



Première partie

**LES BIOTECHNOLOGIES  
AGRICOLES:**  
Une réponse aux  
besoins des plus démunis?



# Première partie



Section A: La problématique

# 1. Les biotechnologies peuvent-elles répondre aux besoins des plus démunis?

## Introduction et vue d'ensemble

Les biotechnologies dans l'alimentation et l'agriculture, le génie génétique tout particulièrement, sont désormais au cœur «d'une guerre rhétorique mondiale» (Stone, 2002). Leurs partisans proclament que le génie génétique est un outil essentiel pour venir à bout de l'insécurité alimentaire et de la malnutrition dans les pays en développement et accusent de «crimes contre l'humanité» leurs détracteurs qui font obstacle à l'approbation réglementaire d'innovations susceptibles de sauver des vies (Potrykus, 2003). Leurs opposants font valoir que le génie génétique engendrera des catastrophes écologiques, aggravera la pauvreté et la faim et conduira à la mainmise des grandes sociétés sur l'agriculture traditionnelle et les approvisionnements alimentaires mondiaux. Ils accusent les défenseurs des biotechnologies de «tromper la terre entière» (Five Year Freeze, 2002). Cette édition de *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture* fait le point des connaissances scientifiques et économiques actuelles sur les possibilités qu'offrent les biotechnologies agricoles, notamment le génie génétique, pour répondre aux besoins des pauvres.

L'agriculture est confrontée au XXI<sup>e</sup> siècle à des défis sans précédent. Au cours des 30 années à venir, nos ressources naturelles

d'une fragilité croissante devront nourrir 2 milliards de gens de plus. Plus de 842 millions de gens, vivant pour la plupart dans les zones rurales des pays pauvres, sont les victimes chroniques de la faim et des milliards d'individus souffrent de carences en micronutriments, une forme insidieuse de malnutrition due à la piètre qualité et au manque de diversité de leur alimentation habituelle. La Révolution verte nous a appris que les innovations technologiques – les semences à fort rendement et les intrants nécessaires à leur croissance – peuvent être porteuses d'avantages considérables pour les pauvres, notamment par leur efficacité accrue, l'augmentation des revenus et la baisse du prix des aliments. Ce «cercle vertueux» d'accroissement de la productivité, d'amélioration des niveaux de vie et de croissance économique durable a sorti des millions de gens de la pauvreté (Evenson et Gollin, 2003). Toutefois, ils sont nombreux à rester prisonniers de l'agriculture vivrière. La Révolution génétique permettra-t-elle de toucher les laissés pour compte?

Parallèlement, la population mondiale s'urbanise rapidement et exige de l'agriculture des qualités de plus en plus variées qui concernent non seulement les produits eux-mêmes mais aussi les méthodes de production employées. Le secteur agricole devra trouver des réponses qui iront au-delà de l'habituelle recherche d'augmentation des rendements et assureront la protection

**ENCADRÉ 1****Portée du rapport**

Grâce aux biotechnologies agricoles, les chercheurs disposent de divers outils pour comprendre et manipuler les caractères génétiques d'organismes utilisés en agriculture: plantes cultivées, animaux d'élevage, ressources forestières et halieutiques. Elles sont beaucoup plus vastes que le génie génétique, puisqu'elles englobent la génomique et la bioinformatique, la sélection assistée par des marqueurs, la micropropagation, la culture de tissus, le clonage, l'insémination artificielle, le transfert d'embryons notamment. Cependant, le génie génétique, en particulier dans le secteur des cultures, est le domaine dans lequel les biotechnologies ont l'effet le plus direct sur l'agriculture des pays en développement et dans lequel les préoccupations de l'opinion publique et les questions de politique les plus pressantes sont apparues. C'est

également un domaine dans lequel des données économiques concernant les effets des biotechnologies sur les pauvres commencent à se faire jour. Par conséquent, bien que ce rapport porte sur l'ensemble des outils et applications des biotechnologies agricoles, en particulier dans le Chapitre 2, l'accent est mis sur les cultures transgéniques et sur leur impact sur les populations démunies des pays pauvres. Bon nombre des difficultés auxquelles on se heurte pour faire profiter les pauvres des avantages des cultures transgéniques seront au moins aussi importantes pour d'autres applications biotechnologiques dans les domaines de l'élevage, des pêches et des forêts. Pour tout complément d'informations sur le programme de travail de la FAO sur les biotechnologies agricoles, consulter le site Web de la FAO à l'adresse suivante: <http://www.fao.org/biotech/index.asp?lang=fr>.

des biens écologiques communs, apaiseront les craintes des consommateurs quant à la qualité et la sécurité sanitaire des aliments et relèveront les moyens d'existence en zones rurales, tant au Sud qu'au Nord. Cette guerre rhétorique nous rendrait-elle sourds à un débat raisonné sur les risques et les possibilités que présentent les biotechnologies?

Il apparaît clairement que les biotechnologies (encadré 1) peuvent contribuer à relever ces défis. Elles peuvent surmonter les problèmes de production difficiles ou réfractaires aux méthodes classiques de sélection. Elles peuvent accélérer les programmes de sélection classiques et fournir aux agriculteurs du matériel végétal exempt de maladies. Elles peuvent élaborer des variétés résistantes aux ravageurs et aux maladies, éliminer le recours aux produits chimiques toxiques pour l'environnement et la santé humaine et fournir des outils de diagnostic et des vaccins pouvant contribuer à lutter contre des maladies animales dévastatrices. Elles peuvent améliorer la qualité nutritionnelle de produits alimentaires de base comme

le riz et le manioc et créer de nouveaux produits destinés aux utilisations industrielles et sanitaires.

Les biotechnologies ne sont cependant pas une panacée. Elles ne sauraient pallier le manque d'infrastructures, de marchés, de capacités de sélection, de systèmes de fourniture d'intrants et de services de vulgarisation qui fait obstacle à tous les efforts engagés pour promouvoir la croissance agricole dans les zones pauvres et isolées. Certaines de ces contraintes pourraient se révéler plus problématiques pour les biotechnologies que pour les autres technologies agricoles, tandis que d'autres le seront moins. Certaines caractéristiques introduites dans une semence, comme la résistance transgénique aux insectes, pourraient être plus faciles à utiliser pour les petits agriculteurs sans ressources que des technologies agricoles plus complexes qui exigent d'autres intrants ou des stratégies de gestion élaborées. Inversement, certains packages biotechnologiques, notamment dans les secteurs de l'élevage et de la pêche, requièrent un cadre institutionnel et une gestion avisée pour donner les résultats

escomptés et ne sont donc pas adaptés à la situation des petits exploitants mal lotis.

Les inquiétudes liées à la sécurité et à la réglementation des plantes transgéniques sont un obstacle majeur pour les pays en développement dont beaucoup n'ont ni le cadre réglementaire, ni les capacités techniques nécessaires pour évaluer ces cultures et les affirmations contradictoires dont elles font l'objet. Bien que la communauté scientifique internationale ait conclu que les aliments issus des cultures transgéniques actuellement disponibles sur le marché sont sans danger pour la santé, elle reconnaît que certaines des nouvelles modifications à base de transgènes multiples devraient donner lieu à des procédures complémentaires d'analyse des risques pour l'alimentation. En revanche, il n'y a guère de consensus quant aux risques que les cultures transgéniques présentent pour l'environnement bien qu'il soit communément admis que ces produits doivent être évalués par comparaison aux risques posés par l'agriculture classique. Par ailleurs, beaucoup s'entendent à dire que les cultures transgéniques doivent être évaluées cas par cas, comme pour les produits pharmaceutiques, en tenant compte de la plante considérée, des caractéristiques introduites et du système agroécologique. Étant donné que seules de très rares cultures transgéniques ont fait l'objet d'études d'impact sur l'environnement tropical, il faudra un effort de recherche considérable dans ce domaine.

Les activités de recherche-développement sur les cultures transgéniques engagées par les secteurs public et privé portent sur plus de 40 plantes cultivées dans le monde entier et des dizaines d'innovations sont étudiées; il est néanmoins patent que les problèmes des pauvres sont ignorés. À l'exception de quelques initiatives ici et là, il n'existe aucun grand programme, public ou privé, axé sur les graves problèmes auxquels sont confrontés les pauvres ou les plantes et animaux dont ils dépendent. Il convient d'engager des efforts internationaux concertés pour que les besoins technologiques des pauvres soient effectivement pris en compte et lever les obstacles qui leur permettraient d'accéder aux nouvelles technologies.

## Les grandes leçons de ce rapport

Les biotechnologies – génie génétique compris – peuvent être avantageuses pour les pauvres dès lors que seront élaborées des innovations répondant à leurs besoins et que les agriculteurs sans ressources des pays pauvres peuvent y avoir accès dans des conditions rentables. Or, jusqu'ici, ces conditions n'ont été satisfaites que pour une poignée de pays en développement.

Les biotechnologies doivent relever d'un programme intégré et global de recherche-développement agricole prioritairement axé sur les problèmes des pauvres. Sans pour autant s'y substituer, elles peuvent compléter les recherches engagées dans d'autres domaines tels que la sélection végétale et animale, la gestion intégrée des ravageurs et des nutriments, les techniques d'alimentation et les systèmes de gestion des maladies.

Le secteur public – pays développés et pays en développement, donateurs et centres de recherche internationaux – doit affecter plus de ressources à la recherche agricole, en particulier aux biotechnologies. Les biens publics auxquels le secteur privé ne s'intéresse logiquement pas doivent faire l'objet de recherches publiques qui engendreront par ailleurs une concurrence sur le marché des technologies.

Les gouvernements doivent offrir des mesures d'incitation et créer des institutions et un environnement porteur pour les activités de recherche-développement menées par les secteurs public et privé sur les biotechnologies agricoles et pour leur diffusion. Il convient d'encourager les partenariats public-privé et toutes les démarches innovantes permettant de mobiliser la recherche et l'apport de technologies aux pauvres.

Les procédures réglementaires doivent être renforcées et rationalisées pour garantir la protection de l'environnement et de la santé publique et la transparence de ce processus qui doit rester prévisible et fondé sur des bases scientifiques. Il est capital de se doter de réglementations avisées pour gagner la confiance des consommateurs et des producteurs, tout en se gardant des réglementations obstructionnistes et des redondances coûteuses.

Le renforcement des capacités de recherche agricole et les aspects réglementaires des biotechnologies doivent être prioritaires pour la communauté internationale. La FAO a proposé la mise en place d'un nouveau grand programme afin de veiller à ce que les pays en développement disposent des connaissances et des compétences nécessaires pour prendre leurs propres décisions quant à l'utilisation des biotechnologies.

### Résumé du rapport

Le Chapitre 2 explore les frontières des biotechnologies agricoles et situe la question dans le contexte plus vaste des objectifs de production, de conservation et de gestion visés par la recherche. La controverse suscitée par les biotechnologies est principalement centrée sur les cultures transgéniques, lors même que ces innovations ne représentent qu'une fraction infime des possibilités techniques qu'offrent les biotechnologies pour l'agriculture, l'élevage, la foresterie et la pêche. Le génie génétique est à la fois un prolongement plus précis des outils de sélection utilisés depuis des décennies et un changement d'orientation radical par rapport aux méthodes classiques. C'est la capacité même du génie génétique à transcender la barrière des espèces qui lui confère son pouvoir considérable et en fait un tel sujet de controverse.

Le Chapitre 3 rappelle la contribution de la recherche publique nationale et internationale à l'élaboration des technologies qui ont permis la Révolution verte. À l'inverse, les recherches sur les cultures transgéniques sont pour la plupart le fait de sociétés privées transnationales. Cette situation est lourde de conséquences pour le type de recherches effectivement engagées ainsi que pour les produits élaborés. Les données sur les tendances de la recherche et de la commercialisation confirment que les plantes et les caractéristiques présentant un intérêt pour les pauvres sont dédaignées. Six pays (Afrique du Sud, Argentine, Brésil, Canada, Chine et États-Unis), quatre cultures (le maïs, le soja, le canola/colza et le coton) et deux caractéristiques (la résistance aux insectes et la tolérance aux herbicides) représentaient, en 2003, 99 pour cent de la superficie globale plantée en cultures

transgéniques. Ces mêmes cultures et caractéristiques font l'objet de la majorité des recherches menées sur les cultures transgéniques, tant dans les pays développés que dans les pays en développement et dans les secteurs public comme privé. L'insuffisance de capacités nationales de recherche agricole est l'un des principaux obstacles auquel se heurtent les pays en développement qui souhaiteraient adopter et adapter les innovations biotechnologiques.

Le Chapitre 4 fait le point des connaissances actuelles sur les retombées socioéconomiques du recours aux plantes transgéniques, notamment dans les pays en développement. À l'exception de la Chine, toutes les cultures transgéniques commercialisées à ce jour ont été élaborées et distribuées par des sociétés privées. Cela étant, certaines d'entre elles, en particulier le coton résistant aux ravageurs, sont une source importante de revenus pour les petits agriculteurs, sans compter les avantages sociaux et environnementaux non négligeables qu'entraîne la moindre utilisation des produits chimiques dans l'agriculture. Les éléments d'information disponibles laissent supposer que les petits agriculteurs sont tout aussi susceptibles de tirer profit de l'adoption du coton transgénique que les grands exploitants. Ils montrent aussi qu'en dépit des craintes de voir le secteur dominé par les sociétés privées, les agriculteurs et les consommateurs ont jusqu'ici récupéré une part plus importante des retombées économiques des cultures transgéniques que les sociétés qui les ont élaborées et commercialisées. À noter toutefois que ces constatations ne reposent que sur deux ou trois ans de données et concernent un nombre relativement faible d'agriculteurs, dans quelques pays seulement. Les gains enregistrés sur le court terme pourraient ne pas se maintenir dès lors qu'un plus grand nombre d'agriculteurs se sera tourné vers ces technologies. Il faut davantage de temps et des études conçues avec plus de soin pour déterminer comment et à quel niveau les retombées des cultures transgéniques seront distribuées.

Le Chapitre 5 passe en revue les éléments de preuves disponibles ainsi que les préoccupations des milieux scientifiques concernant les cultures transgéniques et résume les quelques consensus auxquels

est parvenue la communauté scientifique internationale. Les scientifiques considèrent que les produits transgéniques d'ores et déjà sur le marché peuvent être consommés en toute sécurité, mais ils préconisent une surveillance permanente et conviennent que les nouveaux produits, de nature plus complexe, devront sans doute faire l'objet de procédures complémentaires pour s'assurer de leur innocuité au plan alimentaire. Ce sont les impacts potentiels des cultures transgéniques sur l'environnement qui donnent lieu aux désaccords les plus profonds entre les scientifiques. Ils sont globalement d'accord sur les types de dangers qui peuvent se poser, mais ne s'entendent ni sur leur probabilité, ni sur leur gravité. Aucun des grands risques environnementaux potentiellement associés aux cultures transgéniques ne s'est encore matérialisé sur le terrain. Les scientifiques conviennent que ces plantes doivent être évaluées au cas par cas, en tenant compte de la culture, des caractéristiques et de l'agrosystème auquel elle est destinée. Ils sont aussi d'accord sur le fait que la réglementation doit reposer sur des bases scientifiques, mais que le jugement et le dialogue sont des éléments essentiels de tout cadre réglementaire fondé sur des bases scientifiques. Au plan international, l'harmonisation que peuvent offrir la Commission du Codex Alimentarius (CAC) ou la Convention internationale pour la protection des végétaux (CIPV) par exemple, contribuera certainement à soulager les tensions internationales. Les pays en développement doivent développer leurs propres capacités nationales en vue de la réglementation de ces cultures et se conformer à leurs obligations nationales et internationales.

Le Chapitre 6 passe en revue les recherches effectuées dans le monde sur ce que pensent les gens de l'utilisation des biotechnologies dans l'alimentation et l'agriculture. Quel que soit le consensus scientifique ou réglementaire qui se dégagera, le génie génétique dans l'alimentation et l'agriculture ne percera pas tant que le grand public ne sera pas convaincu de son innocuité et de son utilité. Les avis sur la question varient de manière considérable, tant au sein d'un même pays que d'un pays à l'autre, mais un examen attentif de données d'enquête

comparables au plan international montrent que dans tous les pays, les gens ont une opinion nuancée des biotechnologies et font des distinctions entre les différentes technologies et applications selon qu'ils les jugent utiles et acceptables. Rares sont ceux qui adoptent une position dogmatique pour ou contre l'ensemble des biotechnologies. L'étiquetage, qui a l'avantage de laisser le choix au consommateur, a été proposé comme un moyen de rapprocher les opinions quant à l'acceptabilité des aliments transgéniques. D'autres pensent que l'étiquetage n'a de raison d'être que dans les cas où le produit – et pas seulement le processus entrant dans sa production – diffère de son équivalent classique. Les gouvernements membres de la CAC ont engagé un débat sur le rôle de l'étiquetage pour les aliments transgéniques.

Le Chapitre 7 examine le type de recherches en biotechnologies agricoles qui seront nécessaires pour répondre aux besoins des pauvres, et plus particulièrement des agriculteurs sans ressources des pays pauvres. Il s'agit notamment d'engager des recherches sur les cultures qui assurent le gros de leur apport alimentaire et leurs moyens de subsistance: le riz et le blé, bien sûr, mais aussi toute une gamme de cultures dites «orphelines» comme le sorgho, le millet à chandelle, le pois cajan, le pois chiche et les arachides qui sont les parents pauvres des programmes de recherche classiques et biotechnologiques. Les caractéristiques qui présentent un intérêt particulier pour les pauvres sont entre autres la résistance aux stress de production tels que la sécheresse, la salinité, les maladies et les ravageurs, ainsi que l'amélioration de la qualité nutritionnelle. Dans ce chapitre, on examine également un ensemble d'options institutionnelles et de mesures d'incitation qui pourraient contribuer à promouvoir la recherche publique et privée sur les problèmes des pauvres.

Le Chapitre 8 porte sur les besoins des pays en développement et des pays en transition en matière de renforcement des capacités. Tous les pays doivent disposer de capacités techniques, institutionnelles et gestionnaires solides et dynamiques pour être en mesure d'appliquer les biotechnologies dans l'alimentation et l'agriculture, durablement et avec succès. Plusieurs initiatives

internationales visant un renforcement des capacités sont à l'étude, mais il faudrait en faire bien plus pour que tous les pays soient à même de décider par eux-mêmes du devenir des ces technologies, pour le bien-être de leurs populations.

Enfin, le Chapitre 9 récapitule les principales conclusions du rapport et recommande des mesures spécifiques pour veiller à ce que les biotechnologies répondent aux besoins des pauvres.

## 2. Que sont les biotechnologies agricoles?

Très schématiquement, le terme biotechnologie désigne toute technique qui utilise des organismes ou des substances vivantes qui en sont issues pour élaborer ou modifier un produit à des fins pratiques (encadré 2). Les biotechnologies s'appliquent à toutes les classes d'organismes – des virus et des bactéries aux végétaux en

passant par les animaux – et sont en train de devenir un axe majeur de la médecine moderne, de l'agriculture et de l'industrie. Les biotechnologies agricoles modernes comprennent des outils très divers employés par les scientifiques pour comprendre et manipuler la structure génétique des organismes en vue de la

### ENCADRÉ 2

#### Définir les biotechnologies agricoles

La Convention sur la diversité biologique (CDB) définit la biotechnologie comme «toute application technologique qui utilise des systèmes biologiques, des organismes vivants ou des dérivés de ceux-ci pour réaliser ou modifier des produits ou des procédés à usage spécifique» (Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique, 1992). Cette définition englobe les applications médicales et industrielles, ainsi que nombre d'outils et de techniques couramment utilisés en agriculture et en production vivrière.

Le Protocole de Cartagena sur la prévention des risques biotechnologiques définit la «biotechnologie moderne» de façon plus étroite comme l'application de:

- a) *techniques in vitro aux acides nucléiques, y compris la recombinaison de l'acide désoxyribonucléique (ADN) et l'introduction directe d'acide nucléique dans des cellules ou organites, ou*
- b) *la fusion cellulaire d'organismes n'appartenant pas à une même famille taxonomique, qui surmontent les barrières naturelles de la physiologie de la reproduction et qui ne sont pas des techniques utilisées pour la reproduction et la sélection de type classique.*

(Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique, 2000)

Le *Glossaire de la biotechnologie* de la FAO définit la biotechnologie au sens large comme dans la CDB et au sens étroit comme «diverses technologies moléculaires telles que la manipulation génétique et le transfert de gènes, l'empreinte génétique et le clonage de plantes et d'animaux» (FAO, 2001a).

Les techniques faisant appel à l'ADN recombinant, également connues sous le nom de génie génétique ou (de façon plus familière, mais moins précise) de modification génétique, correspondent à la transformation des caractères génétiques d'un organisme à l'aide de la transgénèse, dans laquelle l'ADN d'un organisme ou d'une cellule (le transgène) est transmis à un autre organisme sans reproduction sexuée. Les organismes génétiquement modifiés (OGM) sont obtenus par l'application de la transgénèse ou de la technologie de l'ADN recombinant dans laquelle un transgène est incorporé dans le génome de l'hôte ou un gène de l'hôte est transformé pour changer son niveau d'expression. Les expressions «OGM», «organisme transgénétique» et «organisme issu du génie génétique» sont souvent utilisées comme synonymes bien qu'elles ne soient pas interchangeables au point de vue technique. Dans le présent rapport, elles sont utilisées comme synonymes.

production et du traitement des produits agricoles.

Certaines applications des biotechnologies, comme la fermentation et la brasserie, sont employées depuis des milliers d'années. D'autres applications plus récentes sont maintenant bien implantées. Ainsi, des micro-organismes sont utilisés depuis des décennies comme usines vivantes pour la production d'antibiotiques salutaires, comme la pénicilline qui est produite à partir du champignon *Penicillium*, et la streptomycine qui provient de la bactérie *Streptomyces*. Les détergents modernes contiennent des enzymes produites par les biotechnologies, la production des fromages à pâte ferme est tributaire de la présure provenant de levure biotechnologique et l'insuline humaine destinée aux diabétiques est maintenant produite au moyen de la biotechnologie.

On a recours aux biotechnologies pour remédier aux problèmes qui surviennent dans tous les domaines de la production et de la transformation des produits agricoles. C'est, par exemple, le cas de la sélection végétale qui permet d'accroître et de stabiliser les rendements, d'améliorer la résistance aux ravageurs, aux maladies et aux stress abiotiques tels que la sécheresse et le froid et de relever la teneur nutritionnelle des aliments. Les biotechnologies sont utilisées pour élaborer du matériel végétal bon marché et exempt de maladies pour des cultures comme le manioc, la banane et la pomme de terre, et pour concevoir de nouveaux outils de diagnostic et de traitement des maladies animales et végétales ainsi que d'évaluation et de conservation des ressources génétiques. Elles sont encore employées pour accélérer les programmes de sélection des plantes, du bétail et des poissons et pour développer la gamme de caractéristiques modifiables. Les aliments pour bétail et les pratiques d'alimentation sont modifiés par les biotechnologies afin d'améliorer la nutrition des animaux et de réduire les déchets nocifs pour l'environnement. Les biotechnologies servent aussi à diagnostiquer les maladies et à élaborer des vaccins contre les maladies animales.

Il est donc évident que l'on ne peut réduire les biotechnologies au seul génie génétique. En fait, certains des aspects les moins controversés des biotechnologies

agricoles pourraient se révéler les plus puissantes et les plus bénéfiques pour les pauvres. La génomique, par exemple, est en train de révolutionner notre vision de la manière dont fonctionnent les gènes, les cellules, les organismes et les écosystèmes et ouvre de nouveaux horizons pour la sélection assistée par marqueurs et la gestion des ressources génétiques. Parallèlement, le génie génétique est un outil extrêmement puissant dont le rôle doit être évalué avec soin. Il est important de comprendre comment les biotechnologies – le génie génétique en particulier – peuvent compléter et développer d'autres démarches si tant est que leur utilisation fasse l'objet de décisions raisonnées.

Ce chapitre fournit une brève description des utilisations actuelles et nouvelles des biotechnologies dans l'agriculture, l'élevage, la pêche et la foresterie dans le but de mieux faire comprendre les technologies par elles-mêmes et la manière dont elles complètent les autres démarches en les prolongeant. Nous souhaitons souligner ici que les outils biotechnologiques sont bel et bien des outils, et non une fin en soi. Comme n'importe quel autre outil, ils doivent être évalués dans le contexte où ils sont utilisés.

### Compréhension, caractérisation et gestion des ressources génétiques

Les agriculteurs et les pasteurs manipulent la structure génétique des plantes et des animaux depuis que l'agriculture existe, soit depuis environ 10 000 ans. Les agriculteurs ont géré le processus de domestication pendant des millénaires, à travers de multiples cycles de sélection des individus les mieux adaptés. Cette exploitation de la variation naturelle des organismes biologiques nous a donné les cultures, les arbres de plantation, les animaux et les poissons d'élevage d'aujourd'hui qui sont souvent radicalement différents de leurs ancêtres (voir le tableau 1).

Le but des sélectionneurs modernes n'est pas différent de celui des premiers agriculteurs: produire des cultures ou des animaux supérieurs. Les programmes classiques de sélection, qui reposent sur l'application des principes connus de la génétique – le phénotype ou les

TABLEAU 1  
Chronologie des technologies agricoles

Technologie	Époque	Interventions génétiques
Traditionnelle	Vers 10 000 av. J.-C.	Plusieurs civilisations récoltent des variétés naturelles, domestiquent des plantes et des animaux et commencent à sélectionner du matériel végétal destiné à la plantation et des animaux pour l'élevage.
	Vers 3 000 av. J.-C.	Brassage de la bière, fabrication de fromage et vinification.
Conventionnelle	Fin du XIX <sup>e</sup> siècle	Gregor Mendel, en 1865, découvre les principes de l'hérédité et jette les fondements des méthodes d'élevage classiques.
	Années 1930	Mise au point de cultures commerciales hybrides.
	Années 1940 à 1960	Recours à la mutagenèse, à la culture tissulaire et à la régénération des plantes. Découverte de la transformation et de la transduction. Watson et Crick découvrent la structure de l'ADN en 1953. Identification des gènes mobiles (transposons).
Moderne	Années 1970	Apparition du transfert de gènes grâce aux techniques à ADN recombinés. Utilisation du sauvetage d'embryons et de la fusion des protoplastes pour l'amélioration des plantes et de l'insémination artificielle pour la reproduction animale.
	Années 1980	L'insuline est le premier produit commercial obtenu par transfert de gènes. Recours à la culture tissulaire pour la plantation massive de végétaux et au transfert d'embryon pour la production animale.
	Années 1990	Prise d'empreinte génétique d'un large éventail d'organismes. Premiers essais sur le terrain de variétés végétales génétiquement modifiées en 1990, suivis du premier lancement commercial en 1992. Vaccins et hormones génétiquement modifiés et clonage d'animaux.
	Années 2000	Bioinformatique, génomique, protéomique, métabolomique.

Source: Adapté de van der Walt (2000) et FAO (2002).

caractéristiques physiques d'un organisme – ont parfaitement bien réussi à introduire des caractéristiques désirables, provenant de parents sauvages ou cultivés ou de mutants, dans d'autres cultivars ou races d'élevage (encadré 3). Dans un croisement classique où chaque parent fournit la moitié du patrimoine génétique de la descendance, les caractéristiques indésirables peuvent être transmises avec les caractéristiques recherchées, et il faut parfois poursuivre la sélection sur des générations pour éliminer les caractéristiques indésirables. À chaque génération, il faut tester les caractéristiques liées à la croissance, à la valeur nutritionnelle et au traitement de la descendance. De nombreuses générations sont parfois nécessaires avant de trouver la bonne combinaison de caractéristiques et les délais peuvent être considérables, notamment dans le cas de cultures pérennes comme les arbres et certaines espèces d'animaux d'élevage. La sélection basée sur le phénotype est donc un processus lent, exigeant et coûteux, tant financièrement que par le temps nécessaire.

Les biotechnologies peuvent rendre les méthodes classiques de sélection plus efficaces.

### La génomique

Les percées les plus remarquables des biotechnologies agricoles sont dues aux recherches sur la structure du génome et sur les mécanismes génétiques qui sous-tendent les caractéristiques importantes au plan économique (encadré 4). La génomique, discipline qui progresse à grands pas, fournit des informations sur l'identité, l'emplacement, l'impact et la fonction des gènes qui ont une incidence sur ces caractéristiques – autant de connaissances qui vont de plus en plus guider l'application des biotechnologies dans tous les secteurs agricoles. La génomique jette les bases des sciences qui lui succéderont, notamment des disciplines nouvelles telles que la protéomique et la métabolomique qui livrent des connaissances sur les structures génique et protéique ainsi que sur leurs fonctions et interactions. Ces disciplines visent une

### ENCADRÉ 3

#### Sélection assistée par mutation induite

Les mutations spontanées sont le moteur «naturel» de l'évolution, et la ressource dans laquelle les sélectionneurs puisent pour acclimater les plantes cultivées et «créer» des variétés améliorées. Sans les mutations, il n'y aurait ni riz, ni maïs, ni autres plantes cultivées.

Depuis les années 70, l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) et la FAO financent des recherches sur l'induction de mutations pour renforcer l'amélioration génétique des cultures vivrières et industrielles en vue de la sélection de nouvelles variétés améliorées. Les mutations induites sont obtenues par traitement de parties de plantes à l'aide d'agents mutagènes, chimiques ou physiques, puis par sélection des modifications souhaitables – en fait, pour imiter les mutations spontanées et élargir artificiellement la diversité génétique. La nature précise des mutations induites n'a généralement pas été considérée comme importante, que les lignées mutantes soient utilisées directement ou comme source de nouvelle

variation dans des programmes de croisement.

Les mutations induites pour favoriser la sélection ont permis d'obtenir de nouvelles variétés de nombreuses plantes cultivées telles que le riz, le blé, l'orge, les pommes, les agrumes, la canne à sucre et la banane (la base de données sur les variétés mutantes FAO/AIEA contient plus de 2 300 variétés officiellement mises en circulation<sup>1</sup>). L'application de mutations induites à la sélection végétale a eu un impact économique considérable sur l'agriculture et la production vivrière qui a une valeur actuelle de milliards de dollars EU et concerne des millions d'hectares de cultures. Récemment, les techniques de mutation ont connu une renaissance, dépassant leur utilisation directe dans la sélection pour connaître des applications nouvelles telles que la découverte de gènes et la génétique inverse.

<sup>1</sup> Disponible à l'adresse suivante: <http://www-infocris.iaea.org/MVD/>.

### ENCADRÉ 4

#### ADN en bref

Tous les organismes vivants sont constitués de cellules qui sont programmées par du matériel génétique appelé acide désoxyribonucléique (ADN). Seule une petite partie de la chaîne d'ADN est effectivement constituée de gènes qui, à leur tour, codent pour des protéines, et la partie restante de l'ADN représente des séquences non codantes dont le rôle n'est pas encore clairement établi. Le matériel génétique est organisé en paires de chromosomes. Par exemple, il y a cinq paires de chromosomes dans l'espèce de moutarde *Arabidopsis thaliana*, très étudiée. L'ensemble des chromosomes d'un organisme est appelé le génome. Le projet de séquençage du génome humain a fourni à la communauté des chercheurs

agricoles non seulement un grand nombre de technologies secondaires qui peuvent être appliquées à tous les organismes vivants, mais encore un modèle de collaboration internationale pour la gestion de vastes projets de séquençage du génome de plantes types telles qu'*Arabidopsis* et le riz.

On peut rafraîchir ses connaissances en matière d'ADN, de génétique et d'hérédité, en consultant le site Web interactif [www.dnafromthebeginning.org](http://www.dnafromthebeginning.org), élaboré par le laboratoire de Cold Spring Harbor aux États-Unis, où la plus grande partie des travaux complètement nouveaux de génétique et de génie génétique ont été effectués.

compréhension systématique de la biologie moléculaire des organismes en vue de leur utilisation pratique.

Une palette très vaste de technologies et de matériels nouveaux est élaborée à un rythme rapide pour générer et traiter les informations sur la structure et la fonction des systèmes biologiques. Le terme bioinformatique renvoie à l'utilisation et à l'organisation de ces informations. Les progrès de la bioinformatique permettent de prévoir la fonction génique à partir de données sur la séquence génique: ainsi, à partir de la liste des gènes d'un organisme, on pourra élaborer le cadre théorique de sa biologie. La comparaison des cartes physiques et génétiques et des séquences d'ADN de différents individus permettra de réduire sensiblement le temps requis pour identifier et sélectionner les gènes potentiellement utiles.

L'élaboration de cartes génétiques indiquant l'emplacement précis et les séquences de gènes montre clairement que même des génomes apparentés de manière distante ont des caractéristiques en commun (encadré 5). La génomique comparative aide à comprendre de nombreux génomes en se fondant sur l'étude intensive de certains d'entre eux. Ainsi, la séquence génomique du riz est utile pour l'étude du génome d'autres céréales dont il partage certains traits en fonction de leur degré de parenté, tandis que les génomes de la souris et du paludisme fournissent des modèles pour le bétail et certaines des maladies qui le frappent. Il existe désormais des espèces modèles pour la plupart des types de cultures, d'animaux d'élevage et de maladies, et les connaissances sur leurs génomes s'enrichissent très rapidement.

#### *Les marqueurs moléculaires*

Tout programme avisé de sélection, d'amélioration et de conservation doit impérativement reposer sur des informations fiables quant à la distribution de la variation génique. La variation génique d'une espèce ou d'une population peut être observée sur le terrain ou en étudiant les marqueurs moléculaires et autres en situation de laboratoire. L'association des deux démarches est nécessaire pour obtenir des résultats fiables. Les marqueurs moléculaires sont des séquences d'ADN

identifiables, situées à des emplacements spécifiques du génome, et associées à la transmission d'une caractéristique ou d'un gène lié. Les marqueurs moléculaires servent: (a) à la sélection assistée par marqueurs, (b) à la compréhension et à la conservation des ressources génétiques; et (c) à la vérification du génotype. Ces activités sont essentielles pour l'amélioration génétique des cultures, des essences forestières, des animaux et des poissons d'élevage.

#### *La sélection assistée par marqueurs*

Les cartes de liaison génique peuvent être utilisées pour localiser et sélectionner les gènes qui affectent les caractéristiques d'importance économique dans les plantes ou les animaux. Les avantages potentiels de la sélection assistée par marqueurs sont plus importants pour les caractéristiques contrôlées par de nombreux gènes, comme la production de fruits, la qualité du bois, la résistance aux maladies, la production de lait et de viande, ou encore l'adiposité, qui sont difficiles et coûteuses à mesurer et nécessitent beaucoup de temps. Les marqueurs peuvent aussi être utilisés pour accélérer ou améliorer l'introduction de nouveaux gènes d'une population à l'autre, par exemple quand on souhaite introduire des gènes de parents sauvages dans des variétés végétales modernes. Lorsque la caractéristique désirée est localisée dans la même espèce (telles que deux variétés de millet – encadré 6), elle peut être transférée au moyen des méthodes classiques de sélection, les marqueurs moléculaires étant alors utilisés pour déceler le gène désiré.

#### *Mesure et conservation de la diversité génétique*

Les marqueurs moléculaires grâce auxquels on mesure l'ampleur de la variation génique, tant au sein d'une population qu'entre plusieurs d'entre elles, permettent d'orienter utilement les activités de conservation génétique et l'élaboration de populations d'amélioration pour l'agriculture, l'élevage, la foresterie et la pêche. Les études réalisées sur des poissons et des essences forestières au moyen de ces technologies ont mis en évidence une forte variation génique, à la fois au sein des populations et entre elles. Les animaux d'élevage sont caractérisés par une variation génique importante au sein

des populations, tandis que les cultures se distinguent davantage par de fortes variations entre les différentes espèces. Les données fournies par d'autres modes d'investigation, comme les observations de terrain, sont souvent incapables de fournir ce genre d'informations ou alors, avec de grandes difficultés.

On utilise de plus en plus souvent les marqueurs moléculaires pour étudier la distribution et les schémas de diversité génétique. Les enquêtes effectuées dans le monde montrent par exemple que 40 pour cent des races d'élevage existantes sont

menacées d'extinction. Or, la plupart d'entre elles ne sont présentes que dans les pays en développement et, dans bien des cas, on ne sait pas grand-chose d'elles ou de leur potentiel d'amélioration. Elles contiennent peut-être des gènes capables de favoriser une adaptation ou une résilience aux stress – comme la tolérance à la chaleur ou la résistance à la maladie – qui pourraient s'avérer utiles pour les générations futures. Les biotechnologies modernes peuvent contribuer à freiner la tendance à l'érosion génétique dans tous les secteurs de l'alimentation et de l'agriculture.

#### ENCADRÉ 5 La synthénie c'est la vie!

*Mike Gale<sup>1</sup>*

La synthénie décrit la conservation et la cohérence du contenu et de l'ordre des gènes le long des chromosomes de différents génomes végétaux. Jusqu'à la fin des années 80, nous imaginions que chaque plante cultivée avait sa propre carte génétique. Ce n'est que lorsque nous avons été capables de dresser les premières cartes moléculaires, en utilisant une technique appelée «polymorphisme de la longueur des fragments de restriction» (PLFR) que nous avons commencé à entrevoir que les espèces apparentées avaient des cartes génétiques qui se ressemblaient étonnement. Les premières expériences ont démontré la conservation, sur quelques millions d'années d'évolution, de relations de synthénie entre la pomme de terre et la tomate dans les plantes à feuilles larges et entre les trois génomes du blé panifiable dans les graminées. Plus tard, nous avons été en mesure de démontrer que les mêmes analogies étaient présentes pour les génomes du riz, du blé et du maïs, qui étaient séparés par quelque 60 millions d'années d'évolution. Le diagramme résume cette recherche et montre en une seule carte que 70 pour cent des

ressources alimentaires mondiales sont liées. Les 12 chromosomes du riz peuvent être alignés avec les 10 chromosomes du maïs et les sept chromosomes de base du blé et de l'orge de telle façon que tout rayon tracé autour des cercles passera pas différentes versions, connues sous le nom d'allèles, des mêmes gènes.

La découverte de la synthénie a des répercussions énormes sur la façon dont nous envisageons la génétique végétale. Il y a des applications évidentes pour des études de l'évolution; par exemple, les flèches blanches sur les cercles du blé et du maïs décrivent les translocations chromosomiques au cours de l'évolution qui caractérisent les groupes de graminées *Pooideae* et *Panicoideae*. Il y a de grandes possibilités de prévoir la présence et le locus d'un gène dans une espèce à partir de ce que nous savons au sujet d'une autre espèce. Maintenant que nous avons la séquence complète d'ADN du riz, nous pouvons identifier et isoler des gènes essentiels d'espèces à génome de grandes dimensions difficiles à traiter telles que le blé et l'orge en prévoyant que les mêmes gènes seront présents dans le même ordre que dans le riz. Les principaux gènes de la résistance aux maladies et de la tolérance aux sols acides ont récemment été isolés de cette façon dans l'orge et dans le seigle.

<sup>1</sup> Le professeur Gale est Directeur adjoint du Centre John Innes, Norwich (Royaume-Uni).

**Vérification du génotype**

Les marqueurs moléculaires sont très fréquemment employés pour l'identification des génotypes et la détermination de l'«empreinte génétique» des organismes. Ces prises d'empreintes génétiques ont été utilisées dans des programmes très pointus de sélection d'arbres où il est impératif d'identifier correctement les clones en vue des programmes de propagation à grande échelle. Les marqueurs moléculaires ont aussi servi à l'identification d'espèces marines menacées qui sont capturées par accident par des unités de pêche isolées ou,

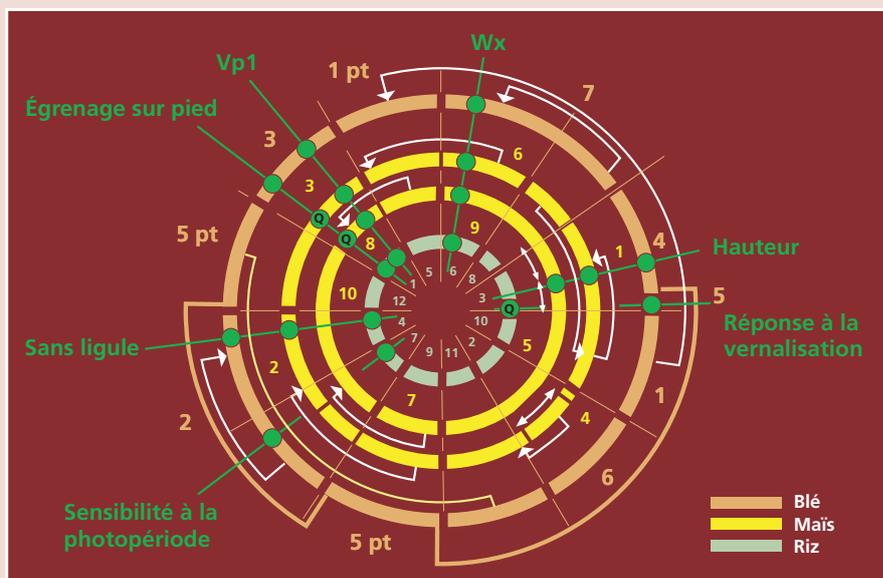
intentionnellement, dans le cadre d'activités de pêche illicite. La vérification du génotype est utilisée de façon intensive dans les tests d'ascendance des animaux domestiques et pour le traçage des produits d'élevage dans la chaîne alimentaire, afin de remonter jusqu'à l'exploitation et à l'animal d'origine.

**Sélection et reproduction des cultures et des arbres**

Outre la sélection assistée par marqueurs décrite ci-dessus, diverses biotechnologies

Pour la sélection végétale pratique, la connaissance de la syntenie permet aux obtenteurs d'accéder à tous les allèles, par exemple dans toutes les céréales plutôt que dans l'espèce seulement sur laquelle ils sont en train de travailler. Un premier exemple important de cela est le transfert au riz des gènes du nanisme du blé qui ont permis la Révolution verte. Dans ces expériences, le gène a été localisé dans le riz par syntenie et isolé puis modifié par altération de la séquence de l'ADN qui caractérisait les gènes du blé avant de

replacer le gène modifié dans le riz. Cette approche peut être appliquée à n'importe quel gène de toute céréale, y compris les cultures dites «orphelines» qui n'ont pas bénéficié des montants consacrés pendant le siècle écoulé à la recherche sur les trois principales cultures – blé, riz et maïs. La principale conséquence est cependant que nous pouvons maintenant mettre en commun nos connaissances en biochimie, physiologie et génétique et les transférer d'une plante cultivée à l'autre grâce à la syntenie.



## ENCADRÉ 6

**Marqueurs moléculaires et sélection assistée par des marqueurs pour le mil chandelle en Inde***Tom Hash<sup>1</sup>*

Le mil chandelle est une céréale cultivée pour ses graines vivrières et sa paille dans les zones les plus chaudes et les plus sèches de l'Afrique et de l'Asie où l'agriculture pluviale et l'aridoculture sont pratiquées. Il est analogue au maïs par son comportement de reproduction. Les variétés traditionnelles des agriculteurs sont à pollinisation libre et exogames et changent donc constamment. On a mis au point des variétés hybrides génétiquement uniformes qui offrent un potentiel de rendement plus élevé mais sont plus sensibles à une maladie appelée mildiou duveteux. En Inde, le mil chandelle est cultivé sur quelque 9 millions d'hectares et plus de 70 pour cent de cette superficie sont ensemencés en ces cultivars hybrides. Depuis que les hybrides de mil chandelle ont été cultivés pour la première fois à la fin des années 60, toutes les variétés nouvelles qui étaient appréciées des agriculteurs ont fini par succomber à une épidémie de mildiou duveteux. Malheureusement, au moment où les agriculteurs les plus démunis d'une région

donnée décident d'adopter une variété particulière, ses jours sont généralement comptés.

L'Institut international de recherche sur les cultures des zones tropicales semi-arides (ICRISAT) souhaitait réduire les risques liés à l'adoption d'hybrides de mil chandelle à rendement élevé et étendre la durée économique utile de ces variétés, en particulier pour les producteurs pauvres. Les biotechnologies nous ont aidé à y parvenir. Grâce aux outils du John Innes Centre et à l'appui du Programme de recherche phytologique du Ministère du développement international (DFID), nous avons mis au point et appliqué des outils de génétique moléculaire pour le mil chandelle. Nous avons cartographié les régions génomiques du mil chandelle qui contrôlent la résistance au mildiou duveteux, le potentiel de rendement en paille et le rendement en grains et en paille en situation de sécheresse. Ensuite, nos spécialistes de la sélection du mil ont utilisé la sélection classique et la sélection assistée par des marqueurs pour transférer plusieurs régions génomiques conférant une résistance améliorée au mildiou duveteux aux deux lignées parentales consanguines de sélection avancée de l'hybride apprécié HHB 67. Nous avons

<sup>1</sup> Tom Hash est Chercheur principal (reproduction cellulaire) à l'ICRISAT, Patancheru, Andhra Pradesh (Inde).

sont utilisées pour la sélection et la reproduction des cultures et des arbres. Elles sont souvent associées l'une à l'autre et couplées aux méthodes de sélection classiques.

**Culture cellulaire et tissulaire et micropropagation**

La micropropagation consiste à prendre de petits morceaux de tissu végétal, ou des structures complètes telles que des bourgeons, et à les cultiver dans des conditions artificielles pour élaborer des plants entiers. Elle est particulièrement utile pour préserver des plantes jugées

précieuses, cultiver des espèces à croissance délicate (comme de nombreux arbres), accélérer la sélection végétale et fournir une quantité abondante de matériel végétal à la recherche. Pour les plantes cultivées et les espèces horticoles, la micropropagation est désormais à la base d'un important secteur commercial qui compte des centaines de laboratoires dans le monde. Outre les avantages qu'elle présente du fait de la rapidité de propagation, cette technologie permet aussi de produire du matériel végétal exempt de maladies (encadré 7), notamment lorsqu'on l'associe aux kits de diagnostic pour le dépistage des maladies.

ensuite utilisé la sélection assistée par les marqueurs pour obtenir deux nouvelles variétés – ICMR 01004 et ICMR 01007 – avec deux groupes de gènes différents de résistance au mildiou duveteux.

Ces variétés ont donné des résultats au moins aussi bons que leurs lignées parentales pour le rendement en grains et en paille et sont sensiblement et nettement améliorées au point de vue de la résistance au mildiou duveteux. Elles ont également plusieurs caractères favorables, notamment la masse de 1 000 grains, la longueur du panicule, la hauteur de la plante et la résistance à la rouille. Les hybrides obtenus par croisement avec ICMR 01004 et ICMR 01007 ont été récemment mis à disposition pour des essais dans les États indiens du Gujarat, du Radjasthan et de l'Haryana dans le cadre du Projet indien d'amélioration coordonnée du mil chandelle. Ils avaient été précédemment évalués avec succès en 2002, et avaient fait preuve d'une légère supériorité du rendement en grains et d'une résistance bien meilleure au mildiou duveteux que HHB 67, tout en conservant le caractère hâtif pour lequel il est très apprécié.

L'un au moins de ces deux hybrides pourrait être mis en circulation pour

remplacer HHB 67 avant que celui-ci ne succombe (ce qui est certain) à une épidémie de mildiou duveteux. Étant donné que HHB 67 est très largement cultivé par les agriculteurs pauvres en Inde, si son remplacement en temps utile pouvait empêcher ce type d'épidémie pendant une année, les pertes évitées dépasseraient la valeur totale de l'appui financier à la recherche assuré par le Ministère du développement international pour l'élaboration et l'application des outils de génétique moléculaire pour le mil chandelle (3,1 millions de livres sterling à ce jour). Tous les avantages futurs de cette recherche effectuée par l'ICRISAT, par ses partenaires financés par le Ministère du développement international au Royaume-Uni et les partenaires du programme national qui collaborent en Inde peuvent être considérés comme des profits pour l'ensemble de la société.

On a entrepris des essais visant à développer l'application de la micropropagation en foresterie. Par comparaison avec la multiplication végétative par bouturage, les taux de multiplication plus importants obtenus par la micropropagation permettent une diffusion plus rapide du matériel végétal bien que l'augmentation des coûts et l'insuffisance des clones recherchés freinent son adoption généralisée.

### Sélection *in vitro*

La sélection *in vitro* a pour but de sélectionner du matériel génétique en imposant des pressions spécifiques aux

cultures tissulaires dans des conditions de laboratoire. De récentes publications signalent des corrélations intéressantes entre les réactions *in vitro* et l'expression des caractéristiques recherchées sur le terrain, le plus souvent la résistance à la maladie. On obtient également des résultats positifs pour la tolérance aux herbicides, aux métaux, à la salinité et aux faibles températures. S'agissant des critères de sélection généralement importants pour les essences forestières (notamment la vigueur, la forme du tronc et la qualité du bois), le manque de corrélation avec les réponses de terrain fait encore obstacle à la sélection *in vitro*.

## ENCADRÉ 7

**Micropopagation de bananiers exempts de maladie au Kenya**

Les bananiers sont généralement cultivés dans les pays en développement où ils constituent une source d'emplois, de revenus et d'aliments. La production bananière est en baisse dans de nombreuses régions du fait de problèmes d'organismes nuisibles et de maladies qui ne peuvent pas être résolus par la lutte agrochimique pour des raisons de coûts et d'effets négatifs sur l'environnement. Le problème est aggravé par le fait que le bananier est reproduit par clonage, de sorte que les plantes malades utilisées pour la reproduction donnent naissance à des plantes malades.

La micropopagation constitue un moyen de régénérer des plantules de bananiers exempts de maladies obtenues à partir de tissu sain. Au Kenya, on a

réussi à effectuer des cultures de tissus de pointes végétatives de bananiers. La pointe végétative initiale subit un traitement thermique pour détruire les organismes qui l'infectent et est utilisée ensuite pendant de nombreux cycles de régénération pour produire des plantes. Une seule section de tissu peut produire jusqu'à 1 500 nouvelles plantes en 10 cycles de régénération.

La micropopagation du bananier a eu des répercussions énormes au Kenya et dans beaucoup d'autres pays, contribuant à améliorer la sécurité alimentaire et à créer des revenus. Elle présente tous les avantages d'une technique relativement peu coûteuse et d'application aisée, et qui apporte des avantages environnementaux significatifs.

Cette méthode pourrait toutefois s'avérer utile dans les programmes de foresterie pour déceler la résistance à la maladie et la tolérance à la salinité, au gel et à la sécheresse.

**Génie génétique**

Le génie génétique permet de transmettre une caractéristique désirée mise en évidence dans un organisme qui n'est pas sexuellement compatible avec l'hôte. Dans le cas des végétaux, la méthode la plus fréquemment employée en génie génétique utilise comme vecteur une bactérie présente dans les sols, *Agrobacterium tumefaciens*. Les chercheurs introduisent le ou les gènes désirés dans la bactérie, puis infectent la plante hôte. Les gènes désirés sont transmis à l'hôte en même temps que l'infection. Cette méthode est principalement utilisée avec les espèces dicotylédones comme la tomate ou la pomme de terre. Certaines cultures, notamment des espèces monocotylédones comme le blé et le seigle, ne mutent pas aussi naturellement sous l'action de *A. tumefaciens*, bien que l'on soit récemment parvenu à modifier du blé et d'autres céréales. La technique de transformation la plus communément utilisée consiste à enrober le gène désiré de

particules d'or ou de tungstène et on utilise ensuite un «pistolet à gènes» pour propulser le gène dans l'hôte à très grande vitesse.

On distingue trois types distinctifs de cultures génétiquement modifiées: (a) «les transferts distants» où les gènes sont transférés entre des organismes appartenant à des règnes différents (par exemple des bactéries aux plantes); (b) «les transferts proches» où les gènes sont transférés entre deux espèces du même règne (d'une plante à l'autre par exemple); et c) «la manipulation» dans laquelle les gènes déjà présents dans le génome d'un organisme sont manipulés pour modifier le niveau ou schéma d'expression. Une fois le gène transféré, il faut tester la plante pour s'assurer que le gène est correctement exprimé et qu'il reste stable après plusieurs générations. Ce contrôle est généralement plus efficace qu'avec les croisements classiques parce que la nature du gène est connue; des techniques moléculaires permettent alors de déterminer son emplacement dans le génome et un moins grand nombre de modifications génétiques sont nécessaires.

Pour la plupart, les plantes transgéniques cultivées à ce jour ne comportent qu'un nombre très limité de gènes qui leur confèrent une résistance aux ravageurs

## ENCADRÉ 8

**Agriculture sur sols acides: amélioration de la tolérance des céréales à l'aluminium**

Miftahudin,<sup>1,2</sup> M.A. Rodriguez Milla,<sup>2</sup> K. Ross<sup>3</sup> et J.P. Gustafson<sup>3</sup>

L'aluminium présent dans les sols acides limite la croissance végétale sur plus de 30 pour cent de l'ensemble des terres arables, principalement dans les pays en développement. Il existe deux méthodes pour accroître la production végétale dans les sols acides. De la chaux peut être ajoutée au sol pour accroître le pH, mais il s'agit d'une mesure coûteuse et temporaire. Sinon, des cultivars génétiquement améliorés, tolérants à l'aluminium, peuvent être élaborés. Les cultivars existants de blé ne contiennent pas de variation génétique importante pour accroître la tolérance à l'aluminium. Une tolérance améliorée devra être introduite dans le blé à partir de pools de gènes d'espèces apparentées plus tolérantes. Une carte des liaisons génétiques du blé a été élaborée à l'aide des marqueurs disponibles pour le gène existant de tolérance à l'aluminium.

Le seigle est quatre fois plus tolérant à l'aluminium que le blé. Par conséquent, un gène de la tolérance du seigle à l'aluminium a été caractérisé. Les marqueurs du blé, de l'orge et du riz ont

été utilisés pour établir une liaison étroite, définir les régions avoisinant le gène du seigle et dresser une carte génétique à haute résolution. Un gène candidat possible a été utilisé pour l'expression génétique des racines, et pour des études temporelles qui ont montré l'expression dans des racines de seigle uniquement en situation de stress dû à l'aluminium.

Le ciblage du gène de tolérance à l'aluminium est un exemple de l'utilisation d'approches fondées sur les problèmes pour intégrer les outils moléculaires et de sélection afin d'améliorer la production de blé. L'utilisation des liaisons génétiques (synthénie) entre les céréales pour fournir des marqueurs afin d'identifier et de caractériser des caractères à valeur ajoutée permet de dégager des approches complémentaires pour améliorer la production de blé. Les obtenteurs peuvent utiliser les marqueurs avoisinant le gène du seigle dans des programmes de sélection assistée par des marqueurs dans des zones où les OGM ne peuvent pas être cultivés ou bien où seuls des outils de sélection classiques sont disponibles. En outre, ces marqueurs peuvent être utilisés pour le clonage à partir de cartes pour isoler le gène en question pour des approches transgéniques de l'amélioration du blé. Enfin, l'utilisation des liaisons de synthénie offre la technologie permettant de manipuler de nombreux caractères à valeur ajoutée pour l'amélioration des plantes cultivées d'autres espèces.

<sup>1</sup> Département d'agronomie, Université du Missouri, Columbia (États-Unis).

<sup>2</sup> Département de biologie, Université d'agronomie de Bogor (Indonésie).

<sup>3</sup> Unité de recherche de phytogénétique du Service de recherche agronomique du Département de l'agriculture des États-Unis et Département d'agronomie de l'Université du Missouri, Columbia (États-Unis d'Amérique).

et/ou une tolérance aux herbicides (voir le Chapitre 3 pour de plus amples informations sur les cultures transgéniques actuellement étudiées et cultivées commercialement). Toutefois, diverses caractéristiques et cultures transgéniques présentant davantage d'intérêt pour les pays en développement ont été élaborées sans jamais être commercialisées. L'encadré 8 traite d'un projet de recherche visant à améliorer la tolérance du blé à l'aluminium, problème qui

touche les sols acides dans de vastes zones d'Amérique latine et d'Afrique. Des travaux analogues sont en cours pour améliorer la tolérance des plantes à d'autres stress comme la sécheresse, la salinité des sols et les températures extrêmes.

Les cultures à valeur nutritionnelle améliorée pourraient jouer un rôle essentiel dans la lutte contre les carences en micronutriments dans les pays en développement. La biofortification

TABLEAU 2

Variation génétique des concentrations de fer, de zinc, de bêta-carotène et d'acide ascorbique relevées dans le matériel génétique de cinq aliments de base, en poids sec

	(mg/kg)			
	Fer	Zinc	Bêta-carotène <sup>1</sup>	Acide ascorbique
<b>RIZ</b>				
Brun	6-25	14-59	0-1	-
Usiné	1-14	14-38	0	-
<b>MANIOC</b>				
Racine	4-76	3-38	1-24 <sup>2</sup>	0-380 <sup>2</sup>
Feuilles	39-236	15-109	180-960 <sup>2</sup>	17-4200 <sup>2</sup>
<b>HARICOT</b>	34-111 <sup>1</sup>	21-54	0	-
<b>MAÏS</b>	10-63	12-58	0-10	-
<b>BLÉ</b>	10-99 <sup>3</sup>	8-177 <sup>2</sup>	0-20	-

<sup>1</sup> La gamme de l'ensemble des caroténoïdes est bien plus étendue.

<sup>2</sup> Poids frais.

<sup>3</sup> Y compris variétés sauvages.

Source: Centre international d'agriculture tropicale (CIAT), 2002.

et l'élaboration d'aliments à valeur nutritionnelle améliorée pourraient en outre fortement progresser si plusieurs biotechnologies pouvaient être associées. Grâce aux analyses de génome et aux cartes génétiques, on pourra identifier les gènes responsables de la variation naturelle de la teneur en nutriments des aliments communs (tableau 2). Ces gènes pourront alors être transférés dans les cultivars connus par les méthodes de sélection classiques et par sélection assistée par marqueurs, ou par génie génétique en cas d'insuffisance de la variation naturelle au sein d'une espèce. Des méthodes non transgéniques sont d'ores et déjà utilisées pour améliorer la teneur en protéines du maïs, la teneur en fer du riz et la teneur en carotène des patates douces et du manioc.

On peut aussi avoir recours au génie génétique quand la variation naturelle du nutriment désiré est insuffisante dans une espèce. L'encadré 9 expose le débat que suscite un projet visant à améliorer par génie génétique la teneur en protéines de la pomme de terre. Le riz transgénique Golden, bien connu, contient trois gènes étrangers – deux provenant de la jonquille et un d'une bactérie – qui produisent de la provitamine A (voir l'encadré 13 à la page xx). Les scientifiques ont déjà bien avancé dans l'élaboration d'un riz transgénique

«nutritionnellement enrichi» qui contiendra des gènes produisant de la provitamine A, du fer et davantage de protéines (Potrykus, 2003). D'autres aliments nutritionnellement enrichis sont en cours d'élaboration, notamment des huiles contenant moins d'acides gras indésirables. Par ailleurs, des aliments connus pour leur caractère allergène (les crevettes, les arachides, le soja, le riz, etc.) sont modifiés dans le but d'abaisser leur teneur en composés allergisants.

Le manque actuel de connaissances sur le contrôle moléculaire des caractéristiques les plus intéressantes est un facteur technique important qui limite l'application des modifications génétiques aux essences forestières. L'un des premiers essais publié sur des essences forestières génétiquement modifiées a été réalisé en 1988 sur des peupliers en Belgique. Depuis lors, plus de 100 essais ont été publiés sur 24 espèces d'arbres au moins, essentiellement des espèces cultivées pour le bois d'œuvre. Les caractéristiques que l'on a envisagé de modifier génétiquement chez les essences forestières sont notamment la résistance aux insectes et aux virus, la tolérance aux herbicides et la teneur en lignine. La diminution de la teneur en lignine serait particulièrement utile pour les espèces entrant dans la fabrication de pâte à papier car elle permettrait de réduire le volume

## ENCADRÉ 9

## La «protato»: aide aux plus démunis ou Cheval de Troie?

Les chercheurs de l'Université Jawaharlal Nehru en Inde ont mis au point une pomme de terre génétiquement modifiée qui produit près de un tiers à la moitié de protéines de plus que la pomme de terre classique, et notamment des quantités considérables de tous les acides aminés essentiels tels que la lysine et la méthionine, d'où son nom de «protato». La carence en protéines est courante en Inde et la pomme de terre est l'aliment de base des plus démunis.

La protato a été élaborée par une coalition d'institutions de bienfaisance indiennes, de chercheurs, d'instituts gouvernementaux et du secteur industriel dans le cadre d'une campagne d'une durée de 15 ans de lutte contre la mortalité infantile. La campagne vise à éliminer la mortalité infantile en fournissant aux enfants de l'eau propre, une alimentation améliorée et des vaccins.

La protato comprend un gène provenant de l'amarante, céréale à teneur élevée en protéines originaire d'Amérique du Sud et couramment vendue dans les magasins diététiques occidentaux. La protato a réussi les premiers essais de terrain et les tests de recherche des allergènes et des toxines. L'approbation finale par le Gouvernement indien sera obtenue dans cinq ans au minimum.

Les partisans de cette pomme de terre tels que Govindarajan Padmanaban, biochimiste à l'Institut indien des sciences, font valoir que cette pomme de terre peut fournir un supplément nutritionnel important aux enfants avec un faible risque d'allergie parce que les pommes de

terre et l'amarante sont déjà couramment consommées. En outre, il n'y a guère de menace pour l'environnement, car ni les pommes de terre ni l'amarante ont de plantes sauvages apparentées en Inde et cette pomme de terre ne nécessite aucune modification des pratiques habituelles de production. De surcroît, étant donné qu'elle a été mise au point par des chercheurs du secteur public en Inde, il n'est pas à craindre que des sociétés étrangères ne contrôlent cette technologie. Étant donné ces avantages, Padmanaban a fait observer: «Je pense qu'il est moralement impossible de s'y opposer.» (Coghlan, 2003).

Les opposants, tels que Charlie Kronick de Greenpeace, font valoir que les pommes de terre sont naturellement très pauvres en protéines (environ 2 pour cent) de sorte que, même si l'on double la teneur en protéines, on n'obtient qu'une contribution négligeable au problème de la malnutrition de l'Inde. Il déclare que l'effort de mise au point de cette pomme de terre visait davantage à obtenir l'acceptation par le public du génie génétique qu'à s'attaquer au problème de la malnutrition: «La cause de la faim n'est pas le manque de nourriture. C'est le manque de liquidités et d'accès à la nourriture. La création de ces cultures génétiquement modifiées sert à susciter l'intérêt du public à leur égard, alors qu'en réalité l'utilité de les consommer est pratiquement nulle. Je vois mal comment cette pomme de terre à elle seule pourrait changer quelque chose à la pauvreté.» (Charles, 2003).

de produits chimiques utilisés pour sa production.

### Sélection et reproduction des animaux et des poissons d'élevage

Voilà longtemps que les biotechnologies sont une source d'innovations dans la production et la transformation des produits

d'élevage et d'aquaculture, et elles ont eu un impact considérable sur les deux secteurs. Les percées rapides de la biologie moléculaire et les derniers progrès de la biologie de la reproduction ont permis la mise au point d'outils puissants qui ouvrent la voie à un nombre croissant d'innovations. Des technologies comme la génomique et les marqueurs moléculaires, dont il a été question plus haut, sont particulièrement

## ENCADRÉ 10

**L'état des ressources zoogénétiques dans le monde**

La FAO a été invitée par ses États Membres à élaborer et mettre en œuvre la Stratégie mondiale pour la gestion des ressources génétiques des animaux d'élevage. Dans le cadre de cette stratégie partant des pays, la FAO a invité 188 pays à participer à la préparation du premier rapport sur L'état des ressources génétiques dans le monde, devant être achevé avant 2006. À ce jour, 145 pays ont accepté de présenter des rapports nationaux et 30 de ces derniers ont été reçus et analysés (Cardellino, Hoffmann et Templeman, 2003). Ces rapports montrent bien que l'insémination artificielle est la biotechnologie la plus courante utilisée par les pays en développement dans le secteur de l'élevage. De nombreux pays ont demandé une formation pour utiliser davantage l'insémination artificielle, tout en se déclarant préoccupés par le fait que cette technique avait souvent été adoptée sans planification appropriée et pouvait menacer la conservation des races locales. Bien que le recours à l'ovulation

multiple et au transfert d'embryons (OMTE) soit mentionné et que le souhait de son adoption ou de son expansion ait été exprimé, aucun objectif clair n'est mentionné pour cette technique. Tous les pays ont exprimé le souhait d'adopter et de développer des techniques moléculaires, souvent en complément de la caractérisation phénotypique des races. La cryoconservation a été identifiée comme une priorité par tous les pays et les banques de gènes ont été recommandées, mais le financement reste un obstacle de taille. Lorsque des OGM animaux sont mentionnés, c'est principalement pour exprimer l'absence de réglementations appropriées et de directives pour leur éventuelle production, pour leur utilisation et leur échange. Certains pays se sont déclarés préoccupés par le fait que les biotechnologies dans le secteur de l'élevage devraient être appliquées en tant que partie intégrante d'une stratégie globale d'amélioration génétique, mais que ce n'est pas toujours le cas.

utiles pour comprendre, caractériser et gérer les ressources génétiques dans l'élevage et la pêche, comme dans l'agriculture et la foresterie (encadré 10). Le génie génétique a lui aussi sa place dans l'élevage et la pêche, bien que les techniques soient différentes, et d'autres technologies de la reproduction sont utilisées dans ces secteurs. Dans cette section, on traitera des biotechnologies de la reproduction qui sont spécifiquement employés dans ces deux secteurs.

Le principal objectif des biotechnologies de la reproduction du bétail est d'accroître l'efficacité de la reproduction et le taux d'amélioration génétique des animaux d'élevage. L'amélioration génétique des races adaptées aux conditions locales sera importante pour la mise en œuvre de systèmes de production durable dans les environnements de production très divers que l'on trouve dans les pays en développement et elle obtiendra probablement les meilleurs résultats grâce à l'association stratégique d'interventions

génétiques et non génétiques. Dans le secteur de l'aquaculture, les biotechnologies peuvent augmenter les taux de croissance, améliorer la gestion des espèces d'élevage et limiter le potentiel de reproduction des espèces génétiquement modifiées.

**Insémination artificielle et ovulation multiple avec transfert d'embryons**

Les progrès en matière d'insémination artificielle et d'ovulation multiple avec transfert d'embryons (OMTE) ont déjà eu un impact considérable sur les programmes d'amélioration du bétail dans les pays développés et nombre de pays en développement car ils permettent d'accélérer le processus d'amélioration génétique, de réduire les risques de transmission des maladies et d'accroître le nombre d'animaux issus d'un parent supérieur, le mâle dans le cas de l'insémination artificielle et la femelle pour l'ovulation multiple avec transfert d'embryons. Ils ont aussi motivé le secteur privé à engager des recherches sur

la sélection animale et largement développé le marché des souches de reproducteurs améliorés.

En 1998, plus de 100 millions d'inséminations artificielles ont été réalisées dans le monde sur du bétail (principalement du bétail laitier et des buffles), 40 millions sur des porcins, 3,3 millions sur des ovins et 0,5 million sur des caprins. Ces chiffres illustrent à la fois la rentabilité économique supérieure des troupeaux laitiers et le fait que la semence de taureau est bien plus facile à congeler que celles des autres animaux. Bien que plus de 60 millions d'inséminations artificielles aient été effectuées sur du bétail en Asie du Sud et en Asie du Sud-Est, l'Afrique en compte moins d'un million.

L'insémination artificielle n'est efficace que lorsque le secteur agricole a accès à des moyens techniques, institutionnels et autres bien plus importants que ceux nécessaires à la reproduction naturelle. Au plan positif, les agriculteurs qui ont recours à l'insémination artificielle n'ont pas à supporter les coûts et les risques liés à l'élevage de reproducteurs et peuvent se procurer des semences de n'importe quelle région de la planète.

Malgré le recours généralisé à l'insémination artificielle dans les pays développés et de nombreux pays en développement – même dans de petites exploitations modernes – elle n'est employée que dans les exploitations vouées à l'élevage intensif de bétail de valeur élevée. Il est clair que cette situation ne tient pas à des difficultés techniques de production ou de stockage des semences car, pour la plupart, les procédures sont désormais complètement normalisées et ont prouvé leur efficacité dans les climats tropicaux des pays en développement. En revanche, elle s'explique par de multiples problèmes d'organisation, de logistique et de formation des agriculteurs qui pèsent sur la qualité et l'efficacité de la technologie.

L'OMTE pousse l'insémination artificielle à une étape supérieure, tant du point de vue des améliorations génétiques possibles que du degré d'organisation et des capacités techniques nécessaires. L'ovulation multiple avec transfert d'embryons est l'une des technologies essentielles pour l'application de biotechnologies de la reproduction plus pointues, comme le clonage et la transgénique. En 2001, 450 000 embryons ont

été transférés dans le monde, principalement sur du bétail laitier, dont 62 pour cent en Amérique du Nord et en Europe, 16 pour cent en Amérique du Sud et 11 pour cent en Asie). Environ 80 pour cent des taureaux utilisés pour l'insémination artificielle sont issus de l'ovulation multiple avec transfert d'embryons. Pour les pays en développement, le principal avantage de cette technologie est de pouvoir importer des embryons congelés plutôt que du bétail vif, par exemple pour constituer un réservoir de géniteurs présentant les caractéristiques génétiques adaptées aux conditions locales, tout en supportant moins de risques sanitaires.

### Manipulation du lot chromosomique et inversion sexuelle chez les poissons

La maîtrise du sexe et de la capacité de reproduction des poissons peut jouer un rôle important aux plans commercial et environnemental. En effet, un sexe est généralement plus recherché que l'autre; ainsi, chez les esturgeons, seules les femelles produisent du caviar, tandis que les tilapias de sexe masculin grossissent plus rapidement qu'elles. La stérilité peut être souhaitable lorsque la reproduction affecte le goût du produit (comme chez les huîtres) ou quand les espèces d'élevage (transgéniques ou non) risquent de se mélanger aux populations naturelles. La manipulation du lot chromosomique et l'inversion sexuelle sont des techniques bien implantées qui permettent de maîtriser ces facteurs. Dans la première technique, les œufs de poissons peuvent être soumis à des chocs thermiques ou chimiques et à des chocs par application de pression afin de produire des individus dotés de trois lots chromosomiques au lieu des deux lots habituels. En règle générale, ces organismes triploïdes ne consacrent pas leur énergie à la reproduction et sont donc stériles au plan fonctionnel. L'inversion sexuelle peut être réalisée par plusieurs méthodes, notamment par administration des hormones appropriées. On peut ainsi transformer en femelles des tilapias qui sont génétiquement de sexe masculin en leur faisant subir un traitement à base d'œstrogènes. Quand ils s'accouplent aux mâles ordinaires, ces mâles génétiques ne produisent que des tilapias de sexe masculin.

### Le génie génétique appliqué aux animaux et aux poissons d'élevage

Chez les animaux, le génie génétique peut être utilisé pour introduire des gènes étrangers dans le génome de l'animal ou, au contraire, pour inactiver certains gènes par la technique dite du «knock-out». La méthode la plus utilisée à l'heure actuelle repose sur la micro-injection directe d'ADN dans les pronucléus des œufs fécondés, mais de nouvelles techniques se profilent déjà, comme le transfert nucléaire et l'utilisation de lentivirus comme vecteurs de l'ADN. Dans les premiers essais de génie génétique réalisés sur des animaux d'élevage, des gènes responsables de la croissance ont été introduits chez des porcs pour stimuler leur croissance et améliorer la qualité des carcasses. Aujourd'hui, les efforts de recherche portent sur la résistance aux maladies animales, comme la maladie de Marek chez les volailles, la tremblante du mouton et la mastite des vaches, ainsi qu'aux maladies pouvant contaminer les êtres humains comme les *Salmonella* chez les volailles. On peut citer d'autres exemples tels que l'augmentation de la teneur en caséine du lait et l'induction de la production de produits chimiques, pharmaceutiques ou industriels, dans le lait ou la semence des animaux. Bien que de conception simple, les méthodes utilisées pour modifier génétiquement des animaux d'élevage exigent un matériel spécialisé et une immense dextérité et aucune application agricole ne s'est révélée commercialement rentable à ce jour. Dans un avenir proche, les applications seront donc sans doute limitées à la production d'animaux transgéniques destinés à la production de produits industriels ou pharmaceutiques.

Le génie génétique est un secteur très dynamique de la recherche-développement en aquaculture. Les œufs de poissons étant souvent robustes et de grande taille, ils se prêtent bien à la manipulation et le transfert de gènes étrangers peut aisément se faire par injection directe ou par électroporation, technique où le transfert de gène est assisté par un champ électrique. Les gènes transférés chez les poissons ont généralement pour but de produire une hormone de croissance et cette technique a permis d'augmenter considérablement les taux de croissance des carpes, des saumons, des tilapias et d'autres

espèces. Par ailleurs, un gène issu de la plie rouge qui produit une protéine antigèle a été introduit chez des saumons dans l'espoir d'élargir l'aire d'élevage de ces poissons. Il n'a pas produit la protéine recherchée en quantité suffisante pour élever le saumon dans des zones plus froides, mais il a toutefois permis aux saumons de continuer à grossir pendant la période froide où les populations sauvages interrompent leur croissance. Ces applications en sont toujours au stade de la recherche-développement et aucun animal aquatique transgénique n'est encore disponible sur le marché.

## Autres biotechnologies

### Diagnostic et épidémiologie

Il est difficile de diagnostiquer les maladies des plantes et des animaux dont les signes sont parfois trompeurs, voire totalement absents, jusqu'à ce que des conséquences graves se déclarent. Des tests biotechnologiques pointus permettent d'identifier les agents responsables des maladies et de suivre les retombées des programmes de lutte sanitaire avec un degré de précision jusque-là impossible à atteindre. L'épidémiologie moléculaire caractérise les pathogènes (virus, bactéries, parasites et champignons) par séquençage des nucléotides qui permet d'en retracer l'origine. C'est un aspect particulièrement important pour les maladies épidémiques car l'identification de la source d'infection améliore considérablement la lutte sanitaire. Ainsi, l'analyse moléculaire des virus de la peste bovine a joué un rôle capital pour la détermination des lignées qui circulent dans le monde et la mise en œuvre du Programme mondial d'éradication de la peste bovine (PMEPB) (encadré 11). Dans le monde entier, l'essai d'immuno absorption enzymatique (ELISA) est devenu la méthodologie type pour le diagnostic et la surveillance de nombreuses maladies des animaux et des poissons, tandis que la technique de réaction en chaîne de la polymérase (PCR) est particulièrement utile pour diagnostiquer les maladies des plantes et, de plus en plus, les maladies du bétail et des poissons d'élevage. Les programmes de santé des plantes et des animaux ont aussi grandement gagné en efficacité avec la mise au point de sondes

génétiques qui permettent de distinguer et de déceler des pathogènes spécifiques dans des tissus, des animaux vifs et même dans des échantillons d'eau et de sol.

### Élaboration de vaccins

Des vaccins sont mis au point par génie génétique pour protéger les poissons et les animaux d'élevage contre les pathogènes et les parasites. Lors même que les vaccins élaborés par les voies traditionnelles ont joué un rôle majeur dans la lutte contre la fièvre aphteuse, les maladies transmises par la tique, la peste bovine et d'autres maladies du bétail, les vaccins recombinants présentent divers avantages par rapport aux vaccins classiques, notamment du fait de leur sécurité, de leur spécificité et de leur stabilité. Un aspect important de ces vaccins, lorsqu'ils sont associés au test de diagnostic approprié, est de permettre de distinguer les animaux vaccinés de ceux qui ont été naturellement infectés. C'est une fonction particulièrement utile dans les programmes de lutte sanitaire car elle permet de poursuivre les vaccinations même après que l'on envisage de passer de la lutte à l'éradication. Aujourd'hui, on dispose par exemple de vaccins améliorés pour la maladie de Newcastle, la peste porcine classique et la peste bovine. Outre les améliorations techniques, les progrès des biotechnologies réduiront les coûts de production des vaccins, ce qui en facilitera l'accès pour les petits exploitants.

### Nutrition animale

Les biotechnologies ont d'ores et déjà apporté des compléments utiles à la nutrition animale comme les enzymes, les probiotiques, les protéines unicellulaires et des additifs alimentaires antibiotiques qui sont largement utilisés dans les systèmes d'élevage intensif du monde entier pour améliorer la teneur en éléments nutritifs des aliments du bétail et accroître la productivité de l'élevage et de l'aquaculture. Les technologies à base de gènes sont de plus en plus employées pour améliorer la nutrition des animaux, soit en modifiant les aliments pour les rendre plus digestes, soit en modifiant les systèmes digestif et métabolique des animaux pour qu'ils tirent davantage profit de leur alimentation. Les progrès sur ce dernier point seront sans

doute assez lents en raison du manque actuel de connaissances sur la génétique, la physiologie et la biochimie sous-jacentes, mais on peut déjà citer un exemple de succès commercial dans les systèmes intensifs à fort volume d'intrants, à savoir la somatotropine recombinante, une hormone qui augmente la production de lait des vaches laitières et accélère la croissance des animaux de boucherie tout en favorisant une viande maigre.

### Conclusions

Les biotechnologies viennent compléter nombre des aspects de la recherche agricole classique, sans se substituer à elle. Elles fournissent toute une gamme d'outils qui améliorent notre compréhension des ressources génétiques pour l'alimentation et l'agriculture et, partant, leur gestion. Ces outils contribuent déjà aux programmes de sélection et de conservation en facilitant le diagnostic, le traitement et la prévention des maladies des plantes et des animaux. Les biotechnologies apportent aux chercheurs de nouvelles connaissances et de nouveaux outils qui accroissent l'efficacité et la rentabilité de leurs travaux. Les programmes de recherche fondés sur les biotechnologies peuvent dès lors être considérés comme un prolongement plus précis des approches classiques (Dreher *et al.*, 2000). Parallèlement, le génie génétique peut être vu comme un changement d'orientation majeur par rapport aux méthodes de sélection classique car il permet aux scientifiques de transférer du matériel génétique entre différents organismes qui ne pourraient être sélectionnés par les méthodes conventionnelles.

Les biotechnologies agricoles sont intersectorielles et interdisciplinaires. Les techniques moléculaires et leurs applications sont en grande partie les mêmes dans tous les secteurs de l'alimentation et de l'agriculture, mais les biotechnologies ne peuvent se suffire à elles-mêmes. Pour les cultures, par exemple, le génie génétique ne peut être appliqué sans les connaissances issues de la génomique, et celle-ci n'a guère d'utilité dans la pratique sans un programme efficace de sélection végétale. Chaque objectif de recherche implique la maîtrise de

## ENCADRÉ 11

**Biotechnologie: faire disparaître la peste bovine dans le monde**

La peste bovine, l'une des maladies du bétail les plus dévastatrices au monde, menace gravement des millions de petits agriculteurs et de pasteurs qui sont tributaires des bovins pour s'alimenter et gagner leur vie. Cette maladie virale qui touche les bovins, y compris les buffles, les yaks et les espèces sauvages apparentées, a détruit près de 90 pour cent des bovins d'Afrique subsaharienne dans les années 80. Une épidémie qui a sévi entre 1979 et 1983 a tué plus de 100 millions de bovins en Afrique, dont plus de 500 000 dans le seul Nigéria, provoquant des pertes estimatives de 1,9 milliard de dollars EU. L'Asie et le Proche-Orient ont également été touchés de plein fouet.

Aujourd'hui, la maladie a presque disparu de la planète: on estime que l'Asie et le Proche-Orient sont exempts du virus et d'énormes efforts sont faits pour veiller à ce qu'il ne se propage pas à partir de son dernier réservoir – qui se trouve, pense-t-on, dans l'écosystème pastoral somalien, qui englobe le nord-est du Kenya et le sud de la Somalie. L'éradication complète de la peste bovine est à notre portée. La peste bovine serait, après la variole, la deuxième maladie à être éradiquée dans le monde.

Les progrès réalisés jusqu'ici témoignent d'un triomphe remarquable des sciences vétérinaires et constituent un exemple tout à fait concluant de ce qui peut être fait lorsque la communauté internationale et les divers pays, leurs services vétérinaires et leurs communautés d'agriculteurs, coopèrent pour élaborer et mettre en œuvre des politiques

fondées sur les résultats et des stratégies permettant de les appliquer. La Campagne panafricaine d'éradication de la peste bovine supervisée par l'Union africaine et le Programme mondial d'éradication de la peste bovine (PMEPB) supervisé par la FAO sont les principales institutions de coordination de la lutte contre la peste bovine.

Les biotechnologies sont au cœur de cet effort. D'abord, elles ont permis la mise au point et la production à grande échelle des vaccins utilisés pour protéger des millions d'animaux grâce à des campagnes nationales de vaccination massive. Le vaccin initial, mis au point par le docteur Walter Plowright et ses collègues au Kenya, avec l'appui du Royaume-Uni, était préparé à partir d'un virus atténué par passages successifs sur culture cellulaire. Le docteur Plowright a reçu le World Food Prize en 1999 pour ses travaux. Bien que très efficace et sans danger, ce vaccin perdait une partie de son activité lorsqu'il était exposé à la chaleur. Des recherches ultérieures ont été effectuées pour mettre au point un vaccin thermostable à utiliser dans les zones isolées. Le docteur Jeffery Mariner y est parvenu grâce à des recherches en Éthiopie appuyées par l'Agence des États-Unis pour le développement international (USAID).

En outre, les biotechnologies ont fourni la plateforme technologique (ELISA, systèmes chromatographiques «pen-side» et test moléculaire) pour détecter et identifier les virus et suivre l'efficacité des campagnes de vaccination.

tout un ensemble d'éléments technologiques. Les biotechnologies doivent trouver leur place dans un programme global et intégré de recherche agricole qui tire profit des travaux réalisés dans d'autres secteurs, d'autres disciplines et d'autres programmes nationaux. Cette situation a de multiples incidences qui devront être envisagées par les pays en développement et les partenaires du développement lors de la conception et de la mise en œuvre des politiques nationales

de recherche, des institutions et des programmes de renforcement des capacités (voir le Chapitre 8).

Les biotechnologies agricoles sont internationales. Bien que la majorité de la recherche fondamentale en biologie moléculaire soit le fait des pays développés (voir le Chapitre 3), ces travaux peuvent aussi profiter aux pays en développement car ils permettent de mieux comprendre la physiologie de l'ensemble des plantes et

Avant l'arrivée de ces techniques et des stratégies nécessaires de prélèvement et de test, qui ont été élaborées par la FAO et par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) avec un appui de l'Agence suédoise de coopération internationale au développement (Asdi), les animaux vaccinés ne pouvaient pas être distingués des animaux infectés, de sorte que les pays ne pouvaient pas démontrer qu'ils étaient exempts de peste bovine. Il leur fallait alors mener des programmes coûteux de vaccination annuelle indéfiniment tout en continuant à souffrir des restrictions aux déplacements d'animaux et au commerce qui étaient imposées pour éviter la propagation de la maladie.

Les effets économiques de ces efforts se font déjà sentir très nettement. Bien que le coût de la vaccination et des prélèvements et analyses de sang ait été élevé à la fois pour les pays en développement et pour les pays développés, l'efficacité des campagnes nationales et la coordination régionale et mondiale sont démontrées par le fait qu'il ne reste plus qu'un petit réservoir de la maladie dans le monde. En revanche, en 1987, par exemple, la maladie était présente dans 14 pays africains ainsi qu'au Pakistan et dans certains pays du Proche-Orient.

Bien que les coûts et avantages soient très variables d'un pays à l'autre, les chiffres pour l'Afrique démontrent la rentabilité de la Campagne panafricaine et du Programme mondial d'éradication de

la peste bovine. Les grandes épidémies de peste bovine durent habituellement cinq ans et provoquent une mortalité totale de 30 pour cent. Avec une population bovine totale de 120 millions de têtes en Afrique subsaharienne, cela représente quelque 8 millions de têtes de bétail par an. Avec une valeur estimative de 120 dollars par animal, le coût de toute nouvelle grande épidémie de peste bovine serait de l'ordre de 960 millions de dollars. Dans le cadre de la Campagne panafricaine, quelque 45 millions de bovins ont été vaccinés chaque année, ce qui a coûté 36 millions de dollars EU, et les coûts du suivi et de la surveillance sérologiques étaient de l'ordre de 2 millions de dollars. Cela donne un ratio annuel coûts-avantages d'environ 22 : 1 et un avantage économique annuel net pour la région d'au moins 920 millions de dollars.

La Campagne panafricaine et le Programme mondial d'éradication de la peste bovine ont également fourni d'autres avantages significatifs. L'un des principaux est que grâce aux politiques, stratégies et arrangements institutionnels mis au place pour lutter contre la peste bovine, et qui ont permis d'établir des liens efficaces entre les agriculteurs, le personnel de terrain et de laboratoire et les autorités nationales, se sont fait jour des possibilités pour les pays d'aller de l'avant et de relever les défis de la lutte contre d'autres maladies ayant une incidence sur l'élevage et la sécurité alimentaire dans le monde ou d'éradiquer celles-ci.

des animaux. Les conclusions des projets sur le génome humain et sur celui de la souris fournissent des informations utiles pour les animaux d'élevage, et vice versa; de même, les études sur le maïs et le riz permettent de tirer des parallèles avec les cultures vivrières comme le sorgho et le teff. Des recherches spécifiques doivent toutefois être menées sur les races et les espèces importantes pour les pays en développement. Ces pays abritent en effet la biodiversité agricole la plus

riche du monde, mais rares sont les travaux entrepris pour caractériser ces espèces végétales et animales au plan moléculaire, évaluer leur potentiel de production et leur capacité à résister aux maladies et aux stress environnementaux, voire même pour assurer leur conservation à long terme.

L'application des nouvelles biotechnologies moléculaires et des nouvelles stratégies de sélection aux races animales et végétales importantes pour les petits exploitants des

pays en développement sera certainement freinée par divers facteurs dans un avenir proche (voir les Chapitres 3 et 7). Signalons notamment la pénurie de crédits de recherche garantis à long terme, l'insuffisance des capacités techniques et opérationnelles, la faible valeur commerciale des plantes et des races concernées, l'absence de programmes classiques de sélection et la nécessité de procéder à la sélection dans les environnements de production concernés. Quoiqu'il en soit, les pays en développement

sont déjà confrontés à la nécessité d'évaluer les cultures génétiquement modifiées (voir les Chapitres 4 à 6) et ils devront aussi un jour ou l'autre évaluer l'utilisation d'arbres, d'animaux et de poissons d'élevage génétiquement modifiés. Ces innovations permettront peut-être d'accroître la production, la productivité, la qualité des produits et leur capacité d'adaptation, mais elles seront sans aucun doute à l'origine d'enjeux nouveaux pour la recherche et les capacités de réglementation des pays en développement.

### 3. De la Révolution verte à la Révolution génétique

La Révolution verte a apporté à des millions de petits agriculteurs d'Asie et d'Amérique latine d'abord, puis d'Afrique, des variétés semi-naines de riz et de blé à haut rendement élaborées au moyen des méthodes de sélection classiques. Les gains réalisés pendant les premières décennies de la Révolution verte ont été élargis dans les années 80 et 90 à d'autres cultures et régions défavorisées (Evenson et Gollin, 2003). À la différence des travaux qui sont à l'origine de la Révolution verte, la plupart des recherches sur les biotechnologies agricoles et la quasi-totalité des activités de commercialisation associées sont le fait de sociétés privées des pays industrialisés.

C'est là un changement spectaculaire par rapport à la Révolution verte où le secteur public a très largement contribué à diffuser les résultats de recherche et les technologies. Ce changement de paradigme est lourd de conséquences pour le type de travaux qui sont engagés, pour les technologies mises au point et la manière dont elles sont diffusées. La prédominance du secteur privé dans les biotechnologies agricoles suscite de nombreuses craintes car les agriculteurs des pays en développement, notamment les plus pauvres, pourraient être laissés pour compte, soit faute d'innovations adaptées à leurs besoins, soit du fait de leur coût élevé.

C'est grâce aux recherches menées par le secteur public qu'ont pu être élaborées les variétés de blé et de riz à haut rendement à l'origine de la Révolution verte. Les chercheurs du secteur public national et international ont cultivé des gènes nanifiants dans des cultivars d'élite de blé et de riz, ce qui a intensifié la production de grains et de tiges plus petites, et leur a permis de tolérer des apports d'eau et d'engrais plus importants. Ces cultivars semi-nains ont été mis gratuitement à la disposition des sélectionneurs des pays en développement qui les ont adaptés aux conditions locales de production. Dans certains pays, des sociétés privées ont pris part à l'élaboration et à la

commercialisation des variétés localement adaptées, mais le matériel génétique amélioré a été fourni par le secteur public et distribué gratuitement en tant que bien public (Pingali et Raney, 2003).

Les pays qui ont tiré le plein avantage des possibilités offertes par la Révolution verte sont ceux qui disposaient – ou se sont rapidement dotés – de solides capacités nationales de recherche agricole. Dans ces pays, les chercheurs ont pu procéder aux adaptations locales nécessaires pour s'assurer que les variétés améliorées répondaient aux besoins de leurs agriculteurs et de leurs consommateurs. Les capacités nationales de recherche agricole ont été un facteur capital pour l'accès aux technologies agricoles de la Révolution verte et pour leur application et il en va de même aujourd'hui pour les biotechnologies. L'existence de capacités nationales de recherche permet à un pays d'importer et d'adapter des technologies agricoles élaborées ailleurs, de mettre au point des applications répondant aux besoins locaux (par exemple les cultures «orphelines») et d'adopter une réglementation appropriée en la matière.

La révolution biotechnologique est en revanche très largement dirigée par le secteur privé. On doit au secteur public les travaux de recherche fondamentale qui soutiennent les biotechnologies agricoles, mais des sociétés privées sont à l'origine de la plupart des travaux de recherche appliquée et de la quasi-totalité des applications commerciales. Trois forces conjuguées viennent transformer la façon dont les technologies agricoles améliorées sont apportées aux agriculteurs de la planète. Il y a tout d'abord un climat général qui incite de plus en plus à la protection de la propriété intellectuelle des obtentions végétales. Vient ensuite le rythme accéléré des nouvelles découvertes et l'importance croissante de la biologie moléculaire et du génie génétique. Enfin, le commerce des intrants et des produits agricoles est de plus en plus ouvert

dans presque tous les pays, ce qui se traduit par une expansion du marché potentiel des nouvelles technologies et des anciennes technologies apparentées. Cette situation est extrêmement motivante pour la recherche privée et vient modifier la structure des efforts de recherche agricole publics et privés, notamment pour l'amélioration des plantes cultivées (Pingali et Traxler, 2002).

Du fait de l'importance croissante de la recherche transnationale privée, les pays en développement doivent assumer des coûts de transaction de plus en plus élevés pour avoir accès à ces technologies et les mettre en pratique. Les réseaux publics internationaux qui permettent aujourd'hui la mise en commun des technologies entre pays, et donc d'optimiser leurs retombées, sont de plus en plus menacés. Il est désormais urgent de concevoir un système de flux technologiques qui préserve les motivations du secteur privé en faveur de l'innovation, tout en répondant aux besoins des agriculteurs pauvres des pays en développement.

Dans la première section de ce chapitre, on passe en revue l'organisation et les impacts de la recherche agricole et des flux technologiques de 1960 à 1990, période dominée par le paradigme de la Révolution verte fondé sur la recherche publique internationale. La deuxième section traite de la tendance à la privatisation croissante des activités de recherche-développement agricole et de ses conséquences pour l'accès des pays en développement aux nouvelles technologies, telles qu'attestées par les récentes tendances mondiales de la recherche, du développement et de la commercialisation des biotechnologies. Le chapitre se conclut sur diverses questions quant au potentiel de la Révolution génétique à servir les intérêts des pauvres. Ces questions sont discutées dans les chapitres suivants du rapport.

### **La Révolution verte: recherche, développement, accès et retombées**

Au cours des 40 dernières années, la Révolution verte a été à l'origine d'une extraordinaire période de croissance de la productivité des cultures alimentaires dans les pays en développement (Evenson

et Gollin, 2003). Cette avancée est due à la combinaison d'investissements importants dans la recherche agronomique, les infrastructures et le développement des marchés et à un bon soutien politique. Ces aspects de la stratégie de la Révolution verte ont permis d'intensifier la croissance de la productivité en dépit de la raréfaction et de l'enchérissement des terres (Pingali et Heisey, 2001).

### **Recherche publique et transferts internationaux de technologies**

La Révolution verte est venue contredire l'opinion classique selon laquelle les technologies agricoles n'étaient pas transposables, soit parce qu'elles étaient conçues pour des systèmes agroclimatiques spécifiques, comme les biotechnologies, soit parce qu'elles étaient sensibles aux prix relatifs des facteurs, comme les technologies mécaniques (Byerlee et Traxler, 2002). Pour stimuler la productivité des cultures alimentaires, la stratégie de la Révolution verte était explicitement basée sur l'hypothèse selon laquelle ces technologies pouvaient transcender les frontières politiques et agroclimatiques et avoir des retombées positives si les mécanismes institutionnels appropriés étaient en place. Le Groupe consultatif pour la recherche agricole internationale (GCRAI) a donc été spécifiquement constitué pour produire des retombées technologiques positives, notamment dans les pays qui n'étaient pas en mesure de tirer le plein profit de leurs investissements dans la recherche. Or, qu'advient-il des effets d'entraînement de la recherche-développement agricole dans une situation caractérisée par une intégration mondiale croissante des systèmes d'offre alimentaire?

Les grandes découvertes qui ont donné le coup d'envoi de la Révolution verte à la fin des années 60 sont dues aux méthodes classiques de sélection qui avaient d'abord comme objectif d'accroître le potentiel de rendement des principales cultures céréalières. Après les premiers succès spectaculaires enregistrés sur le blé et le riz dans les années 60, le rendement potentiel des principales céréales n'a cessé d'augmenter à une cadence régulière. Ainsi, le rendement potentiel du blé irrigué s'est accru au taux de 1 pour cent

l'an durant les trois dernières décennies, soit une amélioration de quelque 100 kg par hectare et par an (Pingali et Rajaram, 1999). Globalement, aucune recherche n'a été effectuée pendant les premières décennies de la Révolution verte sur la plupart des plantes cultivées par les agriculteurs sans ressources des zones agroécologiques peu favorables (comme le sorgho, le millet, l'orge, le manioc ou les légumineuses), pas plus qu'elles n'ont donné lieu à l'élaboration de matériel génétique d'élite; depuis les années 80 toutefois, des variétés modernes de ces plantes ont été mises au point et leur rendement potentiel s'est amélioré (Evenson et Gollin, 2003). Outre les travaux qu'ils mènent pour faire reculer le seuil de rendement des cultures céréalières, les phytogénéticiens enregistrent toujours plus de succès dans des domaines moins brillants mais tout aussi importants de la recherche appliquée. Il est intéressant de noter par exemple l'élaboration de plantes présentant une résistance durable à une large gamme d'insectes et de maladies, de plantes plus tolérantes à divers stress physiques, de plantes dotées d'un cycle de croissance très raccourci et de grains céréaliers au goût et aux qualités nutritionnelles améliorés.

Avant 1960, il n'existait aucun système officiel permettant aux phytogénéticiens de se procurer du matériel génétique hors de leurs frontières. Depuis lors, le secteur public international (par le système du GCRAI) est devenu la principale source d'approvisionnement en matériel génétique amélioré élaboré par les méthodes classiques de sélection, notamment pour les espèces se reproduisant par autopolinisation, comme le riz et le blé, ainsi que pour le maïs à pollinisation libre. Les réseaux du GCRAI se sont développés au cours des années 70 et 80 qui ont été marquées par des investissements croissants dans la recherche agricole publique et l'insuffisance, voire l'absence, de législation sur la propriété intellectuelle. Les phytogénéticiens s'échangeaient le matériel génétique de manière informelle, ouverte et généralement gratuite. Les sélectionneurs pouvaient fournir leur matériel aux pépinières et se flatter de le voir adopté dans d'autres pays; de même, ils pouvaient à leur guise s'en procurer pour leur propre utilisation.

Les flux internationaux de matériel génétique ont eu une forte incidence sur la rapidité et le coût des programmes d'élaboration de plantes cultivées menés par les systèmes nationaux de recherche agricole (SNRA), d'où des gains d'efficacité énormes (Evenson et Gollin, 2003). Traxler et Pingali (1999) font valoir que l'existence même d'un système d'échange gratuit et sans entrave, donnant accès au meilleur matériel génétique disponible dans le monde, permet aux pays de prendre des décisions stratégiques sur l'importance des investissements qu'ils doivent consentir dans les capacités de sélection végétale. Même les SNRA dotés de programmes de recherche pointus sur les plantes cultivées, comme le Brésil, la Chine et l'Inde, font grande utilisation des cultivars issus de ces pépinières qui leur servent de matériel de présélection ou de variétés abouties (Evenson et Gollin, 2003). Les petits pays ont opté pour une conduite rationnelle et profité du système international plutôt que d'investir dans leurs propres infrastructures de sélection végétale (Maredia, Byerlee et Eicher, 1994).

Evenson et Gollin (2003) signalent que même dans les années 90, le système du GCRAI comportait un grand nombre de variétés modernes pour la plupart des cultures alimentaires; 35 pour cent des obtentions provenaient de croisements entre des variétés du GCRAI, et 22 pour cent d'entre elles comptaient un parent issu d'un croisement du GCRAI ou un autre ancêtre provenant de la même source. Ils font valoir que le matériel génétique fourni aux pays en développement par les centres internationaux leur ont permis de bénéficier des effets d'entraînement des investissements réalisés par d'autres pays dans l'amélioration des cultures, et d'enregistrer des gains de productivité qui auraient été moindres, voire inexistantes, s'ils avaient été contraints de s'en tenir aux seules ressources génétiques disponibles au début de cette période.

### Impacts des technologies d'amélioration des cultures alimentaires

On ne manque pas de preuves empiriques concernant les retombées de la recherche agricole moderne et des flux internationaux de variétés modernes de plantes alimentaires sur la production, la productivité, les revenus et le bien-être des populations. Evenson et

## CONTRIBUTION SPÉCIALE 1

Le défi du XXI<sup>e</sup> siècle: Nourrir 10 milliards de personnes

*Norman E. Borlaug<sup>1</sup>*

Depuis 35 ans, la production céréalière a plus que doublé, progressant plus vite que la population mondiale. L'adoption rapide des variétés récentes, le triplement de la consommation d'engrais chimiques et le doublement des superficies irriguées ont été les piliers de cette Révolution verte. En accroissant les rendements sur les meilleures terres agricoles, les agriculteurs du monde ont pu laisser de vastes étendues de terres disponibles pour d'autres usages.

La population mondiale pourrait atteindre 10 milliards d'habitants au milieu du siècle. Pendant les 20 années à venir, la demande mondiale de céréales va augmenter de 50 pour cent, sous l'effet de la croissance rapide de la consommation de fourrages et de viande. À l'exception

des zones à sols acides d'Afrique et d'Amérique du Sud, les possibilités d'expansion des superficies mondiales sont limitées, et c'est surtout sur des terres déjà cultivées qu'il faudra accroître la production vivrière, en maintenant et en améliorant la productivité de ces terres.

Les 842 millions de personnes qui souffrent de la faim dans le monde vivent pour la plupart de l'agriculture pratiquée sur des terres marginales. Les ménages souffrant de l'insécurité alimentaire dans ces zones rurales à risque subissent des sécheresses fréquentes, ont des terres dégradées, souffrent de l'éloignement des marchés et des insuffisances des institutions de commercialisation. Pour nombre d'entre eux, la sécurité alimentaire passe par une augmentation de la production et des revenus agricoles. Des investissements dans la science, les infrastructures et la conservation des ressources sont nécessaires pour accroître la productivité et abaisser les risques sur les terres marginales. Certes, les difficultés qui caractérisent ces environnements ne

<sup>1</sup> *Norman Borlaug est Président de la Sasakawa Africa Association, Professeur honoraire d'agriculture internationale à la Texan A&M University, et Prix Nobel de la paix de 1970. Il est connu comme le père de la Révolution verte pour ses travaux complètement nouveaux en matière de sélection et de production du blé.*

Gollin (2003) fournissent des informations détaillées sur l'adoption généralisée des variétés modernes, pour toutes les grandes cultures alimentaires, et sur leur impact. L'adoption des variétés modernes (taux moyen pour l'ensemble des cultures) s'est rapidement généralisée durant les deux décennies de la Révolution verte, pour s'accroître encore pendant les décennies suivantes, passant de 9 pour cent en 1970 à 29 pour cent en 1980, et de 46 pour cent en 1990 à 63 pour cent en 1998. En outre, dans bien des régions et pour nombre de plantes, les variétés modernes de première génération ont été remplacées par des variétés de seconde et troisième générations (Evenson et Gollin, 2003).

L'augmentation de la production agricole sur les 40 dernières années est davantage due à une amélioration du rendement à l'hectare qu'à un accroissement des

superficies plantées. Des données de la FAO montrent par exemple que dans tous les pays en développement, les rendements de blé ont grimpé de 208 pour cent de 1960 à 2000; les rendements de riz se sont accrus de 109 pour cent; les rendements de maïs de 157 pour cent; les rendements de pomme de terre de 78 pour cent; et ceux de manioc de 36 pour cent (FAO, 2003). Les tendances de la productivité totale des facteurs sont conformes aux mesures partielles de la productivité, comme le taux de croissance du rendement (Pingali et Heisey, 2001).

Au cours des dernières décennies, la rentabilité des investissements dans le matériel génétique moderne à haut rendement a été précisément mesurée par nombre d'économistes. Plusieurs rapports récents récapitulent et analysent les données issues de centaines d'études menées dans les 30 années passées qui visent à calculer

pourront pas toutes être surmontées, mais des améliorations sensibles devraient être possibles. Les biotechnologies permettront de mettre au point des obtentions plus tolérantes aux stress abiotique et biotique et plus riches en éléments nutritifs. Il faut poursuivre l'amélioration génétique des cultures vivrières – par les outils de recherche classiques et par les biotechnologies – pour faire progresser les rendements et les stabiliser.

Au néolithique, l'homme – ou plutôt la femme – a acclimaté presque toutes nos espèces vivrières et animales sur une période relativement courte, il y a 10 000 à 15 000 ans. Ensuite, des centaines de générations d'agriculteurs ont apporté d'énormes modifications génétiques à toutes nos principales espèces végétales et animales. Grâce aux progrès faits par la science depuis 150 ans, nous avons maintenant, grâce à la phytogénétique et à la sélection, des moyens d'obtenir à volonté ce que jusqu'ici la nature faisait par hasard ou à dessein. La modification génétique des plantes cultivées, loin de relever de la sorcellerie

consiste à utiliser progressivement les forces de la nature et à les mettre au service de l'alimentation. En effet, le génie génétique – sélection végétale à l'échelle moléculaire – n'est qu'une étape du voyage scientifique de l'homme au cœur des génomes du vivant. Il ne saurait remplacer la sélection classique, mais il peut la compléter en permettant d'identifier les caractères souhaitables dans des groupes taxonomiques qui sont des parents éloignés et de les transférer plus vite avec et plus de précision dans des espèces cultivées à haut rendement et de qualité.

Le monde a déjà ou aura bientôt les technologies nécessaires pour nourrir durablement 10 milliards de personnes. Cependant, l'accès à ces technologies n'est pas assuré, en raison de problèmes liés aux droits de propriété intellectuelle, à l'acceptation des technologies par la société civile et les gouvernements, aux obstacles financiers et d'éducation qui tiennent les agriculteurs pauvres à l'écart et les empêchent d'adopter les nouvelles technologies.

le rendement des investissements dans la recherche agricole en termes sociaux. Elles examinent notamment les investissements réalisés par les institutions publiques nationales et internationales en Afrique, en Asie, en Amérique latine et dans les pays membres de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) ainsi que par le secteur privé (Alston *et al.*, 2000; Evenson et Gollin, 2003). En dépit des différentes méthodes utilisées dans ces études, les résultats sont d'une remarquable cohérence. Au plan social, le rendement moyen des investissements publics dans la recherche agricole annoncé dans ces études est d'environ 40 à 50 pour cent. Les recherches engagées par le secteur privé ont produit des taux de bénéfices sociaux du même ordre.

La réduction des prix alimentaires est une conséquence immédiate de la recherche

agricole pour les pauvres qui ne relèvent pas du secteur agricole, comme sur ceux des zones rurales qui sont acheteurs nets de denrées alimentaires. L'adoption généralisée des technologies à base d'engrais et de semences améliorées a engendré une mutation importante de l'offre alimentaire en intensifiant les rendements et en contribuant à la baisse du prix réel des denrées alimentaires:

*Le relèvement du pouvoir d'achat des pauvres – dû tant à l'amélioration de leurs revenus qu'à la baisse du prix des denrées alimentaires de base – est probablement la principale cause des gains nutritionnels engendrés par la recherche agricole. Seuls les pauvres sont victimes de la faim. Étant donné qu'une part relativement importante de leurs revenus est consacrée à l'alimentation, les effets sur les revenus des modifications de l'offre dues à la recherche peuvent avoir des retombées importantes sur la*

## CONTRIBUTION SPÉCIALE 2 Vers une Révolution toujours verte

M.S. Swaminathan<sup>1</sup>

En août 1968, le Gouvernement indien a mis en circulation un timbre intitulé «Révolution verte» afin de sensibiliser l'opinion publique à la voie révolutionnaire que l'Inde avait empruntée pour produire davantage de blé. Tout en mettant l'accent sur les rendements du blé, le gouvernement a aussi lancé un programme massif de mise au point et de diffusion de variétés de riz, de maïs, de sorgho et de mil chandelle à haut rendement. Véritables moteurs de la «Révolution verte» en Inde, ces programmes ont permis d'apporter des améliorations prodigieuses à la production et à la productivité sans expansion des superficies cultivées.

Ces variétés à haut rendement nécessitant des intrants – engrais et eau d'irrigation – les spécialistes des sciences sociales ont accusé les technologies de la Révolution verte de ne pas être neutres au point de vue des ressources. Les écologistes ont attaqué la Révolution verte en raison des atteintes potentielles

à la productivité à long terme dues à l'utilisation excessive de pesticides et d'engrais et à la monoculture. Même si la Révolution verte a réussi à libérer des millions de personnes de la misère, l'incidence de la pauvreté, la faim endémique, les maladies contagieuses, les taux de mortalité infantile et maternelle, le faible poids à la naissance, les retards de croissance et l'illettrisme restent élevés.

Les préoccupations des spécialistes des sciences sociales et des écologistes et les problèmes urgents de la pauvreté et de la faim ont conduit à élaborer le concept d'une «Révolution toujours verte» afin de souligner la nécessité d'améliorer durablement la productivité des cultures sans qu'elle s'accompagne de répercussions négatives pour l'environnement et la société. Une Révolution toujours verte exige que nous soyons attentifs aux voies qui peuvent aider à améliorer la productivité, la qualité et à créer de la valeur ajoutée dans des conditions de diminution des disponibilités de terres arables et d'eau d'irrigation par habitant, d'expansion des stress biotiques et abiotiques et d'évolution rapide des préférences des consommateurs et du marché. Cela nécessitera la mobilisation optimale des connaissances traditionnelles,

<sup>1</sup> L'auteur est le Président de la M.S. Swaminathan Research Foundation. Il travaille depuis 50 ans avec des chercheurs et des décideurs à divers problèmes de génétique végétale fondamentale et appliquée ainsi que de recherche-développement agricole. Il est connu comme étant le père de la Révolution verte en Inde.

*nutrition, notamment quand ces modifications résultent de technologies qui s'adressent aux producteurs les plus pauvres.*

(Alston, Norton et Pardey, 1995: 85).

Les études réalisées par les économistes soutiennent empiriquement la proposition selon laquelle la croissance du secteur agricole a des retombées sur l'économie toute entière. Hayami *et al.* (1978) a démontré qu'au niveau du village, la croissance rapide de la production de riz stimulait les prix et la demande de terres, de main-d'œuvre ainsi que de biens et de services non agricoles. On trouvera chez Hazell et Haggblade (1993); Delgado,

Hopkins et Kelly (1998); et Fan, Hazell et Thorat (1998) une validation au niveau sectoriel de l'argument selon lequel l'agriculture fait office de moteur pour la croissance économique tout entière.

Une fois les variétés modernes adoptées, les coûts de production baissent encore très sensiblement grâce à toute une série de technologies complémentaires, dont les machines agricoles, les pratiques de gestion des terres (souvent liées aux herbicides), l'apport d'engrais, la gestion intégrée des ravageurs et, plus récemment, les pratiques de gestion améliorée de l'eau. Bien que la Révolution verte ait souvent reposé sur

des technologies et des sciences pionnières qui intéressent la prochaine étape de notre révolution agricole, dont la principale est la biotechnologie.

Les appréhensions que suscitent la génétique moléculaire et le génie génétique sont en gros les suivantes: la science proprement dite, l'accès à celle-ci, sa maîtrise, les préoccupations pour l'environnement et la santé humaine et animale. Une étude approfondie de chacune de ces questions sera importante pour une analyse rigoureuse des risques et des avantages. Le traitement global de ces questions pour toutes les applications du génie génétique aboutira à des conclusions sans nuances, telles que la condamnation générale des OGM par les organisations non gouvernementales (ONG) au Sommet mondial de l'alimentation: cinq ans après, (Rome, 2002).

Les avantages qu'apportent des techniques de sélection moléculaire comme l'utilisation des marqueurs moléculaires et la sélection de précision de caractères spécifiques grâce à la technologie de l'ADN recombinant sont immenses. Les travaux réalisés en Inde ont révélé le potentiel de sélection de nouvelles variétés génétiquement modifiées possédant une tolérance à

la salinité et à la sécheresse, à certains des principaux organismes nuisibles et maladies, ainsi qu'une qualité nutritionnelle améliorée. Une nouvelle ère de sélection mendélienne intégrée et moléculaire a commencé. Une Révolution toujours verte associera ces techniques de pointe à la prudence écologique des communautés traditionnelles pour mettre au point des technologies fondées sur la gestion intégrée des ressources naturelles et adaptées aux conditions locales parce qu'elles sont élaborées et testées avec les familles d'agriculteurs.

C'est la seule façon de relever les défis, en particulier dans le contexte de la rareté croissante de l'eau et de la nécessité urgente de produire davantage dans les zones semi-arides et d'aridoculture. L'accélération du progrès de l'agriculture est la meilleure garantie contre la faim et la pauvreté, parce que dans la plupart des pays en développement, plus de 70 pour cent de la population vivent de l'agriculture. Nous refuser les moyens de la nouvelle génétique serait porter grandement atteinte à la fois aux familles d'agriculteurs disposant de peu de ressources et à la mise en place d'un système national durable d'alimentation et de nutrition

des trains de technologies (les nouvelles variétés végétales étant accompagnées de l'engrais, des pesticides et des herbicides aux doses recommandées, ainsi que des mesures de maîtrise de l'eau), nombre de leurs composantes ont été appliquées de manière fragmentée et progressive (Byerlee et Hesse de Polanco, 1986). L'ordre dans lequel elles étaient mises en application dépendait de la pénurie des facteurs et des économies financières possibles. Herdt (1987) a procédé à une étude détaillée de la manière dont les technologies de gestion de la riziculture ont été progressivement adoptées aux Philippines. Traxler et Byerlee (1992)

présentent des informations analogues sur la mise en place au coup par coup des technologies de gestion du blé à Sonora, dans le nord-ouest du Mexique.

Bien que les environnements favorables, à fort potentiel, aient été les grands gagnants de la Révolution verte du point de vue de la croissance de la productivité, les environnements moins favorables en ont eux aussi bénéficié, par effet d'entraînement, et du fait des migrations de main-d'œuvre vers les milieux plus productifs. Selon David et Otsuka (1994), le rééquilibrage des salaires entre ces deux types d'environnement a été l'un des principaux moyens de redistribution

des gains produits par les mutations technologiques. Renkow (1993) a tiré les mêmes conclusions pour le blé cultivé dans des zones du Pakistan à fort et faible rendement potentiel. Dans une évaluation mondiale de l'adoption des variétés modernes de blé (1993), Byerlee et Moya ont constaté qu'avec le temps, les régions plus défavorisées ont fini par rattraper les zones plus propices, notamment lorsque le matériel génétique initialement élaboré pour ces dernières avait été réadapté aux zones marginales. Pour ce qui est du blé, le taux de croissance du rendement potentiel dans les zones sujettes à la sécheresse était de l'ordre de 2,5 pour cent l'an dans les années 80 et 90 (Lantican et Pingali, 2003). Dans un premier temps, l'augmentation du rendement potentiel sur les terres marginales est venue des retombées technologiques, après que les variétés sélectionnées pour les environnements à fort potentiel ont été adaptées aux zones marginales. Dans les années 90 cependant, les améliorations du rendement potentiel doivent être attribuées aux efforts de sélection spécifiquement axés sur les terres marginales.

### **La Révolution génétique: un changement de paradigme pour la recherche-développement agricole**

Dans les années 60, 70 et 80, le secteur privé n'a guère investi dans la recherche sur la sélection végétale, en particulier dans les pays en développement, en raison de l'absence de mécanismes efficaces de protection exclusive des produits améliorés (encadré 12). La situation a évolué dans les années 90 avec l'apparition d'hybrides de plantes à pollinisation croisée telles que le maïs. La viabilité économique de ces hybrides a permis le démarrage d'une industrie des semences dans les pays en développement, sous l'impulsion de sociétés transnationales de pays développés, puis de sociétés nationales nouvelles (Morris, 1998). Malgré la croissance rapide de l'industrie semencière dans les pays en développement, son action reste encore assez limitée et nombre de marchés sont toujours laissés pour compte.

Le secteur privé a été davantage motivé à investir dans la recherche agricole lorsque les États-Unis et d'autres pays industrialisés

ont autorisé le brevetage des gènes artificiellement élaborés et des plantes génétiquement modifiées. Cette protection nationale a été encore renforcée par l'Accord de 1995 sur les aspects des droits de propriété intellectuelle qui touchent au commerce (ADPIC) de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) qui oblige ses membres à protéger par brevet les inventions biotechnologiques (produits et procédés) et à protéger les obtentions végétales par brevet ou par tout autre régime particulier de protection. Ces formes de protection exclusive ont fourni au secteur privé les incitations nécessaires pour engager des recherches dans les biotechnologies agricoles (encadré 12).

Les grandes sociétés agrochimiques transnationales ont été les premières à investir dans l'élaboration des cultures transgéniques, bien que les recherches fondamentales qui leur ont ouvert la voie aient été en grande partie réalisées par le secteur public et mises à la disposition des sociétés privées en vertu de licences exclusives. L'une des raisons qui a incité les sociétés agrochimiques à se lancer dans la recherche-développement sur les cultures transgéniques est qu'elles avaient prévu le déclin du marché des pesticides et étaient en quête de nouveaux produits (Conway, 2000).

Les sociétés chimiques se sont rapidement implantées dans le secteur de la sélection végétale en rachetant les sociétés semencières, d'abord dans les pays industrialisés, puis dans les pays en développement. Ces fusions entre les sociétés semencières nationales et les multinationales se justifiaient au plan économique, dans la mesure où elles sont spécialisées dans des aspects différents de l'élaboration de variétés de semences et de leur distribution (Pingali et Traxler, 2002). C'est en fait un continuum qui démarre, en amont, par l'accumulation de connaissances sur les gènes utiles (la génomique) et l'élaboration de plantes transgéniques et se poursuit, en aval, par des processus adaptatifs permettant le rétrocroisement des transgènes en lignées commerciales et la distribution des semences aux agriculteurs. Les résultats des activités conduites en amont sont applicables dans le monde entier, pour toute une gamme de cultures et d'environnements agroécologiques. Les variétés et les cultures

## ENCADRÉ 12

**Biens collectifs et droits de propriété intellectuelle**

Les biens collectifs créent des avantages pour la société en sus des avantages privés qui peuvent être tirés par la personne qui les a créés. Les avantages sont parfois appelés retombées. Les biens collectifs se caractérisent par la non-rivalité et la non-exclusivité. La non-rivalité signifie que le bien est également disponible pour tous, c'est-à-dire que sa consommation par une personne ne réduit pas la quantité qui est disponible pour les autres. La non-exclusivité signifie que les personnes qui ne paient pas le produit ne peuvent pas être empêchées de l'utiliser. Ces caractéristiques signifient que les obtenteurs privés ne peuvent pas capter l'ensemble des avantages sociaux de leur création à moins qu'ils ne puissent trouver un moyen d'empêcher l'utilisation non autorisée. Étant donné que les sociétés privées ne peuvent profiter pleinement de la recherche qui produit des biens collectifs, elles n'investiront pas dans un niveau de recherche optimal au point de vue social (Ruttan, 2001).

Une bonne partie des résultats de la recherche agricole, y compris dans le domaine des biotechnologies, ont l'une des caractéristiques d'un bien collectif ou les deux. Par exemple, tout chercheur peut utiliser des connaissances au sujet de la structure du génome du riz sans réduire la quantité de connaissances à la disposition d'autres chercheurs, et une fois que ces connaissances paraissent dans une publication scientifique ou sur le Web, il est difficile d'empêcher d'autres

personnes de les utiliser. Par ailleurs, une variété de plante transgénique peut avoir des caractéristiques de biens collectifs dans une certaine mesure, (par exemple, il est difficile d'exclure complètement les utilisateurs non autorisés), mais il ne s'agit pas d'un bien collectif pur parce que les semences peuvent être utilisées et que l'utilisation non autorisée peut être empêchée, du moins en partie.

Il y a deux façons – biologique et juridique – d'empêcher l'utilisation non autorisée de variétés de plantes. Les semences hybrides peuvent être mises de côté, reproduites et ressemées, mais seulement au prix d'une perte significative de rendement et de qualité, de sorte que l'hybridation assure une protection biologique de l'obtention. Les techniques génétiques restrictives constituent une autre forme de protection de la propriété intellectuelle biologique qui a été proposée pour les plantes transgéniques. Ces technologies produiraient des semences stériles ou des semences qui nécessitent l'application d'un produit chimique spécial pour activer le caractère novateur. L'opposition de l'opinion publique à l'approche des semences stériles a conduit la compagnie privée Monsanto à abandonner sa mise au point. La protection juridique sous forme de brevets, marques déposées et contrats peut également protéger la propriété intellectuelle, mais ces méthodes fournissent généralement une protection incomplète.

génétiquement modifiées en revanche s'appliquent à des niches agroécologiques spécifiques. En d'autres termes, les retombées positives et les économies d'échelle décroissent à mesure qu'on s'approche de l'extrémité du continuum caractérisée par les processus d'adaptation. De la même manière, le coût des recherches et leur complexité chutent à mesure que l'on s'oriente vers les activités d'aval. Une division marquée des responsabilités s'est donc instaurée dans le processus d'élaboration et de diffusion des

produits biotechnologiques, les sociétés transnationales assumant la recherche biotechnologique en amont tandis que les sociétés locales fournissent les variétés de plantes présentant les caractéristiques agronomiques commercialement recherchées. (Pingali et Traxler, 2002).

Pour les systèmes publics de recherche, il n'est guère évident d'exploiter les retombées des travaux menés par les multinationales. Les programmes publics de recherche sont généralement conçus

TABLEAU 3  
Estimation des dépenses pour les recherches en biotechnologie des plantes

	(En millions de \$EU/an)	(Pourcentage)
	Recherche et développement biotechnologiques	Part des biotechnologies dans le secteur de la recherche et du développement
<b>PAYS INDUSTRIALISÉS</b>	<b>1 900-2 500</b>	
Secteur privé <sup>1</sup>	1 000-1 500	40
Secteur public	900-1 000	16
<b>PAYS EN DÉVELOPPEMENT</b>	<b>165-250</b>	
Public (ressources propres)	100-150	5-10
Public (aide étrangère)	40-50	...
Centres du GCRAI	25-50	8
Secteur privé	...	...
<b>TOTAL MONDIAL</b>	<b>2 065-2 730</b>	

<sup>1</sup> Englobe un montant inconnu affecté à la recherche et au développement pour les pays en développement.

Source: Byerlee et Fischer, 2001.

en fonction des frontières politiques nationales ou régionales, et les transferts directs de technologies d'État à État sont restés limités (Pingali et Traxler, 2002). La stricte adhésion aux domaines politiques freine considérablement la transposition des innovations technologiques à des zones agroclimatiques analogues. Le système d'échange de matériel génétique du GCRAI a permis de contourner la difficulté pour plusieurs plantes cultivées importantes, mais il n'est pas sûr que ce système puisse également s'appliquer aux produits biotechnologiques et aux cultures transgéniques, étant donné les droits de propriété exclusive rattachés à ces technologies.

#### Les investissements dans la recherche biotechnologique

Pour se faire une idée de l'ampleur des investissements actuels du secteur privé dans la recherche agricole, il suffit de comparer son budget annuel de recherche à celui de la recherche publique axée sur l'agriculture des pays en développement (Pray et Naseem, 2003a). Les dépenses cumulées de recherche-développement agricole des 10 plus grandes sociétés transnationales de biosciences s'élèvent à près de 3 milliards de dollars EU. Par comparaison, le GCRAI, qui est

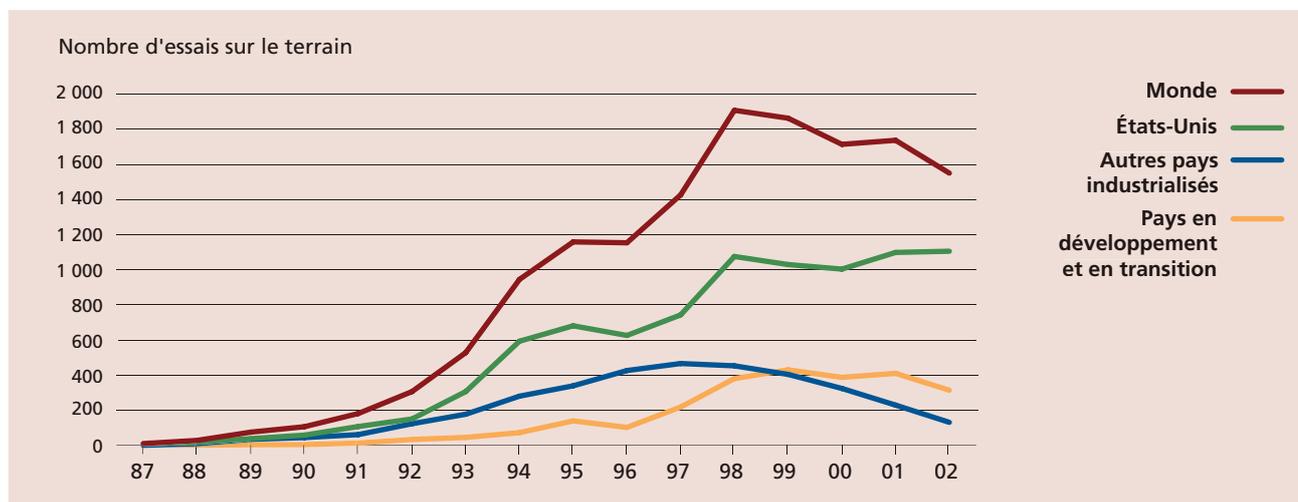
le plus gros fournisseur public international de technologies agricoles, a un budget annuel de recherche-développement en sélection végétale de moins de 300 millions de dollars EU. Les plus grands programmes publics de recherche agricole engagés par des pays en développement, à savoir le Brésil, la Chine et l'Inde, ont tous un budget annuel de moins de 500 millions de dollars chacun (Byerlee et Fischer, 2002).

Les chiffres de la recherche sur les biotechnologies agricoles mettent en évidence une profonde dichotomie entre pays développés et pays en développement (tableau 3). Les pays développés dépensent quatre fois plus que les pays en développement dans la recherche publique sur les biotechnologies et ce, même si l'on cumule toutes les sources de financements publics – État, bailleurs et centres du GCRAI – pour les pays en développement. Rares sont les pays en développement ou les institutions internationales du secteur public qui ont les ressources nécessaires pour créer une source indépendante d'innovations biotechnologiques (Byerlee et Fischer, 2001).

On ne dispose pas de données complètes sur les recherches biotechnologiques conduites par le secteur privé dans les pays en développement, bien qu'elles semblent pour la plupart tourner autour des essais

FIGURE 1

Essais de cultures transgéniques sur le terrain, par groupe de pays



Source: Pray, Courtmanche et Govindasamy, 2002.

réalisés par les sociétés transnationales sur leurs variétés transgéniques. Les instituts de recherche locaux sont à l'origine de divers travaux (c'est par exemple le cas au Brésil et en Afrique du Sud où des instituts de recherche privés sur la canne à sucre ont lancé des programmes de recherche biotechnologique assez importants), tandis qu'en Inde, plusieurs sociétés semencières nationales (particulièrement la Maharashtra Hybrid Seed Company [Mahyco]) disposent de programmes de recherche en biotechnologie. On ne connaît pas le montant total des investissements réalisés par ces sociétés privées, mais ils sont sans aucun doute moins importants que ceux consentis par le secteur public des pays en développement en faveur de la recherche biotechnologique (Pray et Naseem, 2003a).

### Évaluation de l'ampleur des recherches sur les cultures transgéniques en fonction des essais de terrain

Bien que le volume total des dépenses de recherche biotechnologique soit à peu près également réparti entre les secteurs public et privé, la production des nouvelles technologies est presque totalement entre les mains du secteur privé<sup>1</sup>. Celui-ci a élaboré

toutes les plantes cultivées génétiquement modifiées qui ont été commercialisées à ce jour dans le monde, à l'exception de celles disponibles en Chine (voir le Chapitre 4). La prédominance du secteur privé dans ce domaine prêche à croire que les cultures et les problèmes de production particulièrement importants pour les pauvres risquent d'être dédaignés dans la mesure où le marché pour ces semences est très étroit.

Depuis 1987 où les premiers essais ont été approuvés, plus de 11 000 essais au champ ont été réalisés pour 81 cultures transgéniques différentes (figure 1 et tableau 4), mais seulement 15 pour cent d'entre eux ont eu lieu dans des pays en développement ou des pays en transition<sup>2</sup>. Ces chiffres sont révélateurs du peu d'intérêt commercial que semblent présenter ces marchés et des difficultés qu'ont eues les gouvernements concernés à réglementer la biosécurité. Les essais conduits dans les pays développés et les pays en transition se sont intensifiés durant les dernières années et, en 2000, au moins 58 pays signalaient avoir réalisé des essais au champ de cultures transgéniques (Pray, Courtmanche et Govindasamy, 2002). Certains pays ont interrompu les essais de terrain pendant

<sup>1</sup> Il n'existe pas de données complètes sur les essais au champ de toutes les biotechnologies agricoles. Cette section ne porte que sur les essais de cultures transgéniques.

<sup>2</sup> Ces données proviennent d'une source qui comptabilise chaque parcelle d'essai comme un essai distinct; la même plante génétiquement modifiée peut donc donner lieu à de multiples essais dans un pays donné.

TABLEAU 4  
Essais sur le terrain par culture et par région

	Maïs	Colza	Pommes de terre	Soja	Coton	Tomate	Betterave	Tabac	Blé	Riz	Autres	Totaux
<b>NOMBRE TOTAL D'ESSAIS</b>	<b>3 881</b>	<b>1 242</b>	<b>1 088</b>	<b>782</b>	<b>723</b>	<b>654</b>	<b>394</b>	<b>308</b>	<b>232</b>	<b>189</b>	<b>1 610</b>	<b>11 105</b>
États-Unis et Canada	2 749	826	770	552	407	494	118	194	190	102	1 087	7 489
Europe/ Nouvelle-Zélande/ Australie/Japon	452	366	227	20	72	89	237	61	23	36	316	1 901
Pays en transition	61	17	27	7	2	2	33	6	1	0	9	1 550
Pays en développement	619	33	64	203	242	69	6	47	18	51	198	1 550
<b>POURCENTAGE DE L'ENSEMBLE DES CULTURES</b>	<b>35</b>	<b>11</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>14</b>	<b>100</b>
États-Unis et Canada	37	11	10	7	5	7	2	3	3	1	15	100
Europe/ Nouvelle-Zélande/ Australie/Japon	24	19	12	1	4	5	13	3	1	2	17	100
Pays en transition	37	10	16	4	1	1	20	4	1	0	6	100
Pays en développement	40	2	4	13	16	5	0	3	1	3	13	100

Source: Pray, Courtmanche et Govindasamy, 2002.

FIGURE 2  
Caractères des cultures transgéniques testés dans les pays industrialisés, 1987-2000 (pour cent)

Tolérance aux herbicides 29

Autres 6

Résistance aux champignons/bactéries 5

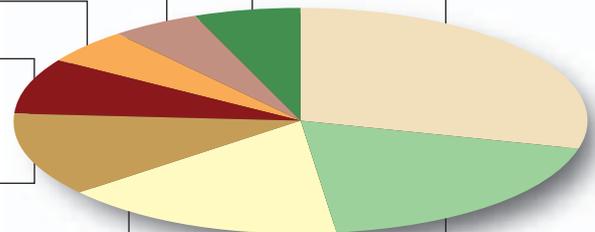
Propriétés agronomiques 5

Résistance aux virus 8

Gènes ajoutés 12

Qualité du produit 16

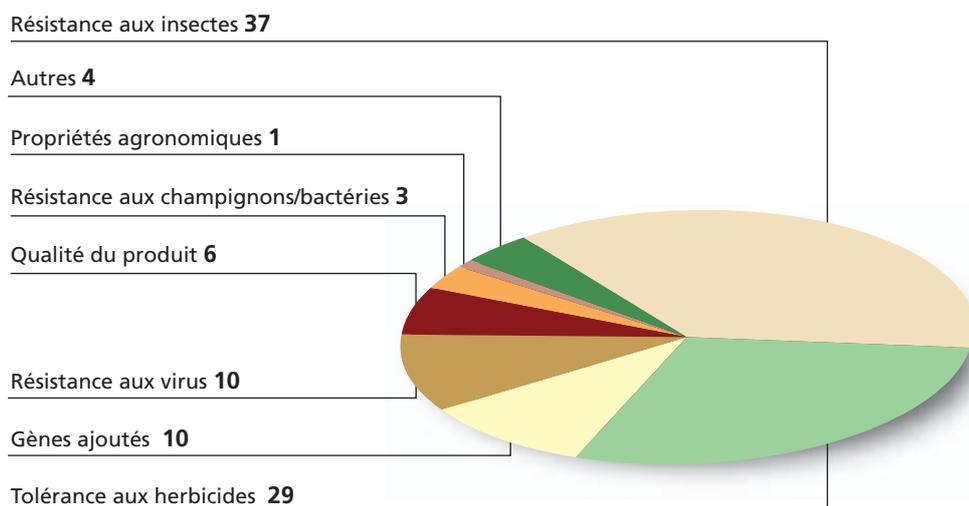
Résistance aux insectes 19



Source: Pray, Courtmanche et Govindasamy, 2002.

FIGURE 3

Caractères des cultures transgéniques testés dans les pays moins avancés, 1987-2000 (pour cent)



Source: Pray, Courtmanche et Govindasamy, 2002.

quelques années afin de réviser leur régime de prévention des risques biotechnologiques.

Les données concernant les essais de terrain justifient les craintes selon lesquelles les cultures et les caractéristiques importantes pour les pays en développement seront délaissées (tableau 4, figures 2 et 3). Les cultures alimentaires de base ont fait l'objet de très rares travaux de recherche biotechnologique appliquée, même si l'on constate sur les dernières années une augmentation des essais au champ de variétés de blé et de riz, les plus importantes cultures alimentaires dans les pays en développement; par ailleurs, une variété de manioc transgénique a été testée pour la première fois en 2000. Dans un ou plusieurs pays, d'autres cultures alimentaires de base comme les bananes, les patates douces, les lentilles et les lupins ont toutes été approuvées pour des essais de terrain.

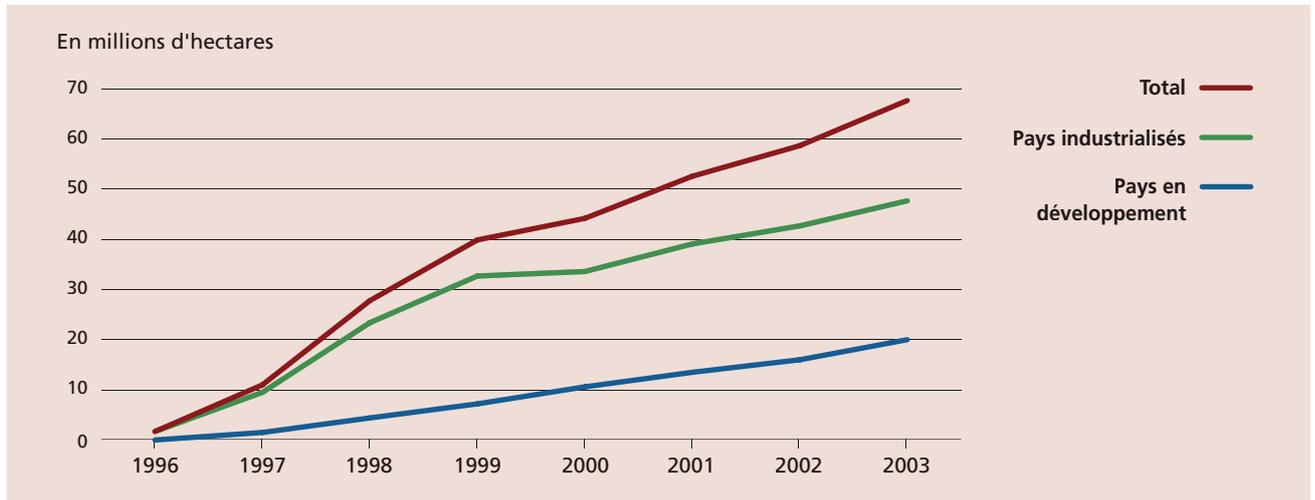
Près des deux tiers des essais de terrain réalisés dans les pays industrialisés et les trois quarts de ceux effectués dans les pays en développement sont axés sur deux caractéristiques: la tolérance aux herbicides et la résistance aux insectes, ou

sur l'association de ces deux caractéristiques (figures 2 et 3). Si la résistance aux ravageurs est importante pour les pays en développement, c'est moins le cas de la résistance aux herbicides dans les zones où la main-d'œuvre agricole est abondante. En revanche, les caractéristiques agronomiques qui intéresseraient vraiment les pays en développement et les zones de production marginale, comme le rendement potentiel et la tolérance aux stress abiotiques (tels que la sécheresse et la salinité) n'ont donné lieu qu'à de très rares essais de terrain dans les pays industrialisés, et encore moins dans les pays en développement.

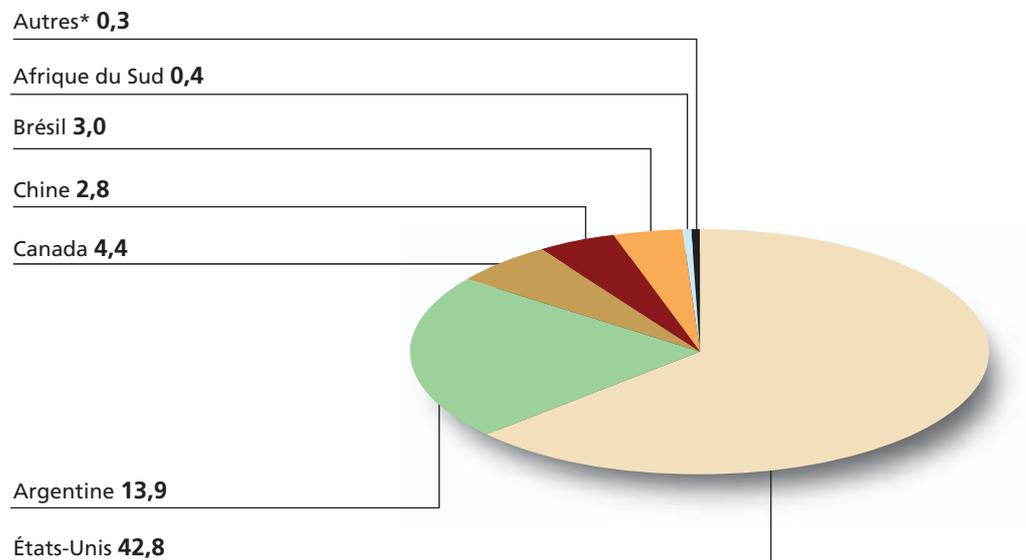
### Commercialisation des cultures transgéniques

En 2003, 18 pays cultivaient des cultures transgéniques commercialement sur une superficie totale de 67,7 millions d'hectares, contre 2,8 millions d'hectares en 1996 (figure 4). Pour impressionnant que soit ce taux global de diffusion des technologies, il est néanmoins très inégal. En effet, six pays, quatre plantes cultivées et deux caractéristiques représentent à eux seuls 99 pour cent de la production mondiale

**FIGURE 4**  
Superficie mondiale de cultures transgéniques



**FIGURE 5**  
Superficie mondiale de cultures transgéniques en 2003, par pays  
(en millions d'hectares)



\* Allemagne, Australie, Bulgarie, Colombie, Espagne, Honduras, Inde, Indonésie, Mexique, Philippines, Roumanie et Uruguay.

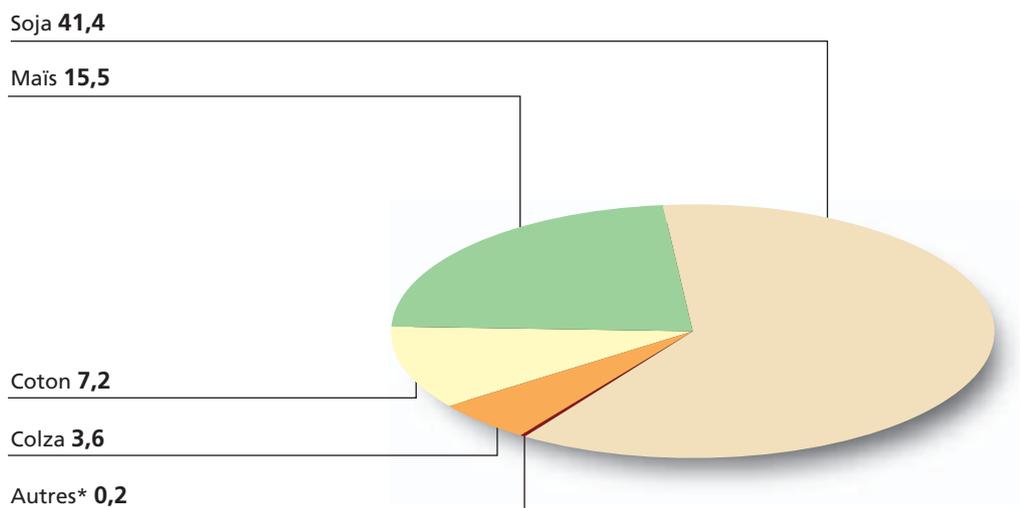
Source: James, 2003.

de cultures transgéniques (figures 5 à 7) (James, 2003).

Les États-Unis cultivent les deux tiers des cultures transgéniques plantées dans le monde. Bien que les superficies qui leur

sont consacrées ne cessent d'augmenter aux États-Unis, leur part de la surface totale vouée à ces cultures dans le monde a chuté rapidement dès lors que l'Afrique du Sud, l'Argentine, le Brésil, le Canada et la Chine

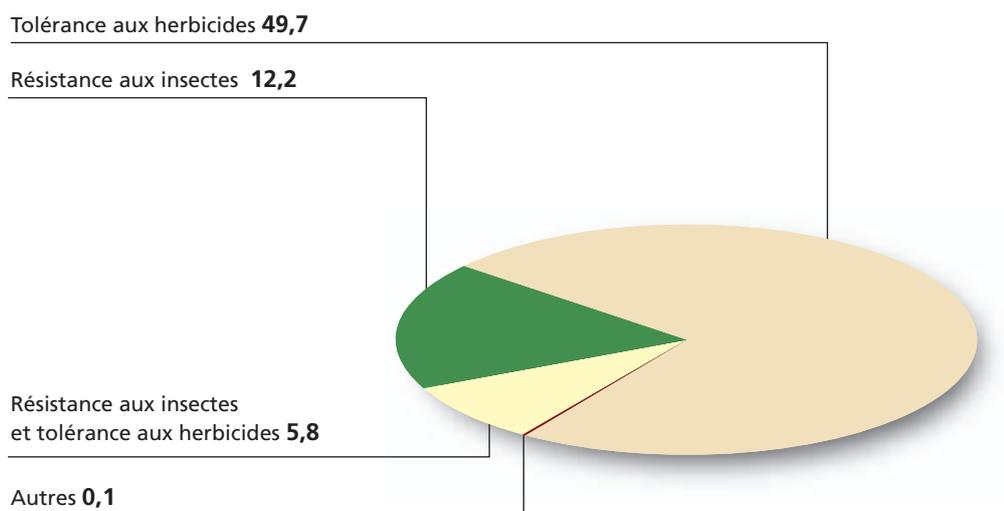
**FIGURE 6**  
**Superficie mondiale de cultures transgéniques en 2003, par culture**  
 (en millions d'hectares)



\*Y compris courge et papaye.

Source: James, 2003.

**FIGURE 7**  
**Superficie mondiale de cultures transgéniques en 2003, par caractère**  
 (en millions d'hectares)



Source: James, 2003.

ont développé leurs propres plantations. Les 12 autres pays qui en cultivaient en 2002 représentent à eux tous moins de 1 pour cent du total mondial.

Les cultures transgéniques les plus cultivées sont le soja, le maïs, le coton et le colza. La tolérance aux herbicides et la résistance aux ravageurs sont les caractéristiques les plus fréquentes. Le soja tolérant aux herbicides représente désormais 55 pour cent de la production mondiale, tandis que le colza doté de la même caractéristique compte pour 16 pour cent de la superficie totale ensemencée en colza. Les variétés de coton et de maïs transgéniques qui sont aujourd'hui cultivées commercialement sont résistantes aux ravageurs ou tolérantes aux herbicides, parfois les deux, et elles représentent actuellement 21 pour cent et 11 pour cent respectivement des superficies totales plantées en coton et maïs (James, 2003). D'autres plantes transgéniques sont cultivées commercialement à très petite échelle, notamment des variétés de papaye et de courge résistantes aux virus. Aucune variété transgénique de blé ou de riz, les principales céréales alimentaires, n'est cultivée commercialement où que ce soit dans le monde.

## Conclusions

Le déplacement de la recherche agricole du secteur public aux sociétés privées transnationales a eu une forte incidence sur le type de produits désormais élaborés et commercialisés. Les recherches du secteur privé se portent naturellement sur les cultures et les caractéristiques présentant un intérêt commercial pour les agriculteurs des pays à revenu élevé où le marché des intrants agricoles est robuste et rentable. Les biens publics, notamment les plantes alimentaires et les caractéristiques importantes pour les agriculteurs pratiquant l'agriculture vivrière dans des conditions marginales, sont de peu d'intérêt pour les grandes sociétés transnationales. Les agriculteurs des pays en développement pourront-ils tirer profit des retombées économiques des cultures transgéniques élaborées et commercialisées par le secteur privé? Y a-t-il des axes de recherche qui pourraient être plus directement utiles aux pauvres?

La Révolution verte a montré que les technologies agricoles pouvaient être transposées dans le monde entier, en particulier dans les pays dotés de bonnes capacités nationales de recherche agricole, et donc à même d'adapter les cultivars importés à haut rendement à leurs conditions de production locales. Quelles sont les capacités de recherche dont les pays en développement ont besoin pour tirer profit de la Révolution génétique? Face à la contraction des ressources allouées à la recherche publique, comment peut-on mobiliser davantage de moyens en vue de la recherche axée sur les besoins des pauvres? Comment structurer les partenariats public-privé pour exploiter à plein les points forts de chaque secteur?

À la différence des variétés à haut rendement dues à la Révolution verte, les produits de la Révolution génétique suscitent l'inquiétude des populations et se heurtent à de sérieux obstacles réglementaires et commerciaux. Quelle incidence ces questions auront-elles sur le transfert international des nouvelles technologies? Quelles mesures politiques faut-il mettre en place pour faciliter le mouvement international des technologies transgéniques dans de bonnes conditions de sécurité?

Les variétés améliorées à l'origine de la Révolution verte, considérées comme biens collectifs, ont été distribuées gratuitement. À l'inverse, nombre des innovations de la Révolution génétique font l'objet de brevets ou de licences d'exclusivité. Cette protection de la propriété intellectuelle a grandement stimulé la recherche privée, mais elle risque d'entraver l'accès aux outils de recherche pour les autres chercheurs. Quels mécanismes institutionnels faut-il mettre en place pour promouvoir la mise en commun de la propriété intellectuelle des résultats de recherche sur les biens publics?

Ces questions sont abordées dans la section suivante où l'on passe en revue les éléments de preuves existants sur les aspects économiques (Chapitre 4) et scientifiques (Chapitre 5) des cultures transgéniques et les inquiétudes que suscite leur emploi (Chapitre 6). Dans la dernière section, on examine les moyens qui permettront aux biotechnologies de servir les intérêts des pauvres.