

Yvette Dattée
Georges Pelletier,
coordinateurs

Pourrons-nous vivre sans OGM



60
clés pour
comprendre les
biotechnologies
végétales

éditions
Quæ

Pourrons-nous vivre sans OGM ?

60 clés pour comprendre les biotechnologies végétales

Dans la même collection

Mais que fait donc ce gendarme dans mon jardin ?

100 clés pour comprendre les petites bêtes du jardin
Patrice Leraut, 2014, 160 p.

Une mer propre, mission impossible ?

70 clés pour comprendre les déchets en mer
François Galgani, Isabelle Poitou, Laurent Colasse, 2013, 176 p.

Les chauves-souris ont-elles peur de la lumière ?

100 clés pour comprendre les chauves-souris
François Prud'homme, 2013, 208 p.

Les oiseaux ont-ils du flair ?

160 clés pour comprendre les oiseaux
Luc et Muriel Chazel, 2013, 240 p.

Le jardin suit-il des modes ?

90 clés pour comprendre les jardins
Yves-Marie Allain, 2013, 136 p.

Le sel pousse-t-il au soleil ?

120 clés pour comprendre le sel
Pierre Laszlo, 2012, 128 p.

Un crapaud peut-il détecter un séisme ?

90 clés pour comprendre les séismes et tsunamis
Louis Géli, Hélène Géli, 2012, 176 p.

Le tout bio est-il possible ?

90 clés pour comprendre l'agriculture biologique
Bernard Le Buanec coord., 2012, 240 p.

Éditions Quæ

RD 10

78026 Versailles Cedex, France

© Éditions Quæ, 2014

ISBN : 978-2-7592-2059-5

ISSN : 2261-3188

Yvette Dattée
Georges Pelletier,
coordinateurs

Pourrons-
nous vivre
sans
OGM



60
clés pour
comprendre les
biotechnologies
végétales

Remerciements

Pour rédiger cet ouvrage, nous avons fait appel à de nombreux spécialistes, souvent membres de l'AFBV (Association française des biotechnologies végétales) et nous tenons à tous les remercier de leur collaboration.

Nos remerciements vont tout particulièrement à André Gallais (AgroParistech) pour sa contribution importante au chapitre 1 et au glossaire, Gérard Pascal (Inra) et Francine Casse (Université de Montpellier) pour leurs contributions respectives aux chapitres 4 et 7.

Marc Delos (ministère de l'Agriculture), Philippe Joudrier (Inra), Bernard Mauchamp (Inra), Alexis Thomann (CNRS) ont enrichi les chapitres 3, 4, 6, 7 et 8 de leurs réflexions.

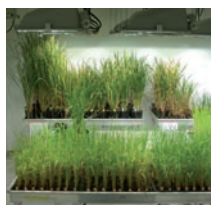
Nous remercions également Bernard Bachelier (Cirad), François Burgaud (GNIS), Alain Cadic (Inra), Michel Caboche (Inra), Michel Delseny (CNRS), Alain Deshayes (Inra), François Desprez (Ets Desprez), Pierre Devaux (Ets Desprez), Marc Fuchs (Université de Cornell), Philippe Gracien (GNIS), Louis-Marie Houdebine (Inra), Lise Jouanin (CNRS), Gérard Kafadaroff (ingénieur agronome), Catherine Pannetier (Cirad), Evelyne Téoulé (Université Pierre et Marie Curie), Claude Tabel (RAGT), Alain Toppan (Biogemma) pour leurs contributions aux réponses des chapitres 2, 3, 4, 6 et 8.

Les illustrations nous ont été fournies par la photothèque de l'Inra, Frédérique Angevin (Inra), Nathalie Augé (Geves), Marc-André D'Aoust (société Medicago Québec), Anne Grevet (ministère de l'Agriculture), Marc Fuchs (Université de Cornell), Delphine Guey (GNIS), Anne Kettaneh (AGPM), Daniel Lejeune (SNHF), Catherine Pannetier (Cirad) et nous les en remercions.

Table des matières



Introduction	7
L'amélioration des plantes cultivées	9
Les biotechnologies végétales	23
À quoi servent les biotechnologies végétales ?	45
PGM et effets sur l'environnement	69
Transgénèse et risques sanitaires	81
Droits et devoirs des acteurs	93
Réglementation et développement des PGM	109
Développement des biotechnologies végétales et recherche en Europe	119
Bibliographie	131
Glossaire	132
Liste des sigles	139
60 clés pour comprendre les biotechnologies végétales	140
Crédits iconographiques	143





Introduction



L'utilisation combinée de variétés sélectionnées, d'engrais (en particulier azotés), de l'irrigation, de la mécanisation des opérations culturales, de la protection sanitaire des cultures a permis des gains de productivité spectaculaires au cours des dernières décennies : en conservant les pratiques d'il y a soixante ans, il aurait fallu — pour atteindre le niveau actuel de production mondiale — mettre en culture quelque trois milliards d'hectares supplémentaires c'est-à-dire l'équivalent de la surface de l'Afrique. Malgré cela, dans de nombreuses parties du monde, les progrès n'ont pas permis de résorber la malnutrition. Alors qu'un humain sur trois était mal nourri il y a cinquante ans, c'est encore aujourd'hui un sur sept qui souffre de la faim, c'est-à-dire près d'un milliard de personnes, notamment en Asie et en Afrique subsaharienne. La population mondiale va continuer à croître. Une estimation moyenne prévoit 9 milliards d'habitants en 2050. L'agriculture devra produire suffisamment, en quantité et en qualité, en préservant les milieux naturels et cultivés par le strict ajustement des intrants agricoles à leur disponibilité et aux besoins des plantes. Les effets difficilement mesurables du changement climatique ajouteront d'autres contraintes aux cultures. La diminution régulière des terres agricoles sous l'effet de l'urbanisation, de l'érosion et de la salinisation (actuellement 5 millions d'hectares par an) ferait perdre le tiers des surfaces actuellement cultivées au cours du siècle.

Le défi est immense et aucun moyen d'augmentation de la productivité ne doit être négligé. Nous devons faire appel aux technologies disponibles et à celles qui verront le jour grâce aux progrès scientifiques. L'amélioration variétale fait partie

de ces outils et offre des moyens de créer des variétés adaptées à des conditions climatiques nouvelles, de réduire l'impact environnemental de l'agriculture en fournissant des plantes capables d'utiliser plus efficacement l'eau et les minéraux et de résister aux ravageurs et aux maladies.

L'amélioration génétique des plantes est la science et l'art de la création de variétés répondant de mieux en mieux aux besoins de l'homme dans le respect de l'environnement. Il s'agit en somme de réunir dans un même groupe de plantes, la variété, le maximum de gènes, dispersés dans les espèces et favorables pour l'objectif poursuivi. Cela se réalise par la mise en œuvre combinée des systèmes de reproduction, croisements et autofécondation, de la sélection des « meilleures¹ » plantes et, depuis une cinquantaine d'années, des biotechnologies.

L'esprit de ce livre est de répondre à de multiples questions sur les biotechnologies végétales et les plantes génétiquement modifiées. Ces questions en évoque immédiatement une autre plus générale : « suffit-il qu'une technologie existe, réellement ou potentiellement, pour qu'elle soit considérée comme positive et s'impose à la société ? » Autrement dit, quelle est la part des nécessités, des choix sociétaux, des considérations politiques dans le succès d'une technologie ?

Nous laisserons au lecteur que nous souhaitons informer, le soin d'y répondre.

1 Il faut entendre « meilleures » dans un sens tout relatif, ici les plantes qui répondent le mieux aux objectifs de sélection qu'on s'est fixés.

L'amélioration

des plantes cultivées



Fruits
d'un caféier
Arabica
sélectionné

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 rendu dépendantes de l'homme. Cette forme de sélection s'est poursuivie jusqu'au milieu du XIX^e siècle. Les premiers travaux sur la découverte des bases et des lois de la génétique ont ouvert à partir du début du XX^e siècle l'ère de la sélection dirigée vers des objectifs précis et avec de véritables méthodes d'amélioration. Aujourd'hui, les outils issus des biotechnologies permettent d'augmenter l'efficacité de ces méthodes.

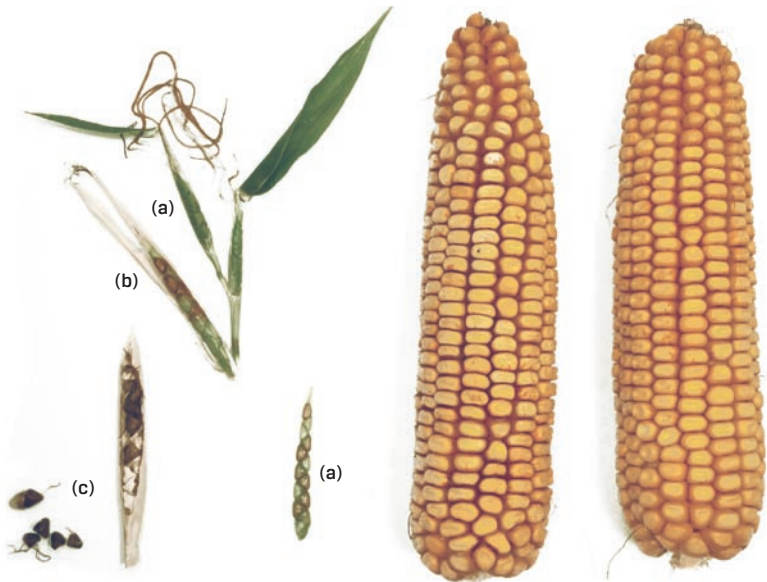
1 Quelles plantes ont été domestiquées, où et comment ?

La domestication de nombreuses espèces, aujourd'hui cultivées, a commencé il y a 8 000 à 10 000 ans environ, lorsque l'homme est devenu agriculteur, et qu'il a commencé à récolter des graines pour les ressemer.

Tant que l'homme vivait de la cueillette, les graines qui échappaient à la récolte contribuaient à la génération suivante. Au

sein de ces populations sauvages, la sélection naturelle a favorisé tous les caractères qui augmentent les chances d'une plante de laisser des descendants à la génération suivante : l'égrenage spontané, avec des mécanismes favorisant la dispersion des graines ; des graines protégées, voire dormantes ; une maturation hétérogène sur la plante associée à la ramification des tiges ou à une croissance indéterminée chez les dicotylédones et au tallage chez les graminées.

Avec le passage à la culture, ce sont les graines récoltées par l'homme qui sont ressemées. La sélection naturelle intervient toujours, mais dans des conditions écologiques différentes de celles de l'état sauvage. De plus, à travers le semis volontaire, sont favorisées les plantes ayant des caractères facilitant la récolte, et maximisant la quantité récoltée en une seule fois (homogénéité de maturation), sans égrenage spontané et avec des grains nus pour les céréales. Les grains ressemés correspondent aussi à ceux que l'homme a « appréciés ». C'est ainsi que la domestication a eu une action sur la composition chimique des grains des céréales par une sélection sur le goût ou sur la fermentescibilité des pâtes. L'ensemble sélection naturelle-



À gauche, épi de téosinte, l'ancêtre sauvage du maïs (a et b) ; à droite, épis de maïs moderne. L'épi de téosinte est formé de 6 à 12 grains, disposés sur deux rangs ; à maturité (b), sa désarticulation conduit à la chute des grains (c). Les grains du maïs sont nus, ceux de téosinte sont protégés par une cupule



Répartition des centres de domestication des principales plantes cultivées

sélection humaine plus ou moins consciente, pendant des milliers de générations d’alternance semis et récolte, a retenu des gènes soit déjà présents, mais à faible fréquence, dans le matériel sauvage, soit issus de nouvelles mutations à effets assez forts, ce qui a conduit aux types de plantes actuellement cultivées. La morphologie et la physiologie des plantes en ont été complètement modifiées. Ces modifications importantes chez les céréales sont dues à un nombre limité de gènes à effets forts (de l’ordre de cinq chez le maïs).

La domestication s’est déroulée dans différentes régions du monde, là où les espèces sauvages présentaient souvent une grande diversité génétique, donnant ainsi prise à la sélection. Du Proche-Orient sont originaires de nombreuses céréales (blé, orge, seigle, avoine), des légumineuses alimentaires (pois, pois chiche, lentille) et divers arbres fruitiers (amandier, cerisier, figuier). Le centre méso-américain est à l’origine du maïs, du haricot, de la courge, du piment. La pomme de terre et la tomate viennent d’Amérique du Sud (Pérou, Chili).

C’est pour mieux se nourrir que l’homme est devenu agriculteur. Il en a résulté la domestication de nos espèces cultivées qui, d’une certaine façon, se poursuit par l’amélioration génétique des plantes. Cette amélioration dirigée a été source de progrès spectaculaires dans les rendements. Ceux-ci n’ont pourtant permis de répondre que partiellement à l’accroissement de la population mondiale.

Par rapport au nombre total d'espèces végétales (environ 240 000), les espèces retenues par l'homme sont en nombre très réduit. Au total, environ 350 à 400 espèces (plantes de grande culture, plantes légumières, plantes textiles, fruits) ont été domestiquées. Cela se réduit à environ 80 si l'on ne considère que les plantes de grande culture et les plantes légumières, et parmi celles-ci seulement une quinzaine « nourrissent » le monde : blé, maïs, riz, sorgho, mil, orge, haricots, arachide, soja, patate douce, manioc, pomme de terre, palme, colza, tournesol, auxquelles on peut ajouter deux plantes industrielles, la betterave à sucre et la canne à sucre.

La principale raison de ce faible nombre d'espèces domestiquées est que l'on a conservé et cultivé que celles qui présentaient un attrait ou une utilité (comme la présence d'amidon chez les céréales) et des « prédispositions » génétiques à la domestication (ou du fait de la position sur les chromosomes² de ces mutations de domestication). Cela explique que des domestications indépendantes ont pu conduire aux mêmes résultats. Ainsi, il y a une convergence des caractères de domestication dans l'évolution des différentes céréales (blé, orge, maïs, mil...), mais aussi entre des espèces plus éloignées comme le tournesol et le maïs.

La sélection des mutations relativement rares ayant conduit à la domestication a eu pour conséquence une perte importante de diversité génétique, à la fois entre espèces et à l'intérieur des espèces retenues. Cette perte est bien plus importante que celle due au processus de sélection dirigée qui s'est développée depuis le début du xx^e siècle.

2 Sélectionner pour un meilleur rendement ?

La mission des agriculteurs est de produire pour mieux nourrir le monde. Dans les années qui ont suivi la seconde guerre mondiale et jusqu'en 1980, les pays européens, en particulier la France, et les pays nord-américains ont développé une agriculture à rendements élevés pour assurer leur indépendance alimentaire. Cette augmentation de la production associée à

² Par exemple, pour les céréales allogames (à fécondation croisée comme le mil, le maïs), des mutations favorables concernant la morphologie de l'inflorescence assez proches les unes des autres ont été favorisées car elles permettent le maintien des caractères domestiqués malgré les croisements avec l'espèce sauvage d'origine.

l'utilisation d'intrants comme la fumure azotée et les fongicides a un coût environnemental. Aujourd'hui, l'objectif de l'agriculture durable vise à produire suffisamment en quantité et en qualité tout en respectant l'environnement. Dans les autres pays du monde, l'augmentation des rendements reste une priorité mais doit aussi respecter l'environnement. L'amélioration génétique des plantes peut aider à résoudre ces défis par la mise au point de variétés productives valorisant mieux les intrants et adaptées aux différents stress.

Les maladies sont à l'origine d'une perte élevée du potentiel de production. La résistance aux maladies a toujours été un critère de sélection important chez différentes espèces. Les variétés modernes de blé sont plus productives que les anciennes en l'absence de fongicides car elles sont plus résistantes aux maladies. Chez les fruits et les légumes, de nombreux gènes de résistance aux maladies ont été introduits par croisement. La mise en culture de ces variétés permet des économies de fongicides et, par conséquent, un meilleur respect de l'environnement et la récolte de produits plus sains. Le problème est de construire des résistances durables, stables dans le temps, c'est-à-dire non facilement contournées par des mutations de l'agent pathogène.

L'amélioration des plantes contribue aussi à mettre au point des variétés valorisant mieux la fumure azotée, c'est-à-dire qui absorbent mieux l'azote apporté (ce qui limite les pertes de nitrates) et l'utilisent mieux. Les variétés modernes valorisent aussi mieux l'eau, sont plus tolérantes à la sécheresse et mieux adaptées aux basses températures, ce qui a permis la



Variété de pommier résistante à la tavelure, à gauche. À droite, une variété classique

culture du maïs, plante tropicale, au nord de la Loire. Globalement ces variétés sont plus rustiques, c'est-à-dire mieux adaptées à des conditions défavorables. Aujourd'hui, avec le réchauffement climatique, il faut développer des variétés encore mieux adaptées aux températures élevées et plus tolérantes au stress hydrique.

L'amélioration des plantes a aussi permis d'obtenir des variétés homogènes adaptées à la mécanisation de la culture. L'exemple le plus frappant, emblématique, est celui de la betterave. Sans la mise au point de variétés monogermes³, la culture de la betterave, qui demandait beaucoup de main-d'œuvre, aurait complètement disparu.

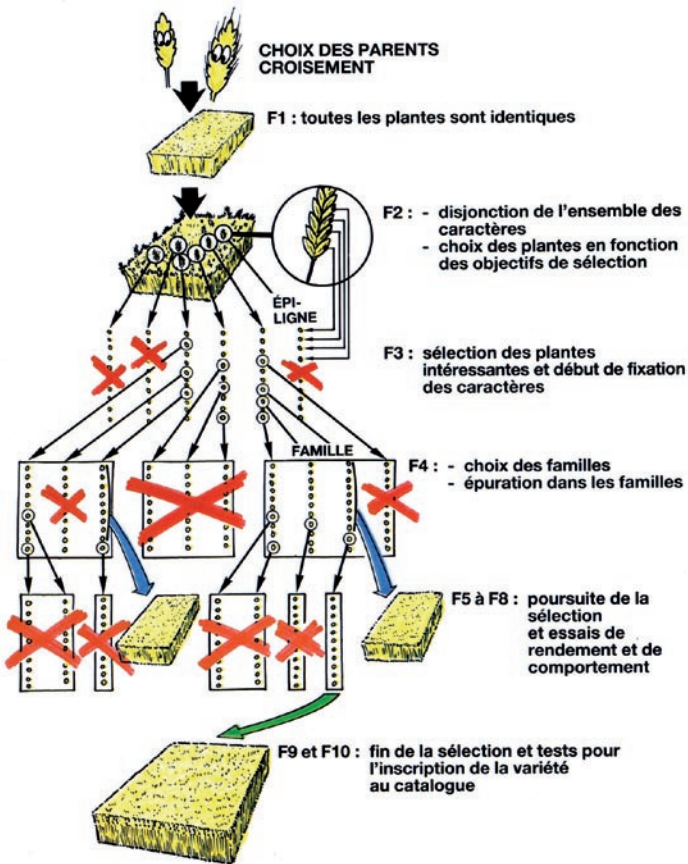
Enfin, l'amélioration des plantes a porté et porte toujours sur la qualité technologique, la qualité nutritionnelle, la qualité esthétique... des produits. Par exemple, les variétés de colza ne contiennent plus d'acide érucique et leurs tourteaux, pour l'alimentation animale, ont une faible teneur en glucosinolates. Des variétés de blé ont une meilleure aptitude à la panification, des variétés de plantes fourragères sont plus digestibles pour les animaux... Pour les fruits et les légumes, des progrès importants peuvent encore être réalisés sur le plan des qualités gustatives et nutritionnelles, bien que souvent les défauts de qualité des produits aient des causes non génétiques comme la cueillette des fruits avant maturité, par exemple.

3 Comment obtient-on une nouvelle variété ?

Le but de l'amélioration moderne des plantes est de produire des variétés lignées pures chez les plantes autogames et des variétés hybrides chez les plantes allogames lorsque le contrôle de l'hybridation à grande échelle est possible. Dans certaines situations, des variétés hybrides peuvent aussi être produites chez les plantes autogames.

Pour illustrer le principe de création d'une nouvelle variété, prenons l'exemple de la mise au point d'une nouvelle lignée chez le blé. Il s'agit de réunir dans une même lignée le maximum de gènes favorables. Le matériel de départ est en général un ensemble de croisements entre lignées. On croise entre

³ Avant l'introduction du gène de monogermie, ce sont des glomérules de plusieurs graines qui étaient semés. Il fallait alors démarier manuellement les plantes pour avoir des plantes isolées, ce qui était très coûteux en main-d'œuvre.



Comment aboutir, par sélection génalogique classique, à partir d'un croisement initial, à une variété proposée pour inscription au catalogue des variétés

elles des lignées complémentaires : par exemple, on croise des lignées productives mais d'assez mauvaise qualité technologique avec des lignées moins productives mais de bonne qualité technologique. Le but est d'obtenir, par autofécondations successives (ou par haplodiploïdisation⁴) et sélection, de nouvelles lignées qui seront à la fois productives et de bonne qualité : c'est ce que l'on appelle la sélection génalogique, qui est un processus assez long. Lorsque le nombre de gènes en cause est élevé, il est impossible de réunir en un seul cycle de sélection et de création variétale tous les gènes favorables ; il faut donc recommencer plusieurs fois... et cela peut demander

⁴ Voir question 9.

un très grand nombre de cycles de sélection, d'où la nécessaire continuité de l'amélioration génétique.

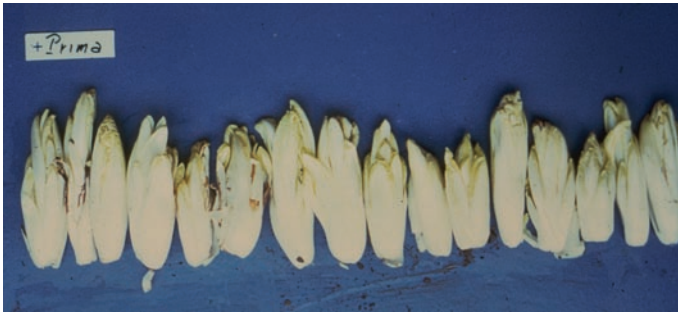
Si pour un caractère donné, comme la résistance à certaines maladies, il n'y a qu'un ou deux gènes en cause, leur transfert dans une lignée qui a de nombreuses qualités mais qui est sensible aux maladies, peut se faire par la méthode des rétrocroisements (voir question 16). Dans ce cas, avec un gène dominant⁵ d'un parent donneur à transférer dans le génome d'un parent receveur, en partant du croisement donneur x receveur, la méthode consiste à cumuler cinq ou six cycles de croisement en retour avec le parent receveur, chaque cycle étant suivi de la sélection des plantes résistantes. On termine alors par deux générations d'autofécondation. Au cours des cycles de rétrocroisement, le génome obtenu ressemble de plus en plus au génome du parent receveur, sauf pour la région autour du gène introduit : on entraîne en effet avec le gène un fragment chromosomique pouvant contenir plusieurs centaines de gènes. Aujourd'hui, ce transfert peut se faire directement par la transgénèse.

Le succès de l'amélioration génétique des plantes dépend beaucoup de la diversité génétique présente au départ de la sélection. Le matériel de départ peut être constitué des variétés actuelles, de variétés anciennes, des variétés populations... En effet de vieilles variétés ou des populations complètement dépassées sur le plan agronomique peuvent porter des gènes intéressants ; il faut donc les conserver, d'où l'importance des programmes de conservation statique (banque de gènes) et de conservation dynamique (populations que l'on laisse évoluer dans la nature) de la diversité génétique des espèces cultivées tant au niveau des sélectionneurs privés que des établissements publics.

4 Pourquoi les variétés actuelles sont-elles homogènes ?

Avec la domestication, quelques espèces seulement ont été sélectionnées, puis avec l'avènement de la sélection dirigée au début du xx^e siècle, les populations cultivées (variétés) sont devenues de plus en plus homogènes pour arriver à des variétés réduites à un seul génotype (cas des variétés lignées ou des

⁵ Un gène dominant (A) est un gène (en fait un allèle) qui, à l'état hétérozygote (Aa), masque l'effet de l'autre allèle ; la valeur du génotype hétérozygote Aa est alors celle du génotype homozygote AA.



Les variétés hybrides d'endives (en bas) fournissent un produit de taille et de forme beaucoup plus homogènes que les populations traditionnelles (en haut)

variétés hybrides simples). Cette évolution a été observée tant chez les plantes autogames⁶ (où l'on cultive aujourd'hui essentiellement des variétés lignées, donc réduites à un génotype homozygote) que chez les plantes allogames⁷ (où l'on cultive aujourd'hui des variétés hybrides simples). Parallèlement, le nombre de variétés disponibles et cultivées et leur diversité génétique ont augmenté avec les efforts de la sélection.

Pour le sélectionneur de plantes, une variété est une population qu'il a créée, ayant des caractéristiques reconnaissables, reproductible et apportant un progrès sur certains caractères.

Cette homogénéisation des variétés a plusieurs origines. D'abord la recherche de la production maximale dans un milieu donné. En effet, une population formée d'un mélange de génotypes ne peut pas être aussi performante que le meilleur génotype. Hormis les cas assez rares de coopération entre génotypes, les meilleures performances dans un milieu

6 C'est-à-dire qui s'autofécondent naturellement.

7 C'est-à-dire qui se reproduisent en fécondation croisée.

donné ne peuvent être atteintes que par un seul génotype. Ainsi, parallèlement à la restriction de la base génétique de chaque variété, les itinéraires techniques ont été de mieux en mieux maîtrisés et adaptés à un peuplement végétal homogène. Sans homogénéisation des variétés, il n'y aurait pas eu standardisation des itinéraires techniques. Par exemple, l'homogénéité dans le rythme de développement est nécessaire pour le pilotage de la fumure azotée, mais aussi pour tous les traitements et pour la récolte. De même, la mécanisation des cultures n'aurait pas fait autant de progrès, ce qui est un élément important pour la productivité du travail et l'amélioration des conditions de travail de l'agriculteur. De plus, sans homogénéité, la qualité des produits, pour le consommateur et l'industriel, ne pourrait pas être aussi bien définie.

Enfin, une certaine homogénéité des variétés est nécessaire pour des questions réglementaires. Une variété doit être distincte, homogène et stable, afin que l'agriculteur, sous un nom de variété, retrouve toujours les mêmes caractéristiques. Une variété hétérogène est plus difficile à distinguer et présente plus de risques d'évolution. Ces caractéristiques de distinction, d'homogénéité, et de stabilité sont aussi nécessaires pour la protection de l'innovation que représente une variété.

Par rapport à la culture de populations, la culture d'une variété génétiquement homogène présente certains risques, par exemple, chez les céréales à paille, un risque pathologique par une pression de sélection plus forte sur les parasites qui pourrait conduire à un contournement des résistances. D'une façon plus générale, une population ou un mélange de génotypes aura un comportement plus stable dans des milieux variés qu'une variété génétiquement homogène, mais elle sera aussi moins productive que la meilleure variété homogène. Une solution pour réunir stabilité et productivité est d'associer un nombre limité de variétés productives, génétiquement homogènes, ayant le même rythme de développement. Cela est déjà mis en œuvre chez le blé afin de limiter l'utilisation de fongicides.

5 Avons-nous vraiment besoin d'un grand nombre de variétés par espèce ?

Pour que l'agriculteur puisse choisir des variétés adaptées à ses conditions de culture et à ses conditions d'utilisation, une assez grande diversité de variétés doit lui être proposée, en particulier :