

Synthèses

Comprendre l'amélioration des plantes

Enjeux, méthodes, objectifs
et critères de sélection

André Gallais



éditions
Quæ

Comprendre l'amélioration des plantes

Enjeux, méthodes, objectifs
et critères de sélection

Comprendre l'amélioration des plantes

Enjeux, méthodes, objectifs
et critères de sélection

André Gallais

Éditions Quæ
c/o Inra, RD 10, 78026 Versailles Cedex

Collection Synthèses

Restaurer la nature pour atténuer les impacts du développement
Analyse des mesures compensatoires pour la biodiversité
H. Levrel, N. Frascaria-Lacoste, J. Hay, G. Martin, S. Pioch
2015, 320 p.

La reproduction animale et humaine
M. Saint-Dizier, S. Chastant-Maillard, coord.
2014, 752 p.

Une ville verte
Les rôles du végétal en ville
M. Musy, coord.
2014, 200 p.

Ingénierie écologique
Action par et/ou pour le vivant ?
F. Rey, F. Gosselin, A. Doré, coord.
2014, 174 p.

Plancton marin et pesticides : quels liens ?
G. Arzul, F. Quiniou, coord.
2014, 124 p.

Éditions Quæ
RD 10
78026 Versailles Cedex, France
www.quae.com

© Éditions Quæ, 2015

ISBN 978-2-7592-2347-3

ISSN 1777-4624

Le Code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction, même partielle, du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

Table des matières

Avant-propos	1
---------------------------	----------

Remerciements	4
----------------------------	----------

PREMIÈRE PARTIE. QU'EST-CE QUE L'AMÉLIORATION DES PLANTES ?

1. Pourquoi améliorer les plantes ?.....	7
---	----------

Différentes contributions de l'amélioration des plantes	8
---	---

Impact du changement climatique sur l'agriculture et sur les objectifs de sélection.....	15
---	----

Effet du changement de contexte économique	16
--	----

Conclusion : le rendement n'est pas le seul but de la sélection	17
---	----

2. Qu'est-ce qu'une variété en amélioration des plantes ?.....	19
---	-----------

Différents types de variétés.....	19
-----------------------------------	----

Pourquoi une réglementation sur les semences et les variétés ?	24
--	----

Pourquoi des variétés homogènes ?	28
---	----

3. Aspects socio-économiques et organisation de la sélection	35
---	-----------

Cadre général	35
---------------------	----

Acteurs de la filière Semences et plants	39
--	----

Quelle organisation de la sélection selon les types d'agricultures ?	48
--	----

DEUXIÈME PARTIE. MÉTHODES ET OUTILS DE L'AMÉLIORATION DES PLANTES

4. Quels sont les outils de l'amélioration des plantes ?	63
---	-----------

Évaluation phénotypique et sélection	64
--	----

Reproduction en croisement ou en consanguinité.....	65
---	----

Manipulation globale des génomes	69
--	----

Substitution d'allèles et transfert de gènes	73
--	----

Mutagénèse.....	83
-----------------	----

Marqueurs moléculaires et sélection assistée par marqueurs.....	85
---	----

5. Comment crée-t-on une variété ?	95
Bases de la sélection créatrice.....	95
Amélioration des populations chez les plantes allogames	98
Sélection généalogique et développement de lignées pures	102
Développement de variétés hybrides entre lignées pures	105
Création de variétés en sélection participative	108

TROISIÈME PARTIE. OBJECTIFS ET CRITÈRES DE SÉLECTION

6. L'amélioration des plantes permet de nourrir la planète	113
Sélection directe sur le rendement	114
Utilisation de caractères liés au rendement	116
Sélection pour la régularité du rendement	126
Apport des variétés hybrides.....	127
Sélection pour l'aptitude à l'association de géotypes	127
Limite dans la progression des rendements.	
Notion de rendement potentiel	129
Apport des nouveaux outils.....	130
Conclusions.....	132
7. L'amélioration des plantes permet des économies de pesticides	133
Sélection de variétés résistantes aux maladies	133
Sélection pour la résistance aux insectes et aux nématodes.....	142
8. L'amélioration des plantes contribue à des économies d'eau et d'engrais azotés	147
Sélection de variétés tolérantes à la sécheresse	147
Sélection de variétés valorisant bien l'azote	159
9. L'amélioration des plantes contribue à améliorer la qualité des produits.....	171
Qualité nutritionnelle	171
Qualité technologique ou industrielle.....	180
Qualité des fruits et des légumes.....	185
Qualité sanitaire	188
Les variétés modernes sont-elles de plus mauvaise qualité ?	190
10. Quelles espèces et quelles variétés pour la diversité des agricultures ?	191
Quelles espèces de grande culture pour des systèmes économes en intrants ?	191
Quelles variétés pour des agricultures économes en intrants ?	192
Contribution de l'amélioration génétique à la diversité des agricultures....	197

EN GUISE DE CONCLUSION

11. Quel bilan peut-on faire de l'amélioration des plantes ?.....	201
Les plantes améliorées sont toujours naturelles	201
Les variétés actuelles de plantes de grande culture sont plus rustiques	203
Les plantes transgéniques peuvent apporter beaucoup à une agriculture durable	207
L'amélioration des plantes a répondu, et répond, à une demande.....	207
Depuis 50 ans, la diversité génétique des variétés à la disposition de l'agriculteur est conservée.....	208

ANNEXE

Quelques notions de génétique et d'amélioration des plantes pour mieux comprendre	213
Notions de génétique	213
Notions de génétique quantitative.....	216
Références bibliographiques.....	219
Glossaire	226
Abréviations.....	231

Avant-propos

Le but de l'agriculture d'aujourd'hui est de produire suffisamment, en quantité et en qualité, pour mieux nourrir les hommes, en utilisant le minimum d'intrants (engrais, pesticides, eau) et en respectant au mieux l'environnement, tout en permettant à l'agriculteur de vivre de son activité. Les populations non améliorées des plantes cultivées ne répondent pas à ces exigences car en général elles ne permettent qu'une assez faible production, sont mal adaptées aux conditions de culture, peuvent être sensibles aux maladies, et n'ont pas les qualités requises pour les diverses utilisations des produits des récoltes. Le but de l'amélioration génétique des plantes est alors de corriger ces défauts.

L'amélioration génétique des plantes peut donc être définie comme la science et l'art de la création de nouvelles populations, appelées variétés, répondant de mieux en mieux aux besoins de l'homme, y compris au respect de l'environnement. D'un point de vue génétique, il s'agit de réunir dans une même plante ou dans un groupe de plantes, constituant la variété, le maximum de gènes favorables pour les caractères recherchés. Cela se réalise par la combinaison des systèmes de reproduction sexuée (autofécondation et croisement), de la sélection des meilleures¹ plantes et, aujourd'hui, des biotechnologies. En amélioration des plantes, une variété est une population de plantes développée par le sélectionneur, ayant des caractéristiques bien définies, apportant un progrès sur certains caractères, et reproductible.

L'amélioration génétique des plantes a commencé avec leur domestication, forme de sélection à la fois naturelle et humaine, plus ou moins consciente, qui a adapté les plantes sauvages à leur culture et les a rendues dépendantes de l'homme. Cette forme de sélection s'est poursuivie jusqu'au milieu du XIX^e siècle. À partir du début du XX^e siècle, la découverte des bases et des lois de la génétique a ouvert l'ère de la sélection dirigée vers des objectifs précis, avec de véritables méthodes d'amélioration génétique. Aujourd'hui, les outils issus des biotechnologies permettent d'augmenter l'efficacité de ces méthodes grâce à une meilleure utilisation de la variabilité génétique, avec souvent un gain de temps dans la création de la variété.

Un programme d'amélioration des plantes doit donc réunir simultanément trois types d'éléments. D'abord, il faut choisir le matériel de départ qui sera soumis au processus d'amélioration. De la variabilité génétique ainsi réunie dépendront en partie les progrès qui pourront être réalisés, puisque l'amélioration des plantes ré-associe les allèles² présents aux différents locus dans les ressources génétiques

1. Celles supposées, après évaluation, être porteuses des gènes favorables pour les caractères recherchés.

2. Un allèle est une des différentes versions possibles d'un même gène à un locus (voir annexe).

et sélectionne parmi les nouvelles associations obtenues. Cette variabilité génétique peut toutefois être accrue par l'utilisation de certains outils comme la mutagenèse et la transgénèse. Ensuite, il faut avoir défini les objectifs de sélection, les caractères à améliorer et les critères retenus pour les évaluer. Enfin, il faut des outils et des méthodes pour utiliser la variabilité génétique en vue de répondre aux objectifs fixés.

Dans cet ouvrage, nous présentons d'abord, dans une première partie, le cadre général de l'amélioration des plantes, sa justification, son organisation et son importance économique. Quels sont les facteurs qui ont conduit à l'organisation actuelle de la filière Semences et plants en France, organisation qui se retrouve dans de nombreux pays du monde disposant d'une agriculture assez développée ? Cette organisation est-elle dépendante des types d'agricultures ? Quelle peut être la place de la sélection dite participative, essentiellement conduite par les agriculteurs ?

Puis, dans une deuxième partie consacrée aux méthodes et outils à la disposition du sélectionneur, nous voulons montrer comment l'amélioration des plantes modifie les informations génétiques qu'elles portent, pour créer des variétés plus productives et mieux adaptées au milieu et à la demande de l'homme (agriculteur, consommateur ou industriel) ou de la société (pour protéger l'environnement, notamment). Nous présentons donc de façon assez concise les différents types d'outils à la disposition du sélectionneur et leur mise en œuvre dans les méthodes de sélection et de création de variétés³.

Dans une troisième partie, plus substantielle, nous développons les principaux objectifs de sélection et montrons comment, en sélectionnant sur certains critères, on peut les atteindre. Sont plus particulièrement considérés le rendement en grain ou le rendement en biomasse d'une autre partie de la plante, l'adaptation au milieu, et notamment la résistance aux maladies et aux insectes, la valorisation de la fumure azotée, l'économie de l'eau et enfin les problèmes de qualité propres à chaque espèce (qualité du blé pour la boulangerie, qualité des orges brassicoles, qualité des huiles de colza, qualité des fruits et légumes...). Nous considérons aussi les demandes particulières de certains types d'agricultures à faibles niveaux d'intrants, comme l'agriculture biologique.

En guise de conclusion à cet ouvrage nous présentons un bilan de l'amélioration des plantes tant au niveau de l'efficacité des outils mis en œuvre que de l'amélioration de différents types de caractères.

Nous pensons ainsi répondre à de nombreuses questions que la société pose sur l'amélioration des plantes, ses enjeux socio-économiques, l'organisation de la filière Semences et plants, les méthodes, les outils et les objectifs d'amélioration.

À une époque où certains agronomes ou associations remettent en cause l'intérêt de l'amélioration des plantes, l'accusant d'être contre nature, car faisant appel aux biotechnologies, et la rendant même responsable de l'intensification de l'agriculture

3. Cette présentation est faite de façon simplifiée et résumée. Le lecteur qui voudrait approfondir plus pourra se référer à nos derniers ouvrages, *Méthodes de création de variétés en amélioration des plantes* (Gallais, 2011) et *De la domestication à la transgénèse. Évolution des outils pour l'amélioration des plantes* (Gallais, 2013a).

et de ses coûts environnementaux, l'ouvrage veut rappeler ou montrer deux points essentiels :

- depuis la domestication, l'amélioration des plantes a toujours été du génie génétique ; avec les outils actuels, elle devient seulement de plus en plus dirigée ;
- elle a répondu et continue à répondre aux demandes de la société, de l'agriculteur jusqu'au consommateur, en passant par le transformateur ; elle a déjà beaucoup apporté et peut encore beaucoup apporter, en particulier pour le développement d'une agriculture durable.

Dans tout l'ouvrage, l'expression « amélioration des plantes » est utilisée, bien qu'évidemment il ne s'agisse pas d'une amélioration dans l'absolu, mais toujours pour des caractères et des conditions de culture donnés. C'est l'équivalent en anglais de *plant improvement*, mais en anglais il y a aussi, plus couramment, *plant breeding*, comme il y a *animal breeding* ; de même en allemand il y a *Pflanzenzüchtung*, qui ne se traduit pas par amélioration des plantes. *Breeding* en anglais, ou *Züchtung* en allemand, n'ont en effet pas le sens direct d'amélioration, mais plutôt d'élevage, ce qui est peut-être moins ambigu, car cela fait appel à la fois à la génétique des organismes et aux conditions environnementales de leur développement. La langue française, comme celle d'autres pays latins (Italie, Espagne), n'a pas intégré ce sens, bien que l'on parle d'élevage des plants, chez un pépiniériste.

Cet ouvrage est volontairement rédigé en termes assez simples, pour être accessible à un large public : aux étudiants en biologie, à tous les professionnels de la filière des semences et de l'amélioration des plantes, aux jeunes chercheurs et enseignants en agronomie, physiologie végétale, santé des plantes, génétique et amélioration des plantes, et à toute personne ayant un minimum de connaissances en biologie et se posant des questions sur le pourquoi et le comment de l'amélioration des plantes et sur les grands enjeux en cause.

Remerciements

J'exprime d'abord toute ma gratitude à Henri Feyt, qui a bien voulu accepter la lourde tâche de relire avec beaucoup d'attention l'ensemble du texte et m'a apporté des commentaires très précieux sur le fond et la forme.

Tous mes remerciements vont aussi aux différents spécialistes des sujets abordés dans les première et troisième parties, qui ont bien voulu relire les développements relevant de leurs compétences et me faire part de remarques ou compléments qui m'ont été très utiles :

- Philippe Gracien et Philippe Silhol, pour la filière Semences et plants ;
- Bernard Le Buanec, pour l'agriculture biologique ;
- Gilles Trouche, pour la sélection participative ;
- Marie-Hélène Jeuffroy, pour l'amélioration du rendement ;
- Claude Pope de Valavieille et Valérie Geffroy, pour la résistance aux maladies, et Hervé Lecoq, plus spécifiquement pour les résistances transgéniques aux virus ;
- Antoine Dedryver et Bernard Mauchamp, pour la résistance aux insectes ;
- Jean-Louis Prioul et Michel Zivy, pour la tolérance à la sécheresse ;
- Jacques Le Gouis, pour l'amélioration de la valorisation de l'azote chez le blé tendre ;
- Michel Renard et Gérard Pascal, pour la qualité des huiles ;
- Gérard Branlard et Michel Rousset, pour la qualité boulangère du blé tendre ;
- Louis Jestin, pour la qualité brassicole de l'orge ;
- Mathilde Causse, pour la qualité des fruits et légumes, en particulier de la tomate.

Bien sûr, si malgré ces relectures, il reste quelques erreurs, j'en assume l'entière responsabilité.

Je tiens encore à remercier Jean-François Morot-Gaudry pour ses réponses à mes questions sur la photosynthèse, Maryse Brancourt pour la figure 8.2, Hervé Escriou pour la figure 11.3, Jacques Le Gouis pour la figure 10.1, François-Xavier Oury pour la figure 11.2, Bernard Saugier pour le calcul du rendement potentiel présenté dans l'encadré 6.2 et ses réponses à mes questions, et Maxime Trottet pour des informations sur l'amélioration de la résistance aux maladies du blé tendre.

Enfin, j'exprime toute ma reconnaissance à Paule Lacroix qui, au nom des éditions Quæ, a fait bien plus que corriger le texte sur la forme en m'apportant des réflexions et des références sur le fond de certaines questions, qui m'ont été très utiles.

Première partie

Qu'est-ce que l'amélioration
des plantes ?

Chapitre 1

Pourquoi améliorer les plantes ?

L'homme a commencé à cultiver les plantes il y a 10 000 ans environ. Suite à de profonds changements climatiques qui ont eu lieu à cette époque, parce que ses activités de cueillette, chasse et pêche n'étaient plus suffisantes pour le nourrir, il est passé de l'état nomade à l'état sédentaire, et a commencé à récolter les produits issus des plantes qu'il avait semées. Pour les espèces choisies, l'alternance du semis et de la récolte pendant de nombreux cycles a alors entraîné leur adaptation à la culture (Gallais, 2013a). C'est ce que l'on appelle la domestication des plantes. Elle constitue une sélection, à la fois par les conditions de culture, par les conditions de récolte et par les choix de l'homme qui a retenu et ressemé les plantes les plus adaptées à ses goûts et ses besoins. C'est bien la première forme de sélection opérée par l'homme pour mieux se nourrir, même si elle n'était pas toujours consciente.

Depuis cette période, le but de l'agriculture a toujours été de produire suffisamment, tant sur le plan quantitatif que sur le plan qualitatif, afin de mieux nourrir l'homme. Dans les pays à agriculture développée, celle-ci s'est intensifiée après la deuxième guerre mondiale grâce à l'utilisation d'engrais azotés de synthèse, au développement de la mécanisation et au recours aux fongicides, insecticides et désherbants. En France, en particulier, cette intensification a été encouragée par la politique agricole, car il fallait assurer notre autosuffisance alimentaire. Nous verrons que l'objectif a été parfaitement atteint et que la France est même devenue exportatrice de productions agricoles. Cependant, cette intensification a eu un coût environnemental. Aujourd'hui, le but de l'agriculture est aussi de limiter les intrants (engrais, pesticides, eau) afin de mieux respecter l'environnement.

Le problème est que les populations végétales naturelles, ou celles résultant de la domestication, ne permettent pas de répondre à toutes ces exigences. L'amélioration génétique des plantes vise alors au développement de populations, appelées variétés, qui soient, selon les espèces et les situations, plus productives, plus résistantes aux maladies et aux insectes, valorisent mieux l'eau et l'azote, soient mieux adaptées aux milieux de culture ou conditions d'utilisation (incluant la mécanisation) et possèdent de meilleures qualités (nutritionnelle, technologique...). Il s'agit de réunir dans une même variété le maximum de caractères, et donc de gènes, favorables pour les objectifs recherchés.

► Différentes contributions de l'amélioration des plantes

Augmentation de la disponibilité alimentaire

L'agriculture doit être suffisamment productive afin de nourrir la population de la planète, qui ne cesse de croître. Globalement, au niveau mondial, la production agricole a heureusement augmenté un peu plus vite que le nombre de personnes à nourrir. Ainsi, selon les données de la FAO⁴, essentiellement grâce à l'augmentation des rendements, la production en calories disponibles pour l'alimentation humaine a été multipliée par 3 entre 1961 et 2011 alors que la population de la planète a été multipliée par 2,3 (passant de 3,1 à 7 milliards) (figure 1.1). Pour les trois céréales majeures réunies (blé, riz, maïs) la production totale en calories a même été multipliée par 3,6 (mais il y a des usages non alimentaires de cette production). Il en est résulté une augmentation du nombre de calories par personne apportées par ces céréales, et une diminution de l'importance des famines. Cependant, cette augmentation a été insuffisante, car si le pourcentage de personnes sous-alimentées en énergie a diminué, en valeur absolue ce n'est pas aussi net ; dans les années 1960, il y avait de l'ordre d'un milliard de personnes sous-alimentées en énergie, et aujourd'hui on estime ce nombre à encore 850 millions, ce qui est une diminution assez faible. De plus, maintenant, il semble y avoir un ralentissement dans la progression du nombre de calories disponibles par personne.

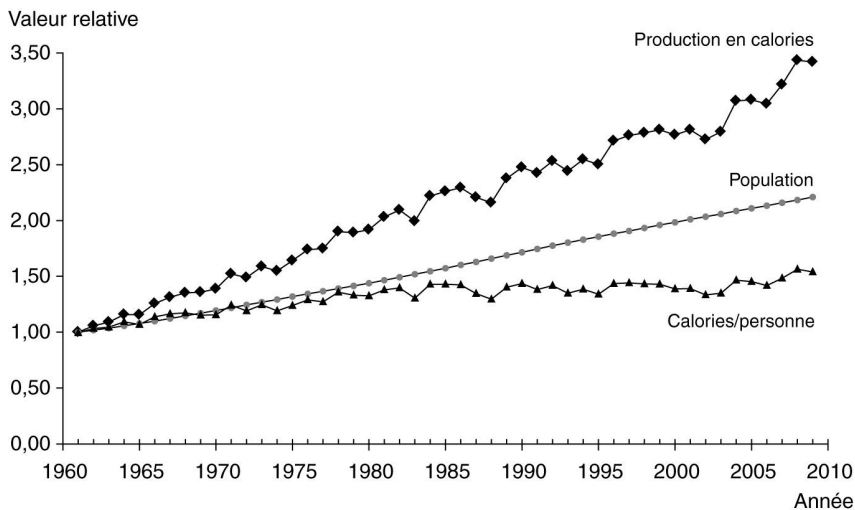


Figure 1.1. Pour l'ensemble des trois grandes céréales qui nourrissent le monde (blé, riz, maïs), évolution relative de la production en calories, comparée à l'évolution de la population mondiale.

Les courbes ont été établies d'après les données de la FAO (FAOstat) ; les valeurs des trois paramètres étudiés sont exprimées en proportion de leur valeur en 1961. Il ne s'agit pas de ce qui est disponible pour l'alimentation humaine, mais de la production totale de calories. Cela inclut donc aussi tous les usages autres, en particulier l'alimentation animale et maintenant les biocarburants.

4. Food and Agriculture Organization.

Pourtant, la population mondiale va encore fortement augmenter et passer de 7,2 milliards d'hommes en 2013 à 9,6 milliards en 2050. Pour satisfaire la demande de l'humanité, en tenant compte des changements des modes alimentaires (augmentation de la consommation de viande dans les pays qui n'en consomment que peu aujourd'hui), selon la FAO, il faut augmenter d'au moins 60 % la quantité des produits agricoles disponibles, entre 2005 et 2050⁵.

Compte tenu de l'abandon de terres agricoles pour perte de fertilité (érosion des sols, salinisation, sécheresse...), de l'aménagement des territoires et de la nécessité de préserver le plus possible les espaces naturels, tels que les forêts et les pâturages permanents, la FAO prévoit qu'entre 2005 et 2050 l'augmentation de la surface en terres arables, de suffisamment bonne qualité, sera limitée à environ 110 millions d'hectares (soit 7 % des surfaces cultivées dans les années 2005, ce qui est dans le prolongement de l'évolution passée) (Alexandratos et Bruinsma, 2012 ; Neveu, 2014). D'autres approches sont un peu plus optimistes et estiment que, hors les surfaces consacrées aux biocarburants, 350 à 400 millions d'hectares supplémentaires (20 à 25 % des surfaces cultivées actuelles) pourraient être cultivés (Paillard *et al.*, 2011). On reste encore assez loin des 930 millions d'hectares qui seraient nécessaires, en supposant qu'il n'y ait pas d'augmentation des rendements, pas de diminution des pertes de production, pas de changement des modes de consommation et pas d'augmentation de la disponibilité en calories par personne, qui pourtant est actuellement insuffisante.

De plus, ces raisonnements ne tiennent pas compte des conséquences du changement climatique, qui risque d'accélérer l'abandon de certaines surfaces ; cependant, celui-ci pourrait être plus ou moins compensé par la mise en culture de nouvelles surfaces. Enfin, ne sont évidemment pas considérés les facteurs géopolitiques, l'absence ou la défaillance des politiques agricoles dans les pays qui ont le plus besoin d'augmenter leur production, qui peuvent encore aggraver la situation.

Puisque la superficie cultivée semble ne pas pouvoir être augmentée de façon assez significative, une augmentation de 60 % de la disponibilité alimentaire passe donc par deux grandes voies complémentaires : d'une part, la limitation des pertes de production et des pertes post-récolte et, d'autre part, l'augmentation de la production par unité de surface cultivée.

Réduction des pertes de production

D'abord, il faut réduire fortement les pertes de production après la récolte ainsi que le gaspillage à la consommation, l'ensemble étant estimé à environ 30 % de la quantité récoltée. Ces pertes peuvent être diminuées, surtout celles survenant au cours du stockage dans les pays en développement, mais la solution ne relève guère de l'amélioration des plantes. Le gaspillage alimentaire dans les pays développés peut sans doute être réduit. L'amélioration des plantes peut y contribuer, et y contribue, par exemple grâce à des variétés de légumes-feuilles ou de légumes-racines dont la

5. La FAO avait d'abord annoncé un chiffre de 70 % puis a revu son calcul (Alexandratos et Bruinsma, 2012). Ses estimations supposent toutefois que la quantité de produits agricoles utilisés pour la production de biocarburants reste stable entre 2020 et 2050, ce qui n'est pas certain.

partie consommée est plus saine, des variétés de pomme de terre dont le tubercule est sain et ne noircit pas à la cuisson, des variétés produisant des fruits sans traces de maladies (ni dégâts d'insectes) et se conservant bien (p. 171), mais cette réduction relève avant tout d'un changement dans notre mode de vie.

Il y a aussi les pertes de potentiel de production dues aux agresseurs des cultures (insectes, maladies, adventices), qui en moyenne atteignent environ 45 %. La seule suppression de ces pertes de potentiel et des autres pertes évoquées ci-dessus résoudrait pratiquement le problème de la disponibilité alimentaire. La lutte contre les insectes et les maladies, qui provoquent environ 30 % des pertes de potentiel de production, peut relever de l'utilisation de pesticides, mais cela induit un risque de pollutions environnementales et pose le problème de l'accès à ces produits dans les pays en développement. Les pratiques culturales, en particulier les rotations, voire les associations d'espèces, peuvent contribuer à limiter les dégâts des agresseurs des cultures. Mais il y aura toujours des risques importants de dégâts dus aux insectes dans les zones favorables à leur développement, en particulier dans les zones tropicales ou intertropicales. La protection la plus sûre et la meilleure pour une agriculture durable est la résistance, ou la tolérance, d'origine génétique qui peut être apportée par l'amélioration des plantes.

Les accidents climatiques, tout comme les agresseurs des cultures, peuvent être aussi à l'origine de pertes de rendement ainsi qu'à des variations importantes de production d'une année à l'autre. Il faut donc des variétés adaptées aux basses températures, pour éviter les dégâts dus au froid mais aussi pour avoir une croissance suffisante à température fraîche, et également des variétés adaptées aux hautes températures et à la sécheresse. En France et ailleurs en Europe, ces caractères ont été améliorés chez de nombreuses plantes cultivées. Globalement, les variétés modernes sont mieux adaptées au milieu physique et à ses variations. Ainsi, grâce à une adaptation aux basses températures, la culture du maïs, plante d'origine tropicale, a pu se développer au nord de la Loire à partir des années 1955-1960. Quelles que soient les espèces de grande culture, on peut dire que les variétés modernes sont plus rustiques, c'est-à-dire mieux adaptées à des conditions défavorables (p. 203). Aujourd'hui, à cause du réchauffement climatique, il faut développer des variétés qui soient encore mieux adaptées au risque de températures élevées et plus tolérantes au stress hydrique (p. 147).

Augmentation du potentiel de production

L'augmentation de la disponibilité alimentaire doit aussi passer par une augmentation de la production par unité de surface. Elle peut être atteinte de deux façons complémentaires : par le développement de techniques culturales impliquant l'utilisation optimale des intrants, mais aussi par l'augmentation du potentiel génétique de production, qui correspond en fait à l'augmentation de l'efficacité d'utilisation des intrants par la plante. Cette augmentation du potentiel de production sera un élément favorable, même s'il y a des dégâts dus aux insectes, aux maladies ou à des accidents climatiques. Selon la FAO, au moins 80 % de l'augmentation de la disponibilité alimentaire nécessaire entre les années 2000 et 2050 devront venir, comme cela a déjà été le cas par le passé, de l'accroissement des rendements, par la combinaison