochimie de la mobilité et de la régulation des transposons. A. James et son équipe ont ensuite incorporé dans *Aedes aegypti* un transposon nommé *Mariner*, isolé à partir de la mouche du vinaigre *Drosophila mauritiana*. Le seul effet a été, une fois de plus, la modification de la couleur des yeux.

Barry Beaty et ses collègues de l'Université du Colorado ont alors complété ces travaux en bloquant la prolifération du virus de la dengue dans *Aedes aegypti*. Plus précisément, ils ont infecté ce moustique à l'aide d'un virus porteur d'un gène qui empêche la réplication du virus de la dengue dans les glandes salivaires du moustique. L'infection par le virus de la dengue est ainsi bloquée ; une piqûre de ce moustique est inoffensive.

Ces recherches montrent la faisabilité de la transformation génétique des insectes. Comment assurer ensuite la dissémination des gènes introduits ? Il serait trop long d'attendre que quelques individus modifiés engendrent des descendants.

En revanche, les transposons permettent la création rapide d'une population entière d'insectes portant tous le gène introduit : en raison de leur propension à sauter d'un chromosome à un autre, ainsi qu'à produire de multiples copies de leur propre séquence, les transposons se répandent en échappant aux contraintes de l'hérédité mendélienne. Un seul transposon portant un gène utile, inséré dans le génome d'un animal cible, se comporte à la manière d'un agent libre qui



4. ON FABRIQUE DES INSECTES TRANSGÉNIQUES en introduisant, dans un œuf fécondé (1), un gène (en bleu) porté par un élément transposable, tel le transposon *Hermes* (en rouge). Le transposon et le gène à introduire sont placés dans la région polaire du cytoplasme (2), la partie de l'œuf où se formeront les cellules germinales de l'insecte, une fois sa maturation achevée. Après de nombreuses divisions de l'ADN de l'œuf (3), la majeure partie formera les noyaux des cellules constituant le corps de l'insecte. Cependant, deux noyaux, qui migrent vers le pôle, constitueront les cellules germinales de l'insecte (4) lorsqu'il aura atteint sa maturité (5). Si ces cellules portent le transgène, la descendance sera transgénique (6).

Dmitry Krasny, d'après Peter Lawrence

se propage dans tout le génome. Plus de la moitié de la progéniture hérite alors du transgène ; après quelques générations d'insectes seulement, donc après un temps relativement court, la majeure partie de la population exprime le nouveau caractère.

Ce type de dissémination de gène a été observé dans la nature : l'élément P lui-même est une adjonction récente au génome de *Drosophila melanogaster*, provenant probablement de *Drosophila willistoni*, il y a moins d'un siècle.

La technique de B. Beaty n'est pas une véritable transformation transgénique, car elle utilise des virus ayant un gène supplémentaire pour infecter un organisme individuel qui synthétisera ensuite le produit du gène inséré. La thérapie génique humaine, elle, utilise parfois des vecteurs dérivés de rétrovirus qui ne sont plus pathogènes, mais capables d'intégrer des gènes dans le génome d'un nouvel hôte. Ces vecteurs viraux dépouillés, nommés pseudorétrovirus pan-tropes, interagissent avec n'importe quelle cellule. Diverses équipes les ont utilisés pour créer des cellules transformées de moustiques en culture, ainsi que des poissons et des coquillages transgéniques.

La plupart des biologistes ont cherché à modifier le phénotype d'un insecte (l'expression extérieure de sa constitution génétique) en intégrant du matériel génétique étranger dans les chromosomes de l'insecte. À l'Université Yale, Frank Richards et ses collègues ont proposé de transformer plutôt les microbes – passifs locataires ou actifs colonisateurs – qu'hébergent les insectes. Les insectes porteurs de microbes modifiés par génie génétique sont nommés paratransgéniques, car leur génome reste inchangé.

F. Richards et son collègue Charles Beard ont produit des réduves (des punaises hématophages) paratransgéniques ne transmettant plus le

trypanosome responsable de la maladie de Chagas (laquelle affecte plus de 18 millions de Sud-Américains, provoquant des troubles cardio-vasculaires, gastro-intestinaux et neurologiques). Les deux biologistes ont isolé une bactérie hébergée par la réduve et l'ont modifiée génétiquement, afin qu'elle sécrète une protéine qui tue le trypanosome que l'insecte véhicule. Ils ont ensuite replacé la bactérie dans les insectes, qui ne servent alors plus d'hôtes au protozoaire responsable de la maladie. Les bactéries génétiquement modifiées se sont disséminées dans une population captive d'insectes, dont la capacité de véhiculer des maladies est supprimée.

Des alliés de l'agriculture

Nombre d'insectes sont bénéfiques, voire indispensables à l'agriculture. Par exemple, les abeilles assurent la pollinisation des plantes. D'autres espèces participent au recyclage des nutriments et contribuent au maintien d'une bonne qualité de sol. Toutefois, une petite minorité d'espèces ravagent les récoltes.

En 1940, Edward Knipling, du ministère américain de l'Agriculture, et le Russe Aleksandr Serebrovsky ont indépendamment proposé une méthode génétique de lutte contre ce fléau : ils préconisaient d'inonder une population de ravageurs d'individus stériles de la même espèce, de sorte que la majorité des accouplements soient stériles. Aujourd'hui, on met en œuvre cette « technique de l'insecte stérile » en stérilisant un grand nombre d'insectes, souvent à l'aide de radiations ionisantes. Des lâchers répétés de ces organismes stériles anéantissent parfois toute une population de ravageurs (voir la figure 8).

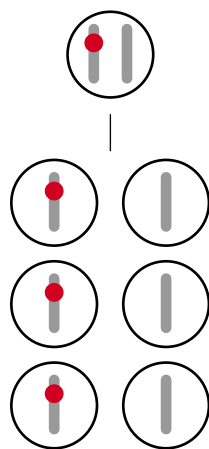
Dmitry Krasny, d'après Margaret Kidwell et José Ribeiro

Ainsi, la technique de l'insecte stérile protège une partie de l'agriculture de nombreux pays, où elle participe à l'éradication des insectes ravageurs en évitant l'emploi de pesticides.

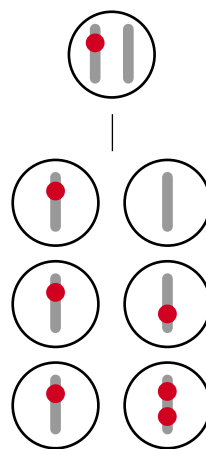
Dans les années 1970, la technique de l'insecte stérile a été à l'origine de l'éradication de la lucilie bouchère du Nouveau Monde, d'abord dans le Sud-Est des États-Unis, puis au Mexique. La lucilie bouchère pond, dans les plaies ouvertes du bétail, ses œufs, qui se développent en larves se nourrissant de la chair des animaux. Récemment, la technique a également été utilisée avec succès contre la mouche des fruits dans la région de Los Angeles.

La technique de l'insecte stérile utilise de la génétique classique : on doit obtenir la reproduction des insectes avant de

PRODUCTION CLASSIQUE DE GAMÈTES



PRODUCTION DE GAMÈTES AVEC DES TRANSPOSONS



5. LA TRANSMISSION de l'information génétique portée par les transposons n'est pas mendélienne. Au cours de la production normale des gamètes (à gauche), un gène non associé à un transposon apparaît dans la moitié des gamètes et est transmis en moyenne à la moitié de la descendance. En revanche, les transposons (points rouges) se multiplient et migrent vers d'autres chromosomes (à droite). Un gène associé se retrouve dans plus de la moitié des gamètes et, donc, dans plus de la moitié des individus de la génération suivante.



USDA/Agricultural Research Service

6. LES ASTICOTS DE LA MOUCHE DES FRUITS (on en extrait un d'une papaye) détruisent de précieuses récoltes. La pulpe comestible de la papaye a été endommagée (à droite des graines noires) par les larves de l'insecte qui s'en nourrit.

les stériliser. Par exemple, on a créé une souche de mouche des fruits dont tous les embryons femelles meurent, après un temps très bref à une température élevée. Cette souche permet de produire en masse, de stériliser et de lâcher uniquement des mâles. En éliminant les femelles, la technique de l'insecte stérile devient encore plus efficace.

Les généticiens espèrent créer par transgenèse des souches d'insectes où seules les femelles portent des gènes létaux. Ces segments mortels d'ADN seraient exprimés dans des conditions particulières, tel un traitement à haute température utilisé dans l'approche

classique. Plus généralement, les biologistes se tournent vers les insectes transgéniques pour la prochaine génération d'armes contre les ravageurs. On réduira ainsi l'usage des pesticides, on ralentira l'apparition de résistances aux produits utilisés, et l'on évitera l'accumulation de produits chimiques et de leurs métabolites toxiques dans nos aliments, dans l'eau, le sol et les textiles.

En outre, les insecticides ne sont pas sélectifs : ils tuent de nombreuses espèces bénéfiques, anéantissant d'utiles prédateurs et parasites, ce qui donne ainsi à des espèces secondaires

de ravageurs une chance d'émerger. Par exemple, les araignées rouges (des acariens microscopiques) attaquent les amandiers de Californie. Les agriculteurs luttent contre elles soit en utilisant un insecticide, soit en lâchant une espèce prédatrice qui les tue. Cependant, les arbres sont également victimes de coléoptères et de papillons ; il faut donc les traiter par d'autres insecticides spécifiques de ces insectes, mais l'un d'entre eux tue l'insecte prédateur qui débarrasserait les arbres des araignées rouges ravageuses. Un prédateur transgénique rendu résistant aux insecticides dirigés contre les coléoptères et les papillons permettrait dans ce cas une réduction de l'épandage de pesticides.

Brian Croft et ses collègues de l'Université de Californie ont sélectionné des insectes prédateurs résistant aux insecticides et les ont introduits avec succès dans des vergers de Californie du Sud. Par ailleurs, Marjorie Hoy et ses collègues de l'Université de Floride ont sélectionné une araignée prédatrice résistante aux insecticides, qui a participé au traitement des amandiers mentionnés précédemment.

Toutefois, ces sélections nécessitent souvent plusieurs générations d'insectes, et le croisement des descendants résistants conduit à une diminution de la diversité génétique dans les colonies de laboratoire. Cette perte de diversité génétique réduit l'adaptabilité des animaux lors de leur libération en champ. Ce problème a limité l'application de la sélection artificielle de résistances dans l'effort d'amélioration de la lutte biologique en agriculture. Le génie génétique évite cet écueil. Il procure rapidement, et à un coût moindre, des espèces résistantes, réduisant le recours aux traitements chimiques.

Considérations écologiques

D'autres applications du génie génétique aux insectes sont étudiées, notamment la résistance aux agents pathogènes, une meilleure adaptation à l'environnement, une augmentation de la fécondité, une amélioration de la capacité à trouver des hôtes et, même, l'amélioration des matériaux et des produits fournis par les insectes, telle la soie. Des programmes d'élevage ont créé des souches de vers à soie qui sécrètent une soie en plus grande quantité et de meilleure qualité. Toutefois,



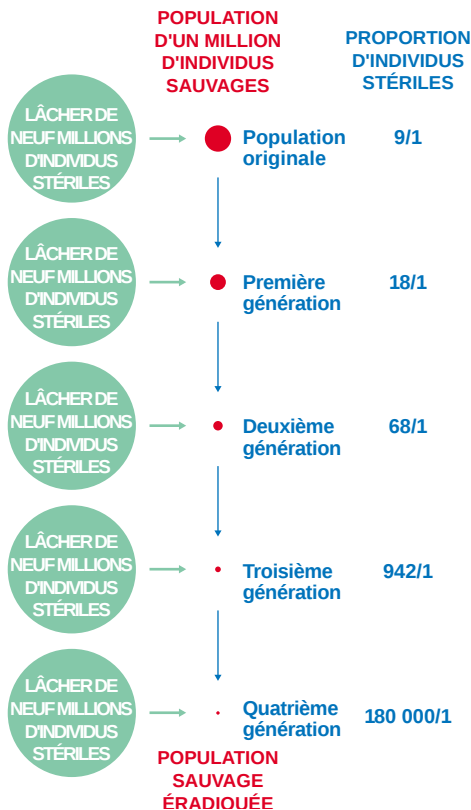
USDA/Agricultural Research Service

7. CES ÉNORMES CAGES renferment des centaines de milliers de mouches des fruits, que nécessite la mise en œuvre des stratégies de lutte génétique.



Marjorie A. Hoy, University of Florida

8. LA LUTTE BIOLOGIQUE, sous forme d'insectes prédateurs des araignées rouges, a sauvé les amandiers à gauche de la route. Les arbres non protégés (à droite) ont été détruits par les araignées rouges.



Dmitry Krasny, d'après Gerald Franz

9. LA TECHNIQUE DE L'INSECTE STÉRILE est parfois une arme efficace contre les ravageurs. Les insectes stériles (surtout des mâles), lâchés par vagues successives, surpassent en nombre les individus fertiles de la même espèce et rendent la plupart des accouplements inféconds. Après quelques générations, la population de ravageurs est décimée.

les industriels sont handicapés par la fragilité de ces fils, et ils lorgnent sur les fils de soie produits par les araignées, qui sont plus solides que le Kevlar (lequel entre dans la composition des gilets pare-balles et de pièces d'avions). Malheureusement, les araignées ne produisent pas leur fil au rythme des usines de Kevlar ni même des larves du bombyx. D'où la tentation d'introduire des gènes arachnéens de la soie dans le génome des vers à soie.

Évidemment ces études posent aux scientifiques comme aux hommes politiques le problème général de

l'utilisation du génie génétique dans les laboratoires et dans la nature. Des réglementations régissent déjà le transfert du laboratoire au champ des applications de la transgénèse. Toutes les techniques, notamment la fabrication d'insectes transgéniques, font encourir des risques que nous devons comprendre et minimiser. Par exemple, on étudie d'éventuels transferts imprévus de transgènes d'une espèce d'insectes à une autre. Dans certains cas, le risque semble minime : lorsqu'on lâche dans la nature des individus stériles d'une espèce transgénique, les gènes ajoutés à ces insectes restent confinés dans ces individus.

Les agences techniques qui dépendent des États se préoccupent d'évaluer les risques et les avantages des nouvelles techniques. Aux États-Unis, elles ont élaboré des procédures qui garantissent la sécurité génétique et écologique de l'utilisation en agriculture d'insectes transgéniques.

Les recherches sur la transgénèse ont bouleversé toute la biologie, parce que les résultats obtenus lors de l'étude d'espèces particulières s'appliquent aux autres espèces. Les modestes plants de pois de Gregor Mendel ont révélé la génétique de toutes les espèces végétales ou animales, et les études sur la drosophile ont posé les fondations de l'essentiel des recherches modernes dans le domaine de la génétique. Les investigations dont a fait l'objet la bactérie *Escherichia coli* ont conduit à l'exploration des mécanismes de régulation qui ont accéléré le développement du génie génétique. Des mammifères transgéniques produisent déjà toute une variété de médicaments. Appliquée aux insectes, la transgénèse ouvrira aux biologistes de nouvelles voies d'exploration, de contrôle et d'exploitation de ces créatures qui exercent une emprise considérable sur une importante part des activités économiques de l'homme.

David O'BROCHTA travaille l'Université du Maryland. Peter ATKINSON travaille à l'Université de Californie.

C.F. CURTIS et P.M. GRAVES, *Methods for Replacement of Malaria Vector Populations*, in *Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, vol. 91, n° 2, pp. 43-48, avril 1988.

The Ecology of Agricultural Pests : Biochemical Approaches, sous la direction de W.O.C. Symondson et J.E. Liddell, Chapman and Hall, 1996.

Frank H. COLLINS et Anthony A. JAMES, *Genetic Modifications of Mosquitoes*, in *Science & Medicine*, pp. 52-61, novembre / décembre 1996.

Margaret G. KIDWELL et Alice R. WATTAM, *An Important Step Forward in the Genetic Manipulation of Mosquito Vectors in Human Disease*, in *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 95, n° 7, pp. 3349-3350, 31 mars 1998.

Les boules de glu

FRANK CLOSE • PHILIP PAGE

Les gluons sont les particules qui transmettent l'interaction nucléaire forte entre les quarks et assurent la cohésion des protons. Ils se regroupent parfois en «boules de glu».

Il n'existe pas d'atomes de lumière : les photons, ces particules qui transmettent les interactions électromagnétiques, ne se lient pas en entités composées analogues aux atomes. Pourquoi alors existe-t-il des assemblages de gluons ? Ces particules lient les quarks (les composants élémentaires de la matière nucléaire) en particules telles que les protons. Les assemblages de gluons sont ce que les

physiciens nomment des boules de glu. On pense que les boules de glu ont un rayon de 0,5 femtomètre (soit 0,5 millionième de milliardième de mètre), inférieur à celui du proton, et une durée de vie inférieure au temps mis par la lumière pour traverser un atome d'hydrogène. De nombreux physiciens sont aujourd'hui convaincus que, malgré leur caractère éphémère, des boules de glu ont été produites dans des accélérateurs de particules. La mise en évidence d'une boule de glu serait l'un des plus beaux épisodes de l'histoire des charges de couleur, commencée en 1964 avec les travaux de Murray Gell-Mann.

Dans les années 1960, les physiciens comprirent que les protons ou les neutrons qu'ils observaient expérimentalement se composent de particules encore plus petites, nommées quarks. Ces quarks ont une charge électrique

et d'autres caractéristiques plus insolites, telle la «saveur», qui se présente sous six aspects différents nommés *up*, *down*, *charm*, *strange*, *top* et *bottom* ; ils ont également une charge «de couleur». Par exemple, un quark *up* peut être rouge, jaune ou bleu.

Le regroupement de trois quarks de couleurs différentes forme un objet «blanc», c'est-à-dire un objet dont la charge de couleur totale est nulle : selon la saveur des quarks constituant, les objets blancs sont des protons, des neutrons ou n'importe laquelle des innombrables particules du même type, que l'on nomme des baryons. Les physiciens ont nommé couleur ce type de charge parce que l'addition de trois charges de couleur est toujours égale à zéro, de la même façon que l'addition des trois couleurs primaires donne du blanc. Les particules (quarks et gluons) qui

1. UN GLUON (~~~~~) est libéré par un antiquark (■) qui a été créé en même temps qu'un quark (●) à partir d'un photon (~~~~~). Ce photon résulte de l'annihilation d'un électron (●) et d'un positon (■). Les quarks, les antiquarks et les gluons ont des charges de couleur (rouge, bleu et jaune) qui déterminent leurs interactions par la force nucléaire forte. Une charge de couleur et la charge d'anticouleur correspondante (couleur opposée) sont représentées ici par la même couleur. La nature ayant horreur de la couleur, le quark, l'antiquark et le gluon se combinent à d'autres particules ; ainsi, ils forment les «jets» (~~~~~) de particules incolores, ou blanches, que l'on observe lors des expériences. L'électron, le positon et le photon ont une charge de couleur nulle, de sorte qu'ils sont insensibles à l'interaction forte. Sur ce diagramme, le temps s'écoule de gauche à droite. Les diagrammes de ce type se nomment diagrammes de Feynman, du nom du physicien Richard Feynman, qui les a inventés pour faciliter le calcul.