
**PARTIE V : TENDANCES ACTUELLES
ET PERSPECTIVES DE L'AGRICULTURE**

Chapitre 21

**AGRICULTURES
ET ENVIRONNEMENTS***

Jean Semal

Faculté des sciences agronomiques de Gembloux, Belgique

* Chapitre rédigé sur base de divers éditoriaux publiés par l'auteur dans les *Cahiers Agricultures* (1991 et 1992).

Sommaire

1. Introduction

2. Agriculture et environnement des pays en développement

- 2.1. Conservation des ressources génétiques
- 2.2. La protection intégrée appropriée

3. Agriculture et environnement des pays industrialisés

- 3.1. Les contaminations par les intrants
- 3.2. Les nitrates et autres minéraux

4. Une philosophie “binomiale” agricultures-environnements

- 4.1. Situation actuelle
- 4.2. Perspectives

Bibliographie

AGRICULTURES ET ENVIRONNEMENTS

1. INTRODUCTION

Nous traversons en cette dernière décennie du xx^e siècle une époque transitoire, riche en bouleversements, où agricultures et environnements vont devoir affirmer leurs liens d'interdépendance en prenant en compte l'extrême complexité et la grande diversité des paramètres qui les régissent.

Le rapport Brundtland, présenté à la Conférence sur l'environnement tenue à Rio en 1992, distingue trois types principaux d'agriculture : **l'agriculture industrielle**, faite essentiellement de monocultures, **l'agriculture de la révolution verte** dans les plaines irriguées, surtout en Asie, et enfin **les agricultures complexes** de la plupart des régions du tiers-monde.

Dans les deux premiers cas de figure, l'accroissement de la production a reposé essentiellement sur la spécialisation, la standardisation, la simplification des procédés, le contrôle de l'eau, la restructuration foncière et l'accroissement de la dimension des exploitations, avec des séquelles sociales importantes. Ensemble, ces lignes directrices ont permis de contrôler l'environnement de manière à ce qu'il rencontre les exigences des variétés (plantes) et des races (animaux) les plus performantes, grâce aux apports d'engrais et d'eau, à la mécanisation des façons culturales et à la modernisation des techniques d'élevage.

Pour la troisième catégorie, où se situent les agricultures pluviales aléatoires, l'environnement est à ce point variable et imprédictible que ce sont les géotypes diversifiés ou même en mélange qui doivent se plier aux réalités du sol, du climat et d'une microéconomie incapable de supporter des charges importantes d'intrants ou d'engins mécaniques. L'existence d'un large secteur d'agricultures de subsistance accentue encore la nécessité d'une suffisante diversité génétique des plantes cultivées et des animaux d'élevage, car les variétés et races intrinsèquement les plus productives sont généralement trop exigeantes et manquent de rusticité. La diversité de ces situations complexes requiert, dès lors, que les producteurs adaptent les techniques à leurs circonstances locales, plutôt que d'appliquer des recettes toutes faites élaborées dans d'autres environnements socio-écologiques.

Le développement durable, au sens du rapport Brundtland, comporte :

- l'exploitation des ressources renouvelables dans les limites permettant leur régénération ;
- l'exploitation des ressources non renouvelables d'une manière rationnelle et leur remplacement dans la mesure du possible par des ressources renouvelables ;
- la sauvegarde de la diversité des communautés biologiques, culturelles et sociales.

Dans ce contexte, à côté du rendement et du revenu ponctuels, la pérennité du potentiel de production devient la composante essentielle d'une agriculture intégrée, capable de transmettre ses potentialités aux générations futures via la gestion responsable de l'environnement.

2. AGRICULTURE ET ENVIRONNEMENT DES PAYS EN DÉVELOPPEMENT

La structuration de l'espace est très liée aux comportements humains, aux flux de matière, d'énergie, de finances et à leur diversité spatiale et temporelle. Les paysages sont à cet égard des révélateurs de leurs composantes écologiques, sociales et culturelles, et la banalisation des faunes et des flores, tant naturelles que domestiquées, résulte d'une simplification, parfois outrancière, des biotopes et des pratiques agricoles. Les méthodes d'aménagement devront prendre en compte ces situations et organiser leur évolution future en vue de freiner les processus de dégradation et d'optimiser l'utilisation du milieu physique et biologique.

L'objectif majeur sera de préciser les besoins actuels sans mettre en péril ceux des générations à venir. Au delà de l'auto-suffisance alimentaire et de l'ouverture aux flux commerciaux, il faudra adapter les options retenues aux échelles de temps, avec la participation active des agents de la production, essentiellement les sociétés paysannes. Un objectif qui paraît pouvoir être atteint consisterait à doubler la production agricole des pays en développement en améliorant les bases technologiques des processus ainsi que la productivité du travail.

2.1. Conservation des ressources génétiques

La régression des zones d'environnement naturel diversifié, le développement des monocultures de plantes sélectionnées, la régression des forêts tropicales, l'exploitation excessive de la faune en voie de raréfaction et l'extension des déserts menacent les ressources génétiques végétales et animales.

Pour prévenir cette "érosion" génétique et maintenir pour le futur la diversité des gènes existants, deux stratégies majeures sont mises sur pied : d'une part la conservation des germplasmés *ex situ*, dans des collections diverses de semences ou d'organes en culture ou en cryoconservation à basse température, et d'autre part des réserves *in situ* dans des zones géographiques de grande diversité génétique.

2.2. La protection intégrée appropriée

Dans beaucoup de pays en développement, le nécessaire accroissement de la production passe par la protection des cultures, en intensifiant l'usage des pesticides (ce qui est souvent limité pour des raisons économiques), ou en maximisant l'emploi des systèmes naturels de régulation des populations d'agents pathogènes et de ravageurs. Parmi les problèmes liés à la protection intégrée, on relèvera la complexité de sa mise en œuvre et la nécessité de l'approprier aux conditions locales, ce qui requiert un rôle accru du paysan.

Il est donc crucial à cet égard de connaître et de comprendre les conditions de l'environnement socio-économique et culturel des systèmes de production, en développant une technologie de terrain basée sur l'analyse systémique et la participation active des opérateurs agricoles.

3. AGRICULTURE ET ENVIRONNEMENT DES PAYS INDUSTRIALISÉS

3.1. Les contaminations par les intrants

Les pays industrialisés sont soumis de longue date à des pressions réduisant les espaces naturels par l'urbanisation, l'industrialisation, les voies de communication, ainsi que par la récession de l'agriculture qui encourage les boisements et la fermeture de l'espace rural.

La gestion de ces différentes composantes requiert la prise en compte des paysages, des patrimoines naturels et culturels, de la gestion de l'eau, des activités de loisir et de tourisme, dans la mise au point des schémas directeurs planifiant la gestion de l'espace, laquelle se fonde notamment sur la **géomatique** (cartographie assistée par ordinateur) utilisant des logiciels SIG (système d'information géographique). On prendra en compte les caractères physiques et chimiques des sols, la dynamique de leur fertilité et de leur sensibilité à l'érosion, les relations entre l'eau et l'espace, les inventaires des ressources forestières ou des pâturages, la désertification, etc.

L'interaction agriculture et environnement s'exprime notamment par des pertes en intrants (engrais, pesticides, hormones) conduisant à la contamination de l'atmosphère, de l'eau, du sol et parfois même des produits. L'intensification de l'agriculture a également abouti, au cours des dernières décennies, à un appauvrissement des paysages résultant notamment des remembrements, de la rectification des cours d'eau, de la suppression des haies et clôtures, et de la concentration des élevages hors sol.

Pour réduire au maximum les pertes d'intrants et donc diminuer d'autant les coûts grevant la production, il convient de travailler par bilans afin de dégager les conditions d'une production maximale utilisant le minimum d'intrants susceptibles de nuire à l'environnement et à la qualité des produits. La politique de rendement maximal (favorisée par des prix garantis) fait place progressivement à une stratégie de bénéfice maximal, mieux adaptée au contexte des quotas de production, du gel des terres et de la concurrence des marchés.

3.2. Les nitrates et autres minéraux

Des sels minéraux en excès (spécialement les nitrates et les phosphates) peuvent se retrouver dans le sol ou dans les eaux. Il faut distinguer à cet égard les eaux de surface et les eaux souterraines. Pour les eaux de surface (rivières, fleuves, lacs, zones côtières, mers), l'enrichissement en phosphate et en nitrates aboutit souvent à une eutrophisation, avec un accroissement parfois considérable du plancton et des algues qui a pour résultat une baisse de la teneur en oxygène. Par ailleurs, les eaux de surface peuvent être utilisées comme source d'eau potable ; dans ces conditions, leur contamination par des sels minéraux en excès peut compliquer leur utilisation pour la consommation humaine.

Les eaux souterraines peuvent également être contaminées par les percolations provenant de la surface avec des pollutions par les nitrates (normes européennes correspondant à un maximum de 50 mg/litre avec un niveau guide de 25 mg/litre) et les herbicides.

4. UNE PHILOSOPHIE "BINOMIALE" AGRICULTURES-ENVIRONNEMENTS

4.1. Situation actuelle

Le caractère pluriel des termes du "binôme" agricultures-environnements n'est pas sans signification : il souligne la nécessité d'une prise en compte de la grande diversité des situations concrètes dans l'élaboration de toute politique en la matière. S'agit-il de marier l'eau et le feu ou au contraire de favoriser la coexistence active de deux des composantes essentielles des biosociétés ?

Depuis un quart de siècle, nous sommes entrés sans le savoir dans l'ère de la **biotique**, un concept englobant tant les interactions des êtres vivants entre eux, que celles des objets biologiques avec leur environnement physique et chimique, concept qui aujourd'hui encore se cherche un nom et un statut officiels. A cet égard, deux principes devraient guider tant les praticiens que les décideurs : d'une part, la relation *génotype-phénotype* chez les plantes cultivées et les animaux d'élevage et d'autre part le *rapport entre la biosphère et l'anthroposphère*.

Le rôle de la génétique dans les productions animales et végétales est certes fondamental mais il n'est pas exclusif. Les apports de l'environnement dans les processus de développement et de reproduction des organismes, ainsi que dans la valorisation des produits sont tout aussi essentiels. Car ce qui importe, c'est l'expression du génome en fonction des contraintes du milieu dans lequel il est placé. Toute amélioration de nature génétique devra donc être évaluée en la replaçant dans un cadre écologique et socio-économique déterminé.

Il faut tout d'abord considérer l'état sanitaire des organismes faisant l'objet d'une culture ou d'un élevage. Des semences de plantes à multiplication végétative atteintes de viroses ont des rendements très réduits par rapport aux plantes saines de la même variété. Dès lors, guérir les clones de leurs virus permet souvent de doubler le rendement tout en accroissant la qualité commercialisable de la récolte. Et ceci, à coût réduit, pour autant qu'un système adéquat de multiplication des plants sains soit ensuite utilisé (voir chapitre 22). Le problème étant réglé sur le plan sanitaire, l'organisme sera ensuite confronté avec un environnement plus ou moins bien approprié à ses exigences physiologiques, variables par ailleurs selon les phases du développement et de la reproduction.

- Dans un premier cas de figure (productions intensives en régions fertiles et/ou industrialisées), on exploitera le *génotype potentiellement le plus performant* en lui fournissant un environnement favorable en ce qui concerne le climat (eau, température), la nutrition (engrais appliqués de façon contrôlée, additifs alimentaires équilibrés), les pratiques culturales (traitements phytosanitaires, cultures sous abris, mécanisation, récolte) et les filières de commercialisation. Les travaux d'amélioration génétique, tant chez les plantes que chez les animaux, ainsi que les résultats des biotechnologies de pointe, trouveront dans ce cas un terrain optimal pour leur valorisation.

- Le second cas de figure correspond aux agricultures pratiquées dans des environnements défavorables (sols pauvres ou salins, eaux pluviales irrégulières, relief accentué, productions alimentaires de subsistance, insuffisance de l'infrastructure de transport, de stockage et de commercialisation). Il est impossible dans ces conditions d'investir suffisamment pour adapter les facteurs de production aux exigences des génotypes. L'opérateur agricole y est contraint de subir son environnement et

s'y adapter en se fondant sur la *diversité génétique*, sur la *rusticité*, la *résistance* durable aux stress, aux maladies, aux ravageurs et aux autres facteurs altérogènes. La possibilité de récolter les produits sur de longues périodes et la capacité de les conserver avec des moyens simples et peu coûteux sera également essentielle.

Il faudra prendre en compte également les éventuels effets négatifs de l'introduction de nouveaux génotypes dans un milieu déterminé. Dans les régions pratiquant l'agriculture de subsistance, les paysans utilisent des génotypes locaux rustiques et résistants à des maladies qui se développent par ailleurs avec violence sur des variétés importées, potentiellement plus productives. Dès lors, faute de prendre suffisamment en compte la diversité des réalités locales, on risque d'amères désillusions (voir des exemples au chapitre 20).

Au delà des systèmes agraires, il y a lieu d'introduire l'ensemble des activités humaines comme partenaire dans la relation agriculture-environnement et d'intégrer biosphère et anthroposphère. On sait que l'érosion, les inondations, la désertification, la salinisation sont généralement le résultat de pressions anthropiques excessives sur l'environnement ou d'erreurs dans la gestion de l'eau, des agrosystèmes ou de la biodiversité.

Cette biodiversité est d'importance à maints égards. Il y a bien sûr la vaste multitude des espèces végétales et animales vivant à l'état sauvage, qui sont victimes de la régression des zones non cultivées. Il y a ensuite le grand nombre de variétés de plantes et de races animales locales utilisées dans les agricultures traditionnelles. Améliorée depuis des centaines d'années par les paysans, cette diversité génétique est de grande valeur, car elle est en général bien adaptée aux différentes situations écologiques et sociologiques.

Parmi les gènes utiles identifiés dans des espèces sauvages ou des écotypes locaux, figurent notamment des facteurs de résistance aux maladies. C'est ainsi qu'un virus du riz a failli détruire cette culture en Asie dans les années 70. Après 4 ans de recherches portant sur 17 000 échantillons de génotypes de riz cultivés ou sauvages, on a découvert qu'une population de l'espèce *Oriza nivara*, croissant à l'état sauvage dans l'Uttar Pradesh, en Inde, était résistante au virus. Aujourd'hui, des hybrides résistants, obtenus par croisement avec des individus de la population sauvage, sont cultivés sur d'immenses surfaces en Asie.

Les savoirs traditionnels sont également intéressants pour lutter contre les maladies ou ravageurs. C'est le cas de *Phytolacca dodecandra*, une plante dont les extraits sont utilisés en Afrique comme lessive, et qui possède des propriétés hélicides très spécifiques tout en étant biodégradable. L'utilisation des baies de cette espèce dans la lutte contre les escargots pourrait aider à prévenir la schistosomiase. On envisage également son utilisation comme hélicide dans les grands lacs d'Amérique du Nord où l'introduction et la multiplication massive des mollusques perturbent différentes utilisations des eaux lacustres. Une autre espèce, le margousier (*Azadirachta indica*) est largement utilisée en Inde comme insecticide dans la protection des cultures et des greniers. Les graines de margousier ont des effets très divers, ce qui devrait permettre de diversifier l'emploi de leurs extraits qui commencent à être préparés industriellement en Inde.

4.2. Perspectives

Les grands équilibres géopolitiques mondiaux, les percées scientifiques et technologiques, et les crises sociétales qui affectent la planète entière servent de soubassement

à un foisonnement de faits, d'idées et de propositions. Les agricultures se présentent à cet égard en tant que révélateurs des rapports ambigus entre la société et la nature.

Quelle est, quelle sera la place de la science dans ce processus de repositionnement ? Comment identifier et dévoiler les choix technologiques qui détermineront le profil des agricultures du futur ? Comment insérer les chercheurs et leurs institutions dans le débat, tout en prenant en compte les nouvelles attentes quant au rôle futur de la ruralité et des paysages dans l'imaginaire social, dans la valorisation du travail agricole, dans la recherche de nouveaux équilibres entre l'urbanisation forcenée et la désertification socio-économique de vastes espaces ?

Le professeur Sebillotte, de l'INA-PG de Paris, propose à cet égard quatre principes : (1) penser l'innovation comme processus social et la recherche comme processus d'apprentissage, en élaborant progressivement l'innovation au cours de sa diffusion dans le milieu où elle sera utilisée ; (2) contribuer à construire la demande sociale, dans le cadre d'une fonction de prospective ; (3) donner leur place aux acteurs socio-économiques ; (4) replacer toute connaissance produite dans le réel en visant à comprendre les mécanismes complexes pour pouvoir maîtriser leur fonctionnement.

Les agricultures, en effet, sont particulièrement dépendantes des aléas du climat, de la fragilité des écosystèmes, des contraintes de l'organisation sociale et de l'instabilité des marchés. L'imbrication des agricultures dans la gestion de l'eau et de l'espace, ainsi que dans la structuration des sociétés rurales, font d'elles des objets économiques spécifiques qui ne peuvent être considérés au même titre que les productions industrielles, pas plus que leurs produits ne peuvent être considérés comme des marchandises semblables aux autres. Les agricultures en effet ne peuvent être valorisées que dans le cadre du développement global, lequel est lui-même lié à la base culturelle des sociétés. C'est à ce titre que l'agriculture de demain doit être une composante essentielle de l'environnement écologique et social, une base de l'autosuffisance alimentaire et une source de bien-être et de richesse pour les populations.

BIBLIOGRAPHIE

- Brundtland G. (1987), *Our common future*, World Commission on Environment and Development, Oxford University Press, Oxford, RU.
- Cahiers Agricultures* (1992), Revue bimestrielle co-éditée par l'AUPELF-UREF et les éditions John Libbey Eurotext, Paris. Articles, éditoriaux et nouvelles brèves.
- Courtet C., Berlan-Darque M. et Demarne Y. (eds.) (1993), *Agriculture et société*, Association Descartes, INRA, Paris, 307 p.
- Farrington J. and Sudarshan B. (1991), *Managing Agricultural Research for fragile Environment*, Overseas Development Institute, London, RU, 99 p.
- Klatzmann J. (1991), *Nourrir l'humanité. Espoirs et inquiétudes*, INRA Editions, Paris, 128 p.
- Kloppenborg J. (1988), *First the seed*, Cambridge University Press, RU, 349 p.
- Sécheresse* : Revue trimestrielle co-éditée par l'AUPELF-UREF et les éditions John Libbey Eurotext, Paris. Articles, éditoriaux et nouvelles brèves.
- Vander Borgh P. et Tychon B. (éds.) (1991), *Gestion de l'azote et qualité des eaux*, CEBEDOC, Liège, Belgique, 298 p.
- Vellve R. (1992), *Saving the seed*, Earthscan Publications, London, RU, 206 p.

Chapitre 22

BIOTECHNOLOGIES ET AGRICULTURE

A. Sasson

Directeur du bureau d'études, de programmation
et d'évaluation de l'UNESCO, Paris, France.

Professeur à la Faculté des sciences
de l'université Mohammed V, Rabat, Maroc.

Sommaire

1. Introduction

2. Les biotechnologies pour la multiplication et l'amélioration des plantes cultivées

- 2.1. Culture de cellules, de tissus et d'organes de plantes
- 2.2. Culture et fusion de protoplastes
- 2.3. Transfert d'ADN et ingénierie génétique
- 2.4. Résultats prometteurs pour certaines plantes cultivées
- 2.5. Fixation d'azote et microbiologie du sol

3. Les biotechnologies au service de l'agriculture des pays en développement

- 3.1. Projets de développement
- 3.2. Les réseaux de recherche en biotechnologies
- 3.3. Les biotechnologies au service des petits agriculteurs
- 3.4. Priorités

4. Conclusion

Bibliographie

BIOTECHNOLOGIES ET AGRICULTURE

1. INTRODUCTION

Les biotechnologies peuvent être appliquées à la production alimentaire, aux cultures de rente, à l'élevage, à la conversion de la biomasse végétale en énergie, ainsi qu'à la transformation des déchets et des sous-produits de l'agriculture. La mise au point et les applications des biotechnologies peuvent se faire à différents niveaux de complexité, d'investissement et d'efforts, par exemple, dans un département de recherches avancées en biologie moléculaire, ou dans une installation peu coûteuse de culture de tissus ou de propagation clonale d'une espèce de plante vivrière. Il y a en fait diverses options possibles pour l'application des biotechnologies en agriculture, pour la production alimentaire et pour l'élevage.

L'accroissement de la production des aliments et la disponibilité à des fins domestiques de sources d'énergie bon marché permettant de réduire la déforestation constituent des préoccupations majeures pour l'humanité. Les résultats déjà acquis en la matière, ainsi que les espoirs mis dans les recherches en cours, illustrent les avantages qu'on peut tirer de l'application des biotechnologies à des fins agricoles.

Pour ce qui est des biotechnologies végétales, les cultures de cellules, de tissus et d'organes en conditions contrôlées (*in vitro*) visent à propager à grande échelle des individus élites, à sélectionner des plantes possédant les caractères désirés et à créer, par ingénierie génétique, des variétés ou des hybrides nouveaux possédant de meilleures caractéristiques (par exemple, le rendement, la résistance aux facteurs de stress et aux agents pathogènes, la teneur accrue en certaines substances).

2. LES BIOTECHNOLOGIES POUR LA MULTIPLICATION ET L'AMÉLIORATION DES PLANTES CULTIVÉES

2.1. Culture de cellules, de tissus et d'organes de plantes

Le tableau 22.1 résume les différentes techniques de culture de cellules, de tissus et d'organes de plantes, de même que leurs principaux champs d'application.

Selon le temps qui s'écoule entre un travail de recherche et l'application pratique des résultats, on peut distinguer :

– les applications à court terme (environ trois ans), notamment la propagation végétative ou clonale *in vitro* (micropropagation et production de "vitroplants"), la production de plantes indemnes de virus ou d'agents pathogènes, la conservation et l'échange de germoplasme ;

Tableau 22.1. Techniques de culture de cellules, tissus et organes, et champ d'application.

Techniques	Champ d'application
Cultures de méristèmes et régénération de plantes entières.	Micropropagation de cultivars et de plantes indemnes de virus
Cultures de protoplastes et de tissus haploïdes, embryogenèse somatique, sélection de variants et de mutants, fusion de protoplastes et régénération de plantes entières.	Micropropagation et amélioration des cultivars
Recombinaison génétique, transfert de gènes et régénération de plantes entières	Amélioration des plantes cultivées.
Culture de cellules végétales à grande échelle, sélection de variants et de mutants, culture et fusion de protoplastes, recombinaison génétique.	Production de substances utiles.

- les applications à moyen terme (trois à huit ans), qui concernent l'embryogenèse somatique, la variation somaclonale et gamétoclonale, la culture d'embryons, la fécondation *in vitro*, les cultures d'anthères et la production de plantes haploïdes ;
- les applications à long terme (de huit à quinze ans), relatives à l'hybridisation somatique, l'hybridisation entre espèces éloignées, l'isolement de souches de cellules mutantes, les transferts de gènes ou de chromosomes, la production de métabolites secondaires par des cellules végétales cultivées *in vitro* (Sasson, 1988).

L'embryogenèse somatique, observée pour la première fois dans des cultures de tissus de carotte, consiste à transformer des masses tissulaires ou des cals obtenus *in vitro* en **embryoïdes**. Ces derniers présentent des ressemblances frappantes avec les embryons provenant de la reproduction sexuée. Cultivés sur des milieux appropriés, ces embryoïdes (improprement appelés "semences artificielles") produisent des plantules, ou vitroplants, qui sont acclimatés en serre avant d'être transplantés dans des pépinières (Lioret, 1982 ; Branton et Blake, 1983 ; Sasson, 1988). L'embryogenèse somatique présente des difficultés résultant des variations somaclonales dues à la culture sur milieu artificiel, ainsi que des modes d'enrobage des embryoïdes dans des polymères ou des résines. Toutefois, des résultats prometteurs ont été obtenus par divers groupes de chercheurs aux USA et en Europe, notamment avec la luzerne, le riz et le cotonnier. Si elle est bien contrôlée, la variation somaclonale peut être une source de **variabilité génétique** utile ; des variants somaclonaux, résistants aux organismes pathogènes et aux ravageurs ou possédant d'autres caractères agronomiques intéressants, ont pu être obtenus.

Les cultures de tissus végétaux ont été utilisées avec succès pour l'obtention et la micropropagation de clones indemnes de virus chez de nombreuses espèces et variétés de plantes alimentaires, horticoles, fruitières, ornementales et forestières des régions tempérées. Ces techniques se sont également montrées efficaces pour la propagation végétative d'espèces tropicales à haut degré d'hétérozygotie, qui sont souvent atteintes d'affections virales et qui se prêtent bien à la micropropagation *in vitro* : orchidées, cocotier, palmier à huile, palmier-dattier, agrumes, gingembre, papayer, pomme de terre, patate douce. Des résultats encourageants ont été aussi obtenus avec le caféier, le théier, le cacaoyer, la canne à sucre, l'aloès, le bambou, la banane plan-

tain, le taro, le manioc et le pamplemoussier. Plusieurs de ces cultures jouent un rôle important dans l'économie des pays en développement et sur le marché international des produits agricoles (Margara, 1982 ; Conger, 1983 ; Dodds et Roberts, 1983 ; Vidalie, 1983 ; Dixon, 1985 ; Sasson, 1988, 1989 ; Sasson et Costarini, 1990).

Une importance particulière est conférée à la production et à la sélection de matériel clonal produit par micropropagation *in vitro*. La propagation clonale rapide s'est révélée particulièrement rentable avec le bananier, le plantain, le manioc, la pomme de terre, la patate douce, l'igname et le palmier à huile. La production de plantes indemnes de virus et d'agents pathogènes a été obtenue chez plus de cinquante espèces végétales importantes pour les pays en développement, en associant la culture de méristèmes à la thermothérapie et à la chimiothérapie. Cela permet la distribution de germoplasme sain indispensable aux programmes d'amélioration et de sélection. La conservation *in vitro (ex situ)*, d'abord fondée sur des cultures de pousses, comporte actuellement des cultures de méristèmes, d'apex, de cellules, de cals et d'embryons, qui sont utilisés à grande échelle pour le manioc, la pomme de terre, la patate douce et le bananier. Ces techniques offrent une alternative à la conservation du germoplasme sur le terrain (*in situ*), ou complètent celle-ci. Certains problèmes concernant la stabilité de ces cultures proviennent des variations génétiques des cellules somatiques (variation somaclonale) et ils doivent être appréciés pour chaque espèce de plante cultivée.

Le diagnostic moléculaire, utilisant des immunotests, des anticorps monoclonaux et des sondes d'acides nucléiques, est plus rapide et plus précis que les méthodes habituelles de détection des virus et d'autres organismes pathogènes. Ces techniques sont utilisées notamment pour détecter les virus du "tungro", du nanisme buissonnant et du nanisme du riz en Asie, le virus de la jaunisse nanisante de l'orge chez les céréales à petits grains en Afrique et en Amérique latine, ainsi que plusieurs virus ou viroïdes de la pomme de terre.

On utilise également des biotechnologies végétales plus avancées. Les variants somaclonaux sont sélectionnés pour la tolérance au sel ou à d'autres facteurs de stress. Le sauvetage d'ovules et d'embryons, de même que les traitements hormonaux sont utilisés pour surmonter les barrières de fécondité lors de croisements entre riz sauvages et riz cultivés, permettant de la sorte l'incorporation de la résistance à l'orthoptère qui transmet le "grassy stunt virus" en Asie tropicale. Les cultures d'anthères et de grains de pollen faites d'abord avec le pétunia et le tabac, ont prouvé leur intérêt pour abrégé les cycles de sélection, tout en permettant l'expression de gènes récessifs et la sélection de variants gamétoclonaux. Dans le cas du riz, il faut dix-neuf mois entre la culture d'anthères et les essais de rendement sur le terrain, soit une réduction de l'ordre de 50 % par rapport aux méthodes de croisement habituelles. Le matériel cultivé *in vitro* est utilisé dans l'amélioration du riz pour la tolérance au froid, à la sécheresse et à la salinité, et pour la résistance à la pyriculariose. Les cultures d'anthères constituent également un moyen d'améliorer la régénération des plantes à partir de cultures de tissus, en particulier chez les espèces récalcitrantes comme les céréales et les légumineuses (ICRISAT, 1988 ; Plucknett et Cohen, 1989 ; Komen, 1990).

2.2. Culture et fusion de protoplastes

La culture et la fusion de protoplastes (hybridation somatique) offre des possibilités intéressantes pour l'amélioration des espèces et variétés cultivées et pour l'ac-

croissement de la variabilité au sein de celles-ci à la suite du transfert de caractères utiles entre espèces éloignées.

En 1988, des chercheurs japonais ont réussi à cultiver et à obtenir des cals de riz de la sous-espèce *indica*. Les protoplastes provenaient d'embryons matures traités par des cellulases ; ils avaient été cultivés en milieu liquide, avant d'être transférés sur milieu solide. Sur les différentes variétés de riz provenant d'Afrique, de Chine, d'Inde et des Philippines, quatre donnèrent des résultats positifs : deux lignées de Shin-Shiraboro (Inde), la lignée IRAT-109 (Afrique) et la lignée chinoise Chokato. Des résultats comparables avaient été obtenus auparavant avec la sous-espèce *japonica*. Ce succès peut contribuer à l'amélioration de la sous-espèce *indica*, qui est cultivée sur la moitié des surfaces où pousse le riz dans le monde. On pourra éventuellement obtenir des hybrides entre les deux sous-espèces par hybridation somatique, ce qui n'est pas possible avec les méthodes de croisement habituelles.

Les chercheurs chinois utilisent des cultures de protoplastes pour régénérer le riz, le blé, le maïs, le soja, le concombre, le cotonnier et les agrumes. Des résultats prometteurs ont été obtenus avec la pomme de terre, la tomate et les *Brassica* par des chercheurs japonais et certaines équipes européennes (Bajaj, 1989).

2.3. Transfert d'ADN et ingénierie génétique

En ce qui concerne le transfert de gènes chez les plantes, la recherche initiée au début des années 70 a abouti au cours des années 80 à la mise au point de vecteurs de transfert, dont le plus communément utilisé est le plasmide Ti (molécule circulaire d'ADN) de la bactérie tumorigène *Agrobacterium tumefaciens*, qui provoque des tumeurs du collet chez les dicotylédones. Certains gènes ont été transférés de la sorte et on a pu obtenir leur expression dans les cellules transformées et chez les descendants des plantes transformées. Le tabac et d'autres solanacées ont constitué le matériel expérimental de choix (Ream et Gordon, 1982 ; Chilton, 1983 ; Gleba, 1986 ; Gasser et Fraley, 1989).

Les applications d'ingénierie génétique pour l'amélioration des plantes cultivées dépendent de l'identification, de l'isolement, du clonage et de l'expression de gènes d'importance économique. Un préalable à cette application est la construction d'une bibliothèque génomique des plantes intéressantes, contenant un ensemble de longs fragments d'ADN qui se chevauchent et comprennent au moins une copie de toutes les séquences du génome. Ces fragments sont clonés et multipliés dans un vecteur procaryotique, généralement un bactériophage. En Inde, le centre de biotechnologie de l'Institut indien de la recherche agronomique à New Delhi, a établi une telle librairie pour le pois chiche.

Les mécanismes qui règlent l'expression des gènes transférés dans une cellule hôte sont très étudiés, car leur connaissance pourra favoriser leur expression dans des cellules particulières (par exemple dans les feuilles ou les graines des plantes transformées) ou en réponse à des signaux déterminés. Il faudra approfondir encore les recherches sur la nature et les fonctions des gènes régulateurs chez les plantes, ainsi que sur les relations entre des caractères particuliers (résistance aux organismes pathogènes et aux ravageurs, à la sécheresse ou au froid, précocité, rendement, etc.) et les gènes ou groupes de gènes correspondants.

Le transfert de gènes codant pour la résistance aux herbicides a bénéficié du soutien

financier de plusieurs firmes agrochimiques, en raison des avantages commerciaux tirés d'une telle innovation, notamment l'expansion du commerce d'herbicides meilleur marché et à large spectre pour inclure des cultures antérieurement sensibles, ainsi que l'extension de la période pendant laquelle une firme peut continuer à tirer profit de ses herbicides, même après l'expiration de leurs brevets, en les vendant avec les semences de variétés résistantes. C'est ainsi que la résistance à la phosphinotricine (Basta de Hoechst AG) a été transférée à la pomme de terre, la tomate et au tabac, tandis que la résistance au glyphosate (Roundup de Monsanto & Co.), l'herbicide le plus vendu dans le monde, était transférée chez le tabac, le cotonnier et le soja. De même, le gène de résistance à l'atrazine a été transféré de *Solanum nigrum* au soja, et des plantes résistantes ont été régénérées (Fillatti et al., 1987).

Outre le transfert de gènes codant pour la résistance à des herbicides, les gènes codant pour les toxines de *Bacillus thuringiensis* ont été transférés et des plantes résistantes à certains insectes ont été obtenues. Un de ces gènes a été transféré dans des lignées de riz régénérées à partir de cals. La transgénose concerne aussi le transfert et l'expression marquée de gènes codant pour des protéines riches en acides aminés soufrés, la résistance au virus de la mosaïque du tabac et à d'autres virus, et des modifications de la pigmentation des fleurs (Cuzzo et al., 1988 ; Yang et al., 1988).

Le transfert de gènes ou d'ADN chez les plantes n'est pas limité à l'utilisation du plasmide Ti et n'est pas confiné aux dicotylédones. De nouveaux vecteurs de gènes sont disponibles dès à présent et les monocotylédones semblent transformables. Les liposomes, la micro-injection et l'électroporation sont de plus en plus utilisés pour transférer des ADN étrangers dans des cellules ou des protoplastes de plantes. La micro-injection d'ADN dans différents tissus, y compris les grains de pollen, les ovules, les embryons fécondés ou les protoplastes, offre une autre option que la transformation par *Agrobacterium tumefaciens* chez les céréales et autres monocotylédones, qui ne sont pas aisément infectées par cette bactérie. L'amélioration du taux de régénération des plantes issues de protoplastes transformés peut réduire le cycle de sélection des céréales (maïs et riz) et d'autres graminées (canne à sucre et plantes fourragères).

Des recherches portent sur l'utilisation d'ARN antisens, à la suite des travaux préliminaires montrant que les produits de transcription de polynucléotides antisens peuvent bloquer l'expression des gènes ayant une polarité normale. Les mécanismes antisens opèrent normalement chez les bactéries pour le contrôle de l'expression des gènes et on tente d'adapter ces mécanismes aux cellules eucaryotiques transformées.

Dans la livraison du 25 août 1988 de la revue *Nature*, furent publiés les résultats portant sur l'inhibition du gène de l'enzyme polygalacturonase chez la tomate, qui joue un rôle clé dans le ramollissement du fruit. Il s'agit là d'une étape importante vers la création de tomates, transgéniques par ingénierie génétique, qui mûrissent plus lentement. Les chercheurs américains et britanniques ont tout d'abord cloné le gène de la polygalacturonase et son ADN complémentaire. Il l'ont ensuite associé, à contresens, à une séquence régulatrice assurant l'expression continue du gène antisens. Celui-ci fut introduit dans la tomate par le plasmide Ti d'*A. tumefaciens*. La tomate transgénique possède l'ADN normal et l'ADN antisens. Dans la plante, ce dernier synthétise de l'ARN antisens qui est complémentaire de l'ARN messenger codé par le gène normal. L'association entre les deux ARN complémentaires bloque la synthèse de l'enzyme à raison de 90 % et ce caractère est héréditaire de façon stable. On étudie les effets de cette transformation sur le ramollissement des fruits et on vérifie s'il n'y a pas de modifications indésirables de la qualité de ces derniers (Roberts, 1988).

2.4. Résultats prometteurs pour certaines plantes cultivées

Il existe, dans les pays en développement, nombre d'exemples de progrès réalisés dans l'application des biotechnologies à la propagation des espèces ou variétés cultivées et à l'amélioration des plantes, qui auront un impact sur la production agricole. Les résultats obtenus dans ce domaine dans les pays industrialisés auront en outre un impact, soit à la suite du transfert de technologies, de la coopération bilatérale ou multilatérale, ou d'accords avec des sociétés transnationales.

Ces exemples concernent à la fois les cultures vivrières et les cultures de rente. Ils correspondent à l'emploi d'un large éventail de biotechnologies ainsi qu'à la conservation du germoplasme par les cultures de tissus. Des progrès significatifs ont été réalisés (tableaux 22.2 et 22.3) dans les centres internationaux de recherche agronomique et dans plusieurs pays en développement.

Tableau 22.2. Applications des biotechnologies aux céréales (1989-1990).

Technique	Riz		Blé		Mais	Sorgho	Mil	Orge	Triticale	Seigle
	Japonica	Indica	tendre	dur						
Micropropagation	++	+	+++	+++	+++	+++	+	++	++	++
Sauvetage d'embryons	+++	+++	+++	+++	++	+	++	+++	++	+++
Culture d'anthers	+++	0(+)	+++	+	++	+(+)	++	+++	+++	+
Culture de microspores	++	0	++	0	0	0	0	+(+)	0	0
Culture de cals	+++	+++	++	++	+++	++(+)	++	++	++	++
Sélection <i>in vitro</i>	++	++	++	+(+)	++	+++	++	++	+(+)	0
Suspensions cellulaires	+++	+	++*	+	++	0	++	+	+	+
Culture de protoplastes	++	+	++	0	+	0	+(+)	+	0	0
Régénération de protoplastes	++	+	+	0	+	0	+	+	0	0
Fusion de protoplastes	+	0	0	0	0	0	+	0	0	0
Plantes transgéniques	+	0	0	0	(+)	0	0	0	0	+
RFLP	++	+++	+(+)	+	+++	+	0	++	+	0

* Pas de régénération

x Possible, mais non pertinente.

+++ Techniques couramment mises en œuvre.

++ Techniques largement utilisées.

+ Techniques au stade initial.

0 Techniques non disponibles

2.5. Fixation d'azote et microbiologie du sol

Un des principaux facteurs limitants de l'accroissement de la production agricole est l'apport d'azote. Pour éviter l'utilisation d'engrais azotés coûteux et susceptibles d'être polluants, la fixation biologique de l'azote (voir chapitre 12) pourrait être accrue de plusieurs manières : sélection de souches microbiennes plus efficaces (cyanobactéries libres fixatrices d'azote et rhizobactéries ou actinomycètes symbiotiques) et

Tableau 22.3. Applications des biotechnologies aux plantes cultivées à racines tubéreuses et à tubercules, ainsi qu'au bananier et au plantain (1989-1990)

Technique	Pomme de terre	Patate douce	Manioc	Igname Aracées	Bananier Plantain
Micropropagation	+++	++	+++	++	+++
Sauvetage d'embryons	++	++	++	+	+++
Culture d'anthers	+	+	+	+	+
Culture de microspores	+	0	+	+	0
Culture de cals	++	+	+++	++	+
Sélection <i>in vitro</i>	+	+	0	+	+
Suspensions cellulaires	+	+	+++	+	+
Culture de protoplastes	++	+	+++	+	+
Régénération de protoplastes	++	+	0	0	0
Fusion de protoplastes	+	0	+	0	0
Plantes transgéniques	++	+	+	+	0
RFLP	+	+	+	+	+
Variation somaclonale	+	+	+	+	++
Conservation <i>in vitro</i>	+++	+	+++	++	++
Cryopréservation	+	+	+	+	0

+++ Techniques couramment mises en œuvre.

++ Techniques largement utilisées.

+ Techniques au stade initial

0 Techniques non disponibles.

associations à plus haut rendement entre les plantes et les micro-organismes fixateurs d'azote ; expression optimale des gènes codant pour les différentes étapes de la fixation d'azote ; ingénierie génétique des souches microbiennes concernées.

L'ingénierie génétique des plantes cultivées peut être considérée comme un complément des différentes pratiques agricoles concernant l'augmentation de la fixation d'azote par des micro-organismes libres ou symbiotiques, l'inoculation des mycorhizes (pour solubiliser et absorber le phosphate dans les sols peu fertiles), la culture d'*Azolla* dans les rizières, la sélection de souches de *Rhizobium* particulièrement efficaces, l'isolement de nouveaux organismes fixateurs d'azote (*Hellobacillus* chez le riz, *Saccharobacter nitrocaptam* chez la canne à sucre, et *Photorhizobium thompsonum*, rhizobactérie symbiotique photosynthétique).

D'autres sujets importants de recherche-développement comprennent des modifications de la microflore des racines (antagonismes entre *Pseudomonas fluorescens* et *Pythium*, champignon parasite du cotonnier), la stimulation des antagonismes biologiques entre *Trichoderma spp.* et les champignons pathogènes, ainsi que les différents moyens de lutte biologique contre les organismes pathogènes du sol.

Dans les régions tropicales, en relation avec la riziculture, la fougère *Azolla*, associée à la cyanobactérie *Anabaena azollae*, peut fixer 60 kg d'azote à l'hectare. Son utilisation s'est accrue en Asie et les scientifiques améliorent sa production et son utilisation en Chine, en Inde, dans les Philippines, la Thaïlande et le Viêt-nam notamment. Environ 1,3 million d'hectares en Chine et 400 000 hectares au Viêt-nam sont fertilisés avec des cyanobactéries. L'Institut international de recherches sur le riz, basé à Los Baños, Philippines, a rassemblé un grand nombre d'espèces et de variétés de cyanobactéries fixatrices d'azote. Outre les différentes variétés d'*Azolla* utilisées comme engrais vert dans les champs de riz et qui sont très étudiées en

Asie du Sud-Est, on a isolé dans le cadre du Programme d'action national *Azolla* aux Philippines, un hybride qui résiste aux maladies et aux ravageurs, aux faibles teneurs en phosphore du sol, aux stress thermique et hydrique.

La légumineuse arbustive *Sesbania rostrata*, qui porte des nodosités fixatrices d'azote sur ses tiges et fixe l'azote même dans des sols inondés, peut être utilisée comme un engrais vert très efficace avant une culture de riz, ou pour restaurer la fertilité dans les zones érodées, ou encore dans des projets de reboisement.

La fixation biologique de l'azote, spécialement la fixation symbiotique par les légumineuses et par différentes espèces arbustives (légumineuses ou non), est très prometteuse pour les pays en développement et peut mener à des innovations et à des découvertes scientifiques importantes. Les techniques actuelles et celles qui deviendront accessibles suite à l'essor des biotechnologies peuvent être appliquées à différents niveaux de sophistication et certaines sont déjà à la portée des petits fermiers, comme la production de *Rhizobium* et l'inoculation des semences (Diem et Dommergues, 1989).

3. LES BIOTECHNOLOGIES AU SERVICE DE L'AGRICULTURE DES PAYS EN DÉVELOPPEMENT

3.1. Projets de développement

Parmi les nombreux projets de biotechnologies orientés vers le développement des productions végétales, qui font l'objet de recherches concertées visant à transférer les nouvelles technologies, on peut citer les exemples suivants :

- Le Projet de culture de tissus pour les plantes cultivées (TCCP) cherche à développer et à transférer les méthodes de culture de tissus et de cellules. En premier lieu, des technologies sont mises au point pour sélectionner *in vitro* des lignées cellulaires tolérantes à la salinité, à la sécheresse et aux sols acides riches en aluminium. Les protocoles pour la production de cals embryogènes, la sélection et la régénération de plantes cultivées importantes, y compris les légumineuses, le sorgho, le blé et le riz, sont mis au point. En second lieu, des variants somaclonaux d'intérêt agronomique ont été obtenus chez les céréales. Des essais au champ sont réalisés pour confirmer la tolérance à des stress particuliers de plantes entières de sorgho, de blé et de riz. Enfin, les méthodes de culture de tissus sont transférées aux laboratoires associés dans les pays en développement et dans certains centres internationaux de recherche agronomique.

- L'amélioration des souches tropicales de *Rhizobium* a été entreprise dans le cadre du Projet sur la fixation d'azote par les légumineuses agricoles tropicales. Le programme de recherche comprend l'ingénierie génétique de nouvelles souches de *Rhizobium* contenant des copies multiples des gènes de structure "nif" et des gènes associés à l'infection, l'introduction de plasmides liés à la symbiose avec les plantes hôtes dans des *Rhizobium* provenant de collections de cultures, ainsi que l'identification et le transfert de gènes qui rendent certaines souches hypercompétitives pour les légumineuses tropicales.

3.2. Les réseaux de recherche en biotechnologies

Les réseaux de recherche en biotechnologies ont été mis en place pour faire participer les chercheurs des pays en développement à des travaux dans des laboratoires avancés. Ces réseaux soutiennent des réunions internationales, favorisent les applications biotechnologiques aux besoins prioritaires des pays en développement, offrent des formations avancées en biologie moléculaire et cellulaire, et en épidémiologie, en ayant recours aux techniques de la biologie moléculaire, diffusent l'information technique, transfèrent les technologies appropriées, et apportent une assistance aux chercheurs dans la préparation de leurs projets et dans la présentation de leurs résultats (Cohen, 1989).

Le Réseau international de biotechnologie végétale (IPBNet), soutenu par le TCCP, le réseau RFLP du CIMMYT et de l'Amérique du Nord et latine, qui étudie les fondements génétiques de caractères quantitatifs du maïs, en analysant le polymorphisme de longueur des fragments de restriction, et le Réseau de recherches avancées sur le manioc, piloté à partir du CIAT, sont quelques exemples de réseaux en biotechnologie végétale. Le réseau RFLP mène des recherches sur l'hétérogénéité génétique de caractères et mettra au point des stratégies pour utiliser des marqueurs moléculaires dans les programmes de sélection du maïs. Les caractères favorables sont relatifs au rendement, à la résistance au foreur des tiges, à la maturité, à la résistance mécanique des tiges et des racines, et à la résistance aux virus.

3.3. Les biotechnologies au service des petits agriculteurs

Depuis le début des années 80, il y a eu un très large débat sur les possibilités pour les biotechnologies de répondre aux besoins des pays en développement et, plus spécifiquement, sur la question de savoir si les biotechnologies végétales et agricoles seraient bénéfiques aux petits agriculteurs de ces régions. Actuellement, de nombreux projets sont initiés dans différents pays (Bunders, 1990).

Un projet utile aux petits fermiers d'Afrique concerne la réduction des quantités de cyanure dans les racines de manioc. Outre ses avantages comme plante vivrière typique de la petite agriculture pratiquée sur des sols pauvres, sableux, nécessitant peu d'engrais et de soins, et présentant une longue période de récolte de huit à trente-six mois, le manioc devient souvent la principale culture vivrière en périodes sèches, en cas d'échec d'autres cultures, ou lorsque se produisent des invasions de criquets. Mais la consommation du manioc pose des problèmes de santé, car la plupart des variétés contiennent des glucosides (linamarine et lotaustroline) qui produisent du cyanure quand les racines sont endommagées par des insectes, lors de leur récolte ou de leur préparation pour la consommation ; la pathologie résultante comprend l'apparition de goût, de troubles nerveux et d'ataxie tropicale. La détoxification du cyanure peut se produire sous l'effet d'acides aminés soufrés, mais la ration alimentaire en Afrique est pauvre en protéines et en acides aminés soufrés.

Trois solutions sont envisagées pour résoudre ce problème :

- un apport de nourriture riche en protéines, ce qui ne semble pas réaliste dans les zones de production du manioc ;
- détoxifier pendant la préparation (séchage des racines de manioc pendant deux mois et ébullition pendant plusieurs heures), ce qui est impossible en périodes de disette où l'on consomme le manioc dans les deux jours qui suivent la récolte des racines ;

– diminuer la teneur en glucosides cyanogènes par la sélection variétale et l'ingénierie génétique.

Robertson et Sakina (1989) ont identifié plusieurs voies permettant aux biotechnologies d'accroître la production de manioc dans un pays où ce dernier et le maïs sont les cultures de subsistance. Ils ont établi une collection de germoplasme pour distribution dans les pays intéressés d'Afrique australe et ont développé l'expertise permettant la micropropagation rapide du manioc, en vue de mettre à la disposition des agriculteurs les meilleurs clones. Cette technique permet aussi de diminuer l'incidence des maladies et des ravageurs du manioc. Ces auteurs utilisent également la fusion de protoplastes pour réunir les caractères intéressants de plusieurs clones en un seul. Ces travaux reposent sur des technologies simples, mais ils ont eu pour effet de faire doubler les rendements.

En ce qui concerne la pomme de terre, Robertson et Sakina (1989) ont réalisé des cultures de méristèmes des principales variétés pour éliminer les virus et champignons, puis les ont multipliées *in vitro*. Cette méthode permet de protéger la pomme de terre contre les épidémies de flétrissement bactérien. Enfin, outre la distribution de préparations de bactéries fixatrices d'azote à des centaines d'agriculteurs qui ne peuvent se procurer des engrais azotés, on envisage également de leur fournir des inoculum de mycorhizes, ainsi que des spores pour la culture de champignons comestibles (Robertson et Sakina, 1989).

Il est donc possible de mettre au point et de mener à bien des projets biotechnologiques au bénéfice des petits agriculteurs des pays en développement, en identifiant leurs besoins et leurs intérêts. Les technologies mises en œuvre ne sont pas nécessairement des technologies obsolètes, mais bien des technologies appropriées. Cependant, une analyse approfondie des contraintes socio-économiques est essentielle pour éviter des effets secondaires inattendus.

3.4. Priorités

La recherche agronomique, y compris les biotechnologies végétales, devrait viser à améliorer les systèmes de culture existants en y associant les biotechnologies, et non pour remplacer les techniques existantes. Les recherches socio-économiques devraient jouer un rôle dans leur acceptation. C'est ainsi qu'en Asie, par exemple, il faut prendre en considération les très faibles surfaces cultivées par l'agriculteur, le manque de nouvelles terres fertiles, et le caractère mixte des systèmes d'exploitation agricole où sont associés cultures, élevage, pisciculture et aquiculture.

En ce qui concerne la propagation rapide des plantes cultivées, la conservation de longue durée des ressources génétiques et l'élimination des organismes pathogènes, il faudrait appliquer les techniques appropriées à un large éventail de plantes cultivées dans les pays en développement, notamment aux plantes ligneuses et aux légumineuses tropicales.

Par ailleurs, la sélection de cultivars tolérants au sel et à la sécheresse est considérée comme prioritaire. Les techniques utilisant les haploïdes devraient être mises en œuvre rapidement en vue d'accélérer les processus de sélection. Des succès importants ont été obtenus à cet égard chez l'orge, le blé, le maïs, le riz, la pomme de terre, les *Brassica*, mais il faudrait développer davantage la recherche sur les légumineuses. L'hybridation somatique est considérée également comme prioritaire,

car elle permet de surmonter les barrières sexuelles et permet d'obtenir des hybrides, des cybrides et des produits de fusion asymétrique contenant de nouvelles combinaisons génétiques.

En matière de transfert de gènes et d'ingénierie génétique, on devrait donner la priorité aux principales cultures vivrières, de préférence en collaboration avec les centres internationaux de recherche agronomique. L'ingénierie génétique pourrait être appliquée au diagnostic des organismes pathogènes de façon à accroître l'efficacité de la sélection de cultivars résistants. Le développement de sondes d'acides nucléiques non radioactives est crucial à cet égard, ainsi que le recours au polymorphisme de la longueur des fragments de restriction (RFLP).

A la lumière des résultats des recherches sur le rôle des mycorhizes dans l'assimilation des nutriments par les plantes (voir chapitre 11) et dans leur résistance vis-à-vis des organismes pathogènes des racines, il faudrait réaliser plus de recherches dans les pays en développement pour obtenir des inoculums compétitifs et efficaces, pour faire des essais d'évaluation multiloaux au champ, pour étudier les interactions entre les mycorhizes et les micro-organismes de la rhizosphère, et pour sélectionner des plantes dont l'efficacité symbiotique serait plus grande.

Pour ce qui est de la fixation symbiotique de l'azote, la sélection ou la création par ingénierie génétique, de souches de *Rhizobium* tolérantes à la sécheresse, aux hautes températures et aux pH bas, est hautement prioritaire, ainsi que l'amélioration des techniques d'inoculation pour accroître la survie et la compétitivité des souches inoculées. Il faudrait également mener des recherches visant à faire coïncider la demande maximale d'azote de la plante avec l'intensité optimale de la fixation d'azote, ainsi que sur les symbioses des plantes actinorhiziennes, particulièrement abondantes en régions tropicales.

Concernant la fixation d'azote par des micro-organismes associés, comme l'*Azospirillum*, il faudrait mieux évaluer leur importance, en dénombrant leurs populations dans la rhizosphère, rechercher les moyens d'accroître leur nombre et isoler les meilleures souches.

Les légumineuses, étant donné leur importance écologique en régions tropicales et sub-tropicales, devraient faire l'objet de recherches actives, notamment sur la régénération *in vitro* et la sélection de cultivars résistants (y compris les méthodes de diagnostic et de sélection au niveau cellulaire), le transfert de gènes pour la tolérance aux stress, l'utilisation de mycorhizes pour améliorer la tolérance aux facteurs mésologiques défavorables et aux éléments toxiques, et sur l'accroissement de la fixation biologique de l'azote par les *Rhizobium*.

Le sorgho est également prioritaire en raison des possibilités d'accroissement de sa biomasse et des perspectives offertes par l'application des biotechnologies. Il convient de rechercher des méthodes efficaces de régénération et d'obtention d'haploïdes pour identifier les lignées hautement productives. Le transfert de résistance aux insectes ravageurs peut être obtenu par transformation génétique et les méthodes de sélection variétale utilisant des marqueurs biochimiques devraient être développées. On cherchera aussi à améliorer l'assimilation des nutriments par les mycorhizes et la fixation d'azote. De tels efforts de recherche demanderont une décennie pour aboutir.

4. CONCLUSION

Une plus grande efficacité dans l'amélioration des plantes, résultant de l'emploi des biotechnologies, peut être espérée au cours de la prochaine décennie. Les pays en développement peuvent certainement bénéficier de ces progrès et en particulier de la conservation de germoplasme indemne de maladies et de sa disponibilité pour des programmes de sélection ou pour la propagation clonale rapide des espèces et variétés cultivées. Les techniques plus avancées, bien que coûteuses et utilisées à une échelle plus limitée (identification, isolement, clonage et transfert de gènes), peuvent aider les sélectionneurs à accroître l'efficacité des méthodes classiques, par exemple en testant et en assemblant les éléments des génomes qu'ils recherchent pour leurs programmes de sélection. C'est pourquoi les centres internationaux de recherche agronomique étudient les implications de la technique du polymorphisme de la longueur des fragments de restriction (RFLP), utilisée pour identifier de longs segments d'ADN ou des fragments de chromosomes, qui sont impliqués dans la détermination de caractères tels que le rendement.

Un autre domaine de l'accroissement de la production agricole et alimentaire, où les biotechnologies peuvent jouer un rôle, concerne la réduction des pertes anté- et post-messicoles. Cela peut être obtenu par les bio-insecticides ou biopesticides (comme des toxines bactériennes, des virus d'insectes ou la lutte biologique) et par de meilleures techniques de conservation et de traitement des aliments.

L'utilisation des techniques classiques d'amélioration et de sélection, en association avec les biotechnologies (culture de tissus et de cellules, inoculation avec des souches appropriées de mycorhizes et de microbes fixateurs d'azote), est particulièrement avantageuse et peu coûteuse. L'ingénierie génétique jouera probablement un rôle important dans le futur, mais les expectatives en la matière ne devraient pas être surestimées. En tout état de cause, les pays en développement ne devraient pas être laissés à l'écart de ces progrès à moyenne ou à longue échéance, les activités de formation avancée pouvant être très utiles à cet effet.

BIBLIOGRAPHIE

- Abu El-Nil M.M., Al-Ghamdi A.S., Turjoman A. (1986), "Role of tissue culture in propagation and genetic free improvement of date palm : perspective review", in *Proceedings of the Second Symposium on Date Palm* (King Faisal University, 3-6 March 1986), Al Hasa, Saudi Arabia.
- Bajaj Y.P.S. (ed.) (1989), *Plant protoplasts and genetic engineering II*, Biotechnology in Agriculture and Forestry, vol. 9, Springer-Verlag, Berlin, 450 p.
- Bajaj Y.P.S. (ed.) (1990a), *Legumes and oilseed crops I*, Biotechnology in Agriculture and Forestry, vol. 10, Springer-Verlag, Berlin, 682 p.
- Bajaj Y.P.S. (ed.) (1990b), *Wheat*, Biotechnology in Agriculture and Forestry, vol. 13, Springer-Verlag, Berlin, 710 p.
- Belarmino M.C., Del Rosario A.G., (1988), "Tissue culture of Dioscorea spp.", in *Abstracts of Papers First National Symposium on Plant Tissue Culture in Phil. Agric. and Forestry*, 26-28 May 1988, Los Baños College of Agriculture, Laguna, Phil.
- Branton R., Blake J. (1983), "A lovely clone of coconuts.", *New Scientist*, **98** : 554-7.
- Bunders JFG. (1990), *Biotechnology for small-scale farmers in developing countries : Analysis and assessment procedures*, V.U. University Press, Amsterdam.

- Chilton M.D. (1983), "A vector for introducing new genes into plants.", *Scientific American*, **248** : 36-45.
- Cohen J.I. (1989), "Biotechnology research for the developing world.", *Trends in Biotechnology* (TIBTECH, Elsevier Science Publishers, Cambridge, U.K.), **7** : 295-303.
- Conger B.V. (1983), *Cloning agricultural plants via in vitro techniques*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 280 p.
- Cuozzo M., O'Connell K.M., Kaniewski W., Fang Rong-Xiang, Chua Nam-Hai, Tumer N.E. (1988), "Viral protection in transgenic tobacco plants expressing the cucumber mosaic virus coat protein or its antisense RNA", *Bio/Technology*, **6** : 549-57.
- Demarly Y, Sibi M. (1989), *Amélioration des plantes et biotechnologies*, Paris : John Libbey Eurotext.
- Diem H.G., Dommergues Y. (1989), "Current and potential uses and management of Casuarinaceae in the tropics and subtropics.", in Schwintzer C., Tjepkema J.D. (eds) *The biology of Frankia and actinorhizal plants*.
- Dixon R.A. (1985), *Plant cell culture*, IRL Press, Oxford, Coll. "Practical Approach", 252 p.
- Dodds J.H., Roberts L.W. (1983), *Experiments in plant tissue culture*, Cambridge University Press, Cambridge, 178 p.
- Durand-Gasselín T., Le Guen V., Konan K., Duval Y. (1990), "Plantations en Côte-d'Ivoire de palmiers à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.), obtenus par culture *in vitro*. Premiers résultats (1)", *Oléagineux*, **45** (1) : 1-11.
- Fillatti J.J., Kiser J., Rose R., Comai L. (1987), "Efficient transfer of a glyphosate tolerance gene into tomato using a binary *Agrobacterium tumefaciens* vector.", *Bio/Technology*, **5** : 726-30.
- Fisher R. (ed.). (1989), *Anaplasmosis/babesiosis bibliography : 1977-1987.*, Anaplasmosis Babesiosis Network, Washington State University.
- Gasser C.S., Fraley R.T. (1989), "Genetically engineering plants for crop improvement.", *Science*, **244** : 1293-9.
- Gleba Yu. Yu. (1986), "Cellular genetic engineering : a new technology in plant breeding ?", *Impact of science on society* (Unesco, Paris), **36** (2) : 165-73.
- International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT) (1988), *Biotechnology in tropical crop improvement*. Patancheru, Andhra Pradesh, India, 160 p.
- Komen J. (1990), "CIMMYT : Biotechnology for wheat and maize breeding.", *Biotechnology and Development Monitor*, Joint publication of the Directorate General International Cooperation of the Ministry of Foreign Affairs, The Hague, and the University of Amsterdam, 2, 20-1.
- Lioret U. (1982), "Des palmiers éprouvette par millions", *La Recherche*, **13** (135) : 926-8.
- Loo S.W., Xu Z.H. (1986), "Rice : anther culture for rice improvement in China. ", in *Biotechnology in agriculture and forestry, vol. 2, Crops I*, Berlin, Springer Verlag, p. 139-56.
- Margara J. (1982), *Bases de la multiplication végétative. Les méristèmes et l'organogénèse*, INRA, Paris, 262 p.
- Momtaz A. (1986), "Improvement of rice research in Egypt through biotechnology.", in *Workshop on biotechnology for crop improvement: potentials and limitations*, The International Rice Research Institute, IRRI, Los Baños, Laguna, Philippines, 13-17 October 1986, 11 p.
- Navarro L. (1981), "Citrus shoot-tip grafting in vitro (STG) and its applications : a review.", in *Proc. Int. Soc. Citriculture*, p. 452-6.

- Navarro L. (1988), "Application of shoot-tip grafting *in vitro* to woody species.", *Acta Horticulturae*, Technical Communications of ISHS, International Society for Horticultural Science, Pisa, Italy, 3-5 September 1987, 227, p. 43-55.
- Obame L., Koumba-Koumba D. (1989), "Vitroculture du manioc (*Manihot esculenta* Crantz) au Gabon.", in *Symposium sur le rôle de la biologie dans la solution de la crise alimentaire en Afrique*, Yamoussoukro, Côte-d'Ivoire, 25-29 juillet 1989.
- Peacock W.J. (1989), in Brown A.H.D., Frankel O.H., Marshall D.R., Williams J.T. (eds.), *The use of plant genetic resources*, Cambridge University Press, Cambridge, 363-76.
- Pearce H. (1990), "Chinese super-rice in the balance.", *Panoscope* (The Panos Institute, London), 16, 4-6.
- Plucknett D.L., Cohen J.I. (1989), *Future role of the IARCs in the application of biotechnology in developing countries*, Commissioned Paper no. 20 for the World Bank-ISNAR-AIDAB-ACIAR Study, Mimeo. 25 p. + 2 appendices.
- Ream L.W., Gordon M.P. (1982), "Crown gall disease and prospects for genetic manipulation of plants.", *Science*, **218** (4575) : 854-9.
- Rhiss A., Poulain C., Beauchesne G. (1979), "La culture *in vitro* appliquée à la multiplication végétative du palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.).", *Fruits*, **34** (9) : 551-4.
- Roberts L. (1988), "Genetic engineers build a better tomato.", *Science* (Washington, D.C.), 241 (4871) : 1290.
- Robertson A.I., Sakina K.E. (1989), "A slice of reality from Africa.", *Trends in Biotechnology* (TIBTECH, Elsevier Science Publishers, Cambridge, UK), **7** (1) : 14-5.
- Saleil V. (1986), *Développement in vitro des apex isolés à partir de deux espèces d'ignames : Dioscorea alata et D. trifida*, thèse de doctorat es-sciences, Université des sciences et techniques du Languedoc (USTL), Montpellier.
- Sasson A. (1988), *Biotechnologies and development*, Paris, Unesco/CTA (Technical Centre for Agricultural and Rural Co-operation, Ede-Wageningen, Netherlands), 361 p.
- Sasson A. (1990), *Feeding tomorrow's world*, Paris, Unesco/CTA (Technical Centre for Agricultural and Rural Co-operation, Ede-Wageningen, Netherlands), 805 p.
- Sasson A., Costarini V. (eds.) (1990), *Plant Biotechnologies for Developing Countries*, Proceedings of an International Symposium organized by CTA and FAO, 26-30 June 1989, Luxembourg, 368 p.
- Semal J., Lepoivre P. (1992), "Biotechnologies et agriculture : impact et perspectives", *Cahiers Agricultures*, **1** : 153-162.
- Sorj B., Wilkinson J. (1990), *Biotechnology and developing country agriculture : maize in Brazil*, Technical Paper n° 17, OECD Development Centre, Paris, 68 p.
- Sundquist W.B. (1989), *Emerging maize biotechnologies and their potential impact*. Technical Paper no. 8, OECD Development Centre, Paris, 29 p.
- Tuyen N.T.T., Duatin F.M.Y., Torre M. (1988), "Tissue culture propagation of taro and food yam.", in *Abstracts of Papers First National Symposium on Plant Tissue Culture in Phil. Agric. and Forestry*, 26-28 May 1988, Los Baños College of Agriculture, Laguna, Phil.
- Vayda M.E., Park W.D. (eds.) (1990), *The molecular and cellular biology of the potato*, Biotechnology in Agriculture Series, n° 3. C.A.B. International, Oxon, RU, 260 p.
- Vidalie H. (ed.) (1983), *La culture in vitro et ses applications horticoles*, Tec et Doc, Lavoisier, Paris, 152 p.
- Yang M.S., Espinoza N.O., Nagpala P.G., Dodds J.H., White F.F., Schnoor K.L., Jaynes J.M. (1988), "Expression of a synthetic gene for improved protein quality in transformed potato plants.", *Plant Science*, **64** : 2724-2736.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Tayeb Ameziane El Hassani
Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc

L'élaboration d'un ouvrage collectif est toujours difficile à réaliser car il faut concilier la liberté pour chaque auteur de traiter sa matière comme il l'entend, en tant que spécialiste, et la cohérence de l'ouvrage et ses qualités pédagogiques. Une conclusion générale pour *Agronomie moderne* est encore plus difficile étant donné son ambition de vouloir réunir en un seul manuel à la fois les bases physiologiques et agronomiques de la production végétale.

Globalement, l'ensemble de l'ouvrage fournit les concepts fondamentaux pour comprendre les mécanismes physiologiques de l'élaboration du rendement, et les bases agronomiques permettant le raisonnement de la conduite technique des cultures. Les éléments nécessaires à l'analyse des liaisons entre le système de culture, le système de production et le système agraire sont également présentés. La dernière partie de l'ouvrage met en lumière la dimension environnementale de l'activité agricole et examine l'apport actuel des biotechnologies pour le développement de l'agriculture ainsi que ses perspectives d'avenir.

Dans cet ouvrage, l'agronomie est perçue comme étant fondamentalement "l'étude des relations entre un couvert végétal cultivé et les conditions de son environnement résultant des états du milieu physique (sol, climat) et biologique (flore, faune, parasites) transformées par les techniques en vue d'établir les lois de fonctionnement de ce couvert". De ce point de vue, la connaissance des rayonnements solaires est importante pour comprendre le fonctionnement des cultures car ces rayonnements vont être utilisés pour la photosynthèse, jouer un rôle important dans la régulation de la croissance et du développement et apporter une grande part de l'énergie qui conditionne l'équilibre thermique des différentes composantes de la culture. L'environnement radiatif et thermique du couvert influence également les échanges d'énergie, de matière et de chaleur au sein du système sol-plante-atmosphère.

La connaissance des mécanismes qui régissent l'écoulement de l'eau dans la plante, l'acquisition de carbone par photosynthèse et sa perte par respiration et sénescence, le compromis photosynthèse-respiration et photosynthèse-transpiration, la translocation des assimilats et leur répartition dans les différents organes de la plante ainsi que la dynamique des éléments nutritifs dans le sol, est indispensable dans la formation de l'ingénieur agronome de nos jours.

Un exemple très illustratif est l'étude de la dynamique de l'azote. Elle souligne le fait que la rationalisation de la pratique de la fertilisation nécessite la connaissance approfondie des mécanismes mis en jeu dans la fourniture ou la libération des éléments nutritifs par le sol et leur prélèvement par les racines.

Traiter de la fixation biologique de l'azote dans cet ouvrage se justifie à un double titre. D'abord la fixation biologique constitue la source majeure de l'introduction de l'azote dans l'écosystème, qu'il s'agisse des couverts végétaux cultivés ou des formations arbustives et forestières. Ensuite de grands espoirs sont portés sur la fixation symbiotique et asymbiotique de l'azote comme moyen d'améliorer la fertilité des sols et de satisfaire les besoins en azote des cultures, particulièrement dans les régions du monde où l'apport des engrais est limité pour des raisons agronomique, économique ou environnementale.

Le raisonnement des autres techniques culturales, travail du sol, contrôle des mauvaises herbes et du parasitisme, irrigation, etc., doit être également basé sur les connaissances fondamentales présentées et longuement discutées dans la deuxième partie de l'ouvrage. L'agronome fera ensuite la synthèse et l'intégration dans l'étude des systèmes de culture.

Les systèmes de culture ne sont qu'un niveau de l'échelle d'organisation d'une agriculture et il est souvent nécessaire de se pencher sur les autres niveaux. Le concept de système de culture est un outil qui permet de mieux comprendre le fonctionnement d'une culture à l'échelle de la parcelle, d'analyser des situations agricoles et d'émettre des diagnostics pour guider l'action. Il existe plusieurs critères pour évaluer l'efficacité des systèmes de culture, depuis la productivité physique des facteurs de production jusqu'au maintien de la fertilité du milieu et de la sécurité alimentaire. L'analyse des systèmes de culture par les agronomes permet de proposer des améliorations réalistes des systèmes de production et d'éviter des erreurs coûteuses en matière de développement rural et de préservation de l'environnement.

Enfin, l'idée d'inclure dans cet ouvrage le chapitre relatif à la création variétale et celui traitant de la conservation des denrées est de rappeler à l'agronome que, sans être généticien ou améliorateur de plantes ni ingénieur des technologies post-récolte, il doit savoir communiquer avec les spécialistes amont et aval de la science agronomique, étant donné le caractère synthétique de cette discipline.

La prospérité de l'agriculture dépend étroitement de l'existence d'agronomes formés, en situation d'observer et d'agir pour maîtriser les processus et corriger les techniques susceptibles d'améliorer la productivité agricole tout en préservant la qualité de l'environnement.



La collection **Universités francophones**, créée en 1988 à l'initiative de l'UREF, propose des ouvrages modernes répondant aux besoins des étudiants de deuxième et troisième cycle universitaire ainsi qu'aux chercheurs francophones, et se compose de titres originaux paraissant régulièrement.

Leurs auteurs appartiennent conjointement aux pays du Sud et du Nord et rendent compte des résultats de recherches et des études récentes entreprises en français à travers le monde. Ils permettent à cette collection pluridisciplinaire de couvrir progressivement l'ensemble des enseignements universitaires en français.

Enfin, la vente des ouvrages destinés aux pays du Sud, à un prix préférentiel, tient compte des exigences économiques nationales et assure une diffusion adaptée aux pays francophones.

Ainsi, la collection **Universités francophones** constitue une bibliothèque de référence comprenant des ouvrages universitaires répondant aux besoins des étudiants, des enseignants et des chercheurs de langue française.

Agronomie moderne fournit les bases physiologiques pour comprendre les mécanismes fondamentaux de l'élaboration du rendement, et les bases agronomiques permettant le raisonnement de la conduite technique des cultures. Les éléments nécessaires à l'analyse des liaisons entre le système de culture, le système de production et le système agraire sont également présentés. La dernière partie de l'ouvrage met en lumière la dimension environnementale de l'activité agricole ; elle examine l'apport actuel des biotechnologies pour le développement de l'agriculture ainsi que ses perspectives d'avenir.

La majorité des 22 chapitres qui composent les 5 parties de l'ouvrage sont abondamment illustrés par des schémas et figures et appuyés par des analyses quantitatives facilitant la compréhension générale du texte par des étudiants de 2^e cycle universitaire et du cycle d'agronomie générale des facultés, des grandes écoles et des instituts d'enseignement supérieur agronomique. Chaque chapitre est également enrichi par une bibliographie sélective comprenant des références classiques et récentes, permettant au lecteur l'acquisition de plus amples connaissances sur le sujet traité. La spécialisation de certains textes rend les chapitres correspondants aussi utiles aux étudiants avancés de 3^e cycle, aux enseignants-chercheurs, aux agronomes praticiens, aux physiologistes et aux améliorateurs des plantes, soucieux de suivre l'évolution de l'agronomie moderne.

Il s'agit là d'une référence nouvelle qui tient compte des progrès récents de la bioclimatologie, de la physiologie végétale, de l'agronomie et de la biotechnologie.

Prix France : 250 FF • Prix Canada : 62 \$ CAD • Prix préférentiel UREF (Afrique, Asie, Amérique latine, Moyen-Orient, Haïti) : 60 FF



I.S.S.N. 0993-3948

Diffusion Hachette D.I. ou ELLIPSES selon pays 59.4647.0
Distribution Canada D.P.L.U.