



Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux

RAPPORT

Sur

Les biotechnologies et les nouvelles variétés végétales

établi par

Dominique Planchenault

Inspecteur général de la santé publique vétérinaire,
Coordonnateur du groupe de travail BioPagGe

Résumé

Les outils utilisés pour l'obtention de nouvelles variétés végétales sont nombreux et extrêmement variés. Ils ont aussi la particularité d'être plus ou moins bien perçus par la société. Un survol de cet ensemble permet de mieux appréhender comment ils se situent les uns par rapport aux autres au cours du processus d'obtention variétale. L'amélioration des plantes, même si elle reste fondamentalement le fruit du hasard, résulte de l'exercice de choix déterminés par les demandes des agriculteurs, des industriels ou des consommateurs finaux. Une fois les besoins déterminés, le travail de l'obteneur est de trouver un juste équilibre entre les objectifs à atteindre, la maîtrise des outils et les aléas d'un principe biologique.

A la lumière d'informations récoltées en France et en Europe, il est possible d'avoir un panorama assez net des espaces de sélection qui se dessinent pour les 30 prochaines années. Les principales demandes cherchent à utiliser au maximum les capacités exceptionnelles de synthèse des plantes. Elles donnent aux végétaux un rôle nouveau de production. Elles nécessitent l'emploi des outils biotechnologiques les plus modernes. Le deuxième espace, très large, est celui des demandes traditionnelles qui cherchent à augmenter les qualités naturelles des plantes. Il utilise les méthodes classiques d'obtention variétale. Enfin, le dernier domaine permet de répondre aux demandes environnementales de la société pour une production de masse adaptée aux milieux. La sélection génomique trouve alors son plein essor et explique les développements actuels dans cette voie.

Mots – clés
Amélioration, Biotechnologie, Critère, Génétique, Génomique, Marqueur, Plante, Semence, Variété

Remerciements

La préparation, la mise en œuvre et la rédaction de ce document ont été réalisées par le groupe BioPaGe du CGAAER du Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche, de la ruralité et de l'aménagement du territoire sous la coordination générale de Dominique Planchenault.

Ce travail a reçu l'aide rédactionnelle des membres du groupe BioPaGe suivants :

Nicole Blanc
Rémy Cailliatte
Bernard Charpentier
Gilles Dagnies
Anne Grevet
Anick Leblanc-Cuvillier
Martine Méneroud
Pierre Portet

Les auteurs veulent ici remercier les importantes contributions apportées pour la relecture du document par :

Grégoire-Yves Berthe	Directeur général Céréales Vallée
Hervé Bichat	Ingénieur général honoraire du génie rural des eaux et des forêts
Ellen Bouty	Chargée de projets Innovation Variétale - Valinov
Yvette Dattée	Directrice de recherche honoraire de l'INRA
Philippe Gracien	Directeur du GNIS
Georges Pelletier	Président du conseil scientifique de l'AFBV

Avant-propos

Créé en 2004 au sein du Conseil général du génie rural, des eaux et des forêts et repris par le Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux (CGAAER), le groupe de travail "OGM" a exploré une importante bibliographie et réalisé de nombreuses auditions. Une première synthèse est produite en décembre 2006. Elle présente successivement l'état du développement des OGM, leur intérêt et l'analyse des risques, les réactions sociétales qu'ils suscitent, les enjeux économiques et les incidences sur les politiques agricoles du XXI^{ème} siècle. Une deuxième édition est réalisée en décembre 2009. Elle prend en compte les commentaires et critiques reçus à la suite de la première publication. Elle intègre en particulier de nouveaux éléments scientifiques et de nombreuses modifications législatives, notamment la loi du 25 juin 2008 sur les OGM. Ces documents constituent une base d'informations utiles pour guider les lecteurs dans leurs réflexions. Ils sont repris dans le présent document.

Cependant le domaine des biotechnologies évolue rapidement et il est apparu urgent de modifier l'approche. Ce groupe de travail du CGAAER ne pouvait plus se cantonner à une approche des biotechnologies en ne considérant que les végétaux produits à partir de l'utilisation d'outils issus uniquement de la transgénèse. S'il ouvrait son regard sur la partie amont, la partie aval devait également être digne d'intérêt. Notre société se pose des questions sur l'utilisation des outils mais aussi sur les produits obtenus. Il devait y avoir une réponse.

Dans ce contexte, le groupe de travail a étendu sa réflexion à l'ensemble des biotechnologies utilisées lors des opérations d'amélioration et de sélection des ressources génétiques animales, végétales et microbiennes. En aval, il y a intégré les demandes de la société, les contraintes économiques, les obligations de protection et de production.

Le positionnement n'est pas facile. Il s'agit de voir comment se comporte le couple biotechnologies et patrimoine génétique face aux diverses contraintes de la société. L'objectif n'est pas de juger des demandes sociales prises dans un sens très large mais de voir comment se déforme ce couple face à elles. C'est ainsi que fut créé en septembre 2009, un groupe de préfiguration chargé de cerner les sujets qui pouvaient être abordés sous cet angle.

Le programme de travail de 2010 du CGAAER comporte l'instauration d'un groupe de réflexion et de veille intitulé : analyse sur les évolutions des biotechnologies et des ressources génétiques, plus simplement appelé "Biotechnologie et patrimoine génétique" ou groupe BioPaGe.

Sur cette base, il est fait appel à candidature en juin 2010 pour la mission BioPaGe (mission n° 10157). Deux orientations principales y sont définies :

- L'élaboration d'une vision stratégique sur les ressources génétiques végétales.
- La notion d'appropriation - exemple du patrimoine génétique animal.

Le présent document donne un état des réflexions du groupe de travail à l'automne 2011 sur la première orientation.

Il a été décidé de poursuivre une année le travail sur la notion d'appropriation afin de prendre en compte la problématique soulevée par la mise en place du Protocole de Nagoya sur l'accès aux ressources génétiques et le partage juste et équitable des avantages découlant de leur utilisation relatif à la Convention sur la diversité biologique (ratifié par la France le 20 septembre 2011).

Fort de l'expérience acquise lors de l'édition des deux documents antérieurs sur les OGM, le groupe de travail BioPaGe a souhaité maintenir l'élaboration d'un document court, concis et sans parti pris. C'était un pari compte tenu du domaine couvert par ce sujet.

L'objectif principal a été de simplifier l'approche en donnant les définitions essentielles à la compréhension globale du sujet et à la poursuite d'une lecture qui se voulait didactique. Pour ce faire, certains raccourcis ont été pris. Les esprits scientifiques y trouveront certainement une forme d'approximation. Pour alléger au maximum le texte, les références bibliographiques ont été regroupées dans les annexes.

Le groupe BioPaGe a souhaité construire un document accessible à tous et offrant à chacun la possibilité de se construire une opinion sur le sujet. Dans ce contexte, il lui est apparu utile de débiter ce travail par deux chapitres importants, l'un sur les techniques d'obtention variétale et l'autre sur les processus d'amélioration génétique remplaçant les principes de base de la biologie végétale (reproduction, développement et survie de la plante) au centre des actions entreprises. Ces rappels ne se veulent pas exhaustifs mais souhaitent apporter les éléments essentiels à la compréhension de l'ensemble.

Table des matières

1. UN PEU D'HISTOIRE	9
2. LES TECHNIQUES D'OBTENTION DES VARIÉTÉS VÉGÉTALES.....	11
2.1. PRÉAMBULE	11
2.2. LA PÉRIODE PRÉSCIENTIFIQUE	11
2.3. LA PÉRIODE SCIENTIFIQUE	12
2.3.1. <i>Les hybridations</i>	13
2.3.2. <i>Les mutations</i>	14
2.4. LA PÉRIODE DES BIOTECHNOLOGIES	16
2.4.1. <i>La culture cellulaire</i>	16
2.4.2. <i>La biologie moléculaire</i>	18
3. LE CHOIX DES CARACTÈRES À AMÉLIORER.....	21
3.1. QUELQUES REMARQUES	21
3.2. DE LA THÉORIE À LA PRATIQUE	22
3.3. LA NOTION D'HÉRITABILITÉ	23
3.4. QUELQUES REMARQUES COMPLÉMENTAIRES.....	24
3.4.1. <i>Le transfert de gènes direct au sein d'une même espèce et entre espèces</i>	25
3.4.2. <i>Le génotypage et le phénotypage</i>	26
3.4.3. <i>La sélection assistée par marqueurs ou sélection génomique</i>	29
4. UN APERÇU DES TRAVAUX ACTUELS.....	31
4.1. À LA RECHERCHE DE DONNÉES.....	31
4.2. LA SOURCE GNIS	32
4.3. LA SOURCE SNIFS.....	35
4.4. UNE PREMIÈRE APPROCHE	41
5. QUELLES SONT LES PERSPECTIVES ?	43
5.1. DES OUTILS ADAPTÉS	43
5.2. DES CHOIX D'AMÉLIORATION	45
5.3. UNE NOUVELLE APPROCHE DE L'AGRICULTURE	47
5.4. UNE NOUVELLE APPROCHE DES SEMENCES.....	48
5.5. UNE NOUVELLE RESPONSABILITÉ	50
6. CONCLUSION.....	52
7. POUR EN SAVOIR PLUS	54
7.1. LIVRES ET RAPPORTS	54
7.2. ARTICLES	56
7.3. SITES INTERNET	56
7.4. CONFÉRENCES ET ARTICLES DE LOI	57
8. APPEL À CANDIDATURE	60

Les termes employés sont définis dans le **Glossaire FAO de la biotechnologie pour l'alimentation et l'agriculture** téléchargeable sur <http://www.fao.org/docrep/004/y2775f/y2775f00.htm>

1. Un peu d'histoire

Depuis une quinzaine d'année, l'introduction des biotechnologies dans le paysage des ressources génétiques végétales a entraîné des modifications importantes dans les postures que peuvent prendre les divers acteurs de cette filière qui s'étend des obtenteurs de nouvelles variétés aux consommateurs des produits qui en sont issus (pain, farine, sucre, fruits, légumes ou fleurs).

Au cœur de ce mécanisme se trouvent les services de l'Etat qui doivent veiller notamment à satisfaire des besoins de production agricole et à l'application de nouveaux règlements environnementaux. Ces contingences se traduisent au niveau des semences par l'adjonction d'une composante environnementale à leur valeur agronomique et technologique. Plus concrètement, la semence doit aujourd'hui non seulement produire plus et plus rapidement des produits adaptés aux goûts des consommateurs et aux contraintes de la commercialisation mais également être moins exigeante en eau, en intrants et en pesticides.

L'élaboration des semences nécessite alors l'utilisation de toute une gamme d'outils biotechnologiques (croisement, mutagenèse, transgénèse, cisgénèse, sélection génomique). L'outil bien choisi est celui qui est performant en termes de vitesse de réponse aux demandes, d'acceptation par la société et de rentabilité pour les obtenteurs et/ou les producteurs.

Le groupe de travail a cherché à obtenir une vue d'ensemble, pour les espèces végétales majeures, des nouveaux facteurs d'efficacité à l'horizon 2030 (résistance aux maladies, résistance à la sécheresse, meilleure efficacité alimentaire, etc.) et à les mettre en perspective avec les outils biotechnologiques utilisables pour répondre aux demandes dans le temps et l'espace.

Ce travail pourra orienter les services du MAAPRAT dans ses choix et ses décisions face à l'arrivée sur le marché de semences adaptées à une nouvelle demande des consommateurs, à des contraintes de production, à des contraintes environnementales et à des nécessaires investissements des obtenteurs.

Les biotechnologies sont l'ensemble des méthodes ou techniques utilisant des éléments du vivant (organismes ou cellules, en totalité ou en partie) pour rechercher, produire ou modifier des éléments ou organismes d'origine animale, végétale ou microbienne. Le champ d'application du groupe de travail couvre un domaine très large qui se complexifie lorsque le terme de patrimoine génétique y est associé, mais qui, en contre partie, permet de restreindre et de clarifier l'approche génétique.

Dans le domaine des productions variétales, il serait trop restrictif de ne considérer les nouvelles variétés qui seront sur le marché dans 15 ou 20 ans que sous l'angle de la production de plantes génétiquement modifiées. Les études européennes montrent que pour les 7 grandes espèces considérées (soja, maïs, colza, coton, betterave à sucre, pomme de terre et riz), le nombre de variétés issues d'un processus de transgénèse passera de quelques unités à plus de 100 en 2015. Ces chiffres sont déjà atteints pour le maïs par exemple. Les besoins de nouvelles variétés vont se trouver également modifiés. Cet angle de vue deviendra essentiel.

A la lumière de ces premières informations très factuelles, il convient d'emblée de préciser que deux principes fondamentaux sont clairement différenciés. Le premier est l'élément de transformation lui-même et le second le nombre de variétés obtenues. Un exemple permet de mieux comprendre cette distinction. Ainsi, en Europe, la demande des agriculteurs va vers des variétés de maïs adaptées au contexte agro-climatique et économique de leur région. Pour la seule transformation, par exemple la résistance à un herbicide, plus de

150 variétés sont mises aujourd'hui sur le marché. Il n'est plus possible de dire, après cet exemple (une transformation, 150 variétés), qu'il y a réduction de la variabilité. Le travail se trouve ainsi complété par la nécessité de regarder l'ensemble du processus et de donner des clés de compréhension. L'évolution dans ce domaine est en route. Il est essentiel de la comprendre.

La capacité, que nous avons aujourd'hui, de transférer un gène d'un organisme à un autre, résulte de travaux scientifiques qui vont beaucoup plus loin que cette simple possibilité. En 20 ans, l'approche de la biologie a complètement changé. La connaissance fine du génome des diverses espèces va certainement apporter plus de bouleversements que ceux révélés par l'arrivée des plantes génétiquement modifiées.

Cette évolution de la biologie doit être considérée dans son ensemble. La réflexion menée dans ce document prend en compte l'ensemble des moyens utilisés pour produire de nouvelles semences aptes à répondre aux besoins humains de production et à satisfaire les contraintes sociales, économiques et environnementales.

La première partie est consacrée à un survol des outils disponibles pour l'amélioration et la sélection des plantes. Comment sont-ils utilisés et quels sont leurs apports respectifs ? Est-il possible de les positionner les uns par rapport aux autres en fonction de leur efficacité, de leur facilité d'utilisation ou de leur modernité ? L'objectif est alors de savoir s'ils sont interchangeables ou s'ils apportent chacun une avancée particulière au cours du processus d'obtention variétale.

La deuxième partie permet de comprendre comment peuvent être traduites en termes d'amélioration génétique les demandes des consommateurs ou des industriels par exemple. L'objectif est de donner de façon la plus claire possible les définitions essentielles permettant de comprendre les différentes étapes d'une sélection créatrice de nouvelles variétés. Cette approche doit pouvoir dégager les facteurs limitant la demande des utilisateurs en fonction des diverses contraintes et du choix des outils mis à la disposition des sélectionneurs. Un juste équilibre doit être obtenu entre les objectifs réalisables en termes de nouvelles variétés végétales et les outils utilisables.

La troisième partie est illustrative. Sur deux jeux de données, elle permet d'appréhender ce qui se passe réellement au niveau national et international. L'objectif est alors de dégager les grandes tendances tant sur l'utilisation des outils décrits en première partie que sur les principaux critères d'amélioration recherchés dans les nouvelles variétés pour répondre aux besoins exprimés au cours des 20 ou 30 prochaines années.

La dernière partie rassemble tous les éléments précédemment recueillis pour esquisser les outils, les objectifs de sélection et les grandes tendances se profilant à l'horizon 2030. Ils permettent un meilleur positionnement et une pro-activité face aux évolutions de la biologie, aux progrès biotechnologiques et à l'arrivée d'une première vague de variétés de plantes permettant à la société de faire de nouveaux choix. Leur confluence va produire une deuxième vague d'amélioration variétale avec production de nouvelles semences pour lesquelles notre société va devoir se préparer.

Enfin, pour des raisons didactiques, les différents chapitres de ce document sont relativement indépendants les uns des autres. Si les réflexions finales peuvent facilement être comprises par elles-mêmes, l'enchaînement des différentes parties permet de mieux percevoir les progrès liés à l'évolution des demandes, des contraintes et des avancées biotechnologiques. Il laisse imaginer la permanence quasi inéluctable des avancées dans le domaine des obtentions variétales pour les 20 prochaines années.

2. Les techniques d'obtention des variétés végétales

2.1. Préambule

Si la naissance de l'agriculture se situe aux environs de 12 000 ans avant JC, c'est à la même époque que nous situons le début du processus de domestication des principales espèces végétales. Deux contraintes guident alors la transformation des espèces sauvages vers une espèce de plus en plus domestiquée.

La première réside dans la nécessité d'obtenir un caractère différent et si possible aisé à repérer. Cette **variabilité** entre les individus est primordiale. Le fruit est plus gros. Les graines sont plus nombreuses. La fleur est de couleur différente et arrive plus précocement. La germination se fait plus vite. En d'autres termes, il ne peut y avoir de nouvelles variétés que s'il y a des caractères facilement repérables ou des outils qui permettent de les repérer. L'existence d'une variabilité et son maintien sont les composantes majeures d'une capacité d'amélioration génétique.

Pour exercer un choix sur un caractère recherché, la deuxième contrainte est de pouvoir sélectionner et multiplier l'individu porteur. De manière intuitive et évidente, la capacité de **sélection** est directement liée à la reproduction. Au cours de l'évolution, les plantes se reproduisant par auto-fécondation (autogames) avaient une sécurité quasi automatique de proliférer. Les plantes devant trouver une voisine pour se multiplier se trouvaient défavorisées. Cependant, si les plantes autogames ont pu se développer rapidement dans des milieux stables, la chute de variabilité concomitante au sein de l'espèce les rendait particulièrement vulnérables lors d'un changement du milieu. A contrario, les espèces allogames peuvent avoir plus de mal à se reproduire, mais la persistance d'une variabilité forte est garante d'une bonne adaptabilité. Le travail de l'homme va être de favoriser l'émergence des individus porteurs du caractère recherché en leur donnant des conditions favorables ou en les aidant à se reproduire s'ils ne peuvent le faire naturellement.

A partir de ces deux exigences : nécessité de révéler la variabilité visible ou non et nécessité de promouvoir la reproduction des individus porteurs du caractère recherché, il est possible de distinguer les différentes périodes d'amélioration des plantes. Bien que le début de ces différentes périodes soit parfaitement identifiable, elles ne sont pas limitées dans le temps. Les outils développés au cours d'une période restent en usage au cours des périodes successives et se combinent avec d'autres outils.

2.2. La période préscientifique

Sans connaissance des mécanismes mais par une série de tâtonnements, d'essais et d'erreurs, l'agriculteur, en choisissant et en isolant les plants intéressants, a pu mettre en place une amélioration empirique des variétés utilisées. Ainsi, dans sa région, en conservant les plus belles et les plus grosses graines des plus beaux individus, l'agriculteur avait l'espoir d'avoir de belles plantes à la saison suivante. De plus, en réservant les meilleures terres aux plus belles graines, il espérait encore une meilleure récolte.

Cette sélection s'exerçait sur des critères essentiellement visibles (hauteur de la plante, précocité, largeur de l'épi, etc.) mais aussi sur des critères plus subtils (goût, critères de panification, etc.) issus d'un savoir-faire propre à l'agriculteur. Certains facteurs, comme la résistance aux maladies, ne pouvaient être appréhendés qu'à la faveur d'une erreur ou de l'arrivée d'un pathogène qui révélait les individus résistants. Cette période préscientifique a assuré le maintien d'une importante variabilité au sein de la population considérée. Selon l'opportunité des "accidents", il pouvait y avoir création d'une nouvelle variabilité sur laquelle une nouvelle sélection s'opérait. L'agriculteur progressait par défaut.

Cette séquence est importante. Elle a présidé à la mise en place de nos variétés locales d'aujourd'hui à partir desquelles s'est exercée notre sélection moderne. La conservation volontaire de ces parents historiques est essentielle au maintien de la variabilité d'une espèce. Elle passe, on le comprend aisément, par la mise en place de programmes de conservation ambitieux.

2.3. La période scientifique

Elle se distingue de la précédente en ce sens qu'elle débute avec la compréhension de la reproduction et du système de reproduction des plantes. C'est Rudolf Camerere, dit Camerarius (1665-1721), médecin et botaniste allemand, qui comprend que les étamines sont l'organe sexuel masculin, le pistil l'organe féminin et que c'est le pollen qui fertilise la plante. À la même période, l'agronomie se développe. Olivier De Serres (1531-1619) fait de nombreuses découvertes en agriculture. Il importe le houblon d'Angleterre pour la bière, le mûrier de Chine qu'il acclimater, des plantes inconnues en France comme la canne à sucre, le riz, la tomate et la pomme de terre. Il s'intéresse à la sériciculture qu'il tente d'intensifier, encouragé par le roi Henri IV qui lui commande 20 000 plants de mûriers qui seront plantés en 1603 dans les jardins des tuileries pour la fabrication de la soie.

Bien avant une connaissance parfaite de la reproduction, il existe un travail important d'introduction, d'acclimatation et de maîtrise des performances agronomiques des plantes (amendements, engrais, fertilisation) impliquant de nombreuses espèces. Dans ces conditions, incapacité de maîtriser la reproduction et nécessité de voir des différences, il est compréhensible que les croisements relatés et étudiés aient été ceux qui se faisaient entre les espèces. Ainsi, le blé tendre est apparu, aux environs de 6 000 ans avant JC par hybridation interspécifique (*Triticum urartu* x *Aegilops* sp.) ou le colza au Moyen Age (*Brassica oleracea* x *B. rapa*), alors que les premières hybridations intraspécifiques du blé ne sont faites et identifiées qu'en 1880.

Les avancées importantes, reposant toujours sur la mise en évidence d'une variabilité puis l'exercice d'un choix, n'auraient pas été possibles sans l'entrée en lice, au côté des sciences agronomiques et de la biologie de la reproduction, des mathématiques, des statistiques et de l'informatique. Les lois de Mendel (1865), qui ont le mérite d'être simples, mais qui sous-tendent une transmission et une régulation complexes de l'expression des gènes d'un individu à l'autre en fonction d'effets environnementaux, ont été validées à l'aune des lois statistiques. La possibilité de travailler sur de grands échantillons a permis de nouvelles approches. Les choix ont pu être plus précis grâce à l'observation d'une généalogie plus large. Dans certains cas, le maïs et la luzerne notamment, la recherche du gène a été temporairement abandonnée au profit d'un travail sur l'expression de la variabilité d'un caractère. La génétique quantitative a apporté alors des avancées notables. Cependant, l'arrivée de nouvelles connaissances n'occasionne pas de véritable rupture. Elle permet de mieux comprendre les croisements qui se produisent naturellement entre les espèces, de révéler et observer les hybridations entre les variétés d'une même espèce. Elle met en place un continuum de savoir et d'utilisation d'outils qui allient le naturel et la nécessité de le guider, de le favoriser ou de l'amplifier en fonction des besoins. Elle a abouti, comme exposé ci-dessous, aux méthodes les plus modernes d'obtention variétale. Ainsi, la sélection génomique reste 100 % mendélienne.

La compréhension de ce continuum de réalisation est déterminante pour l'arrivée des variétés modernes. En effet, entre les hybridations naturelles interspécifiques qui sont les seules à pouvoir être constatées avec les mutations apportant des modifications importantes au sein d'une espèce et les hybridations intraspécifiques réalisées par l'homme, il n'y a pas de rupture. On ne procède plus par une succession d'échecs et de choix. Il est possible de diriger

la reproduction (suppression des étamines par exemple) au sein des individus d'une même espèce. Dans un milieu de mieux en mieux maîtrisé, les connaissances sur les diverses variétés s'améliorent. Les croisements peuvent être plus facilement dirigés en fonction des besoins nouveaux de la société.

Souvent reprise en génétique, l'image d'un jeu de cartes est suffisamment parlante pour montrer que les deux techniques essentiellement utilisées – hybridation et mutation – reviennent schématiquement dans le premier cas à mélanger deux jeux de cartes (les gènes) librement choisis puis à refaire un seul jeu et dans le second cas à introduire de nouvelles cartes dans un jeu connu ou à en supprimer en espérant que l'ensemble reste jouable (capacité de reproduction et croissance conservée). La finalité revient à poursuivre la partie grâce à une nouvelle variabilité. Quelles sont ces techniques ?

2.3.1. Les hybridations

La technique consiste à croiser deux parents et à créer de la diversité génétique. Pour réaliser ces croisements, plusieurs outils sont utilisés :

✓ L'hybridation interspécifique

C'est le mode de croisement spontané le plus ancien connu et mis en évidence dans la nature. Cela ne signifie pas que les hybridations intraspécifiques n'existaient pas mais elles ne pouvaient être facilement décelées.

Le meilleur exemple est celui du triticales qui provient du croisement spontané, mais non fertile, de blé et de seigle. Son observation a permis à l'homme de favoriser les variétés fertiles. Le triticales combine ainsi la robustesse du seigle, qui peut pousser sur des sols pauvres et sous des climats plus rudes, avec les qualités de rendement du blé. Le triticales a une valeur énergétique comparable à celle du blé. Sa teneur en protéine est plus faible mais sa teneur en lysine supérieure. Contrairement au seigle, sa farine, moins riche en gluten, n'est pas panifiable sans adjonction de farine de blé.

De nombreuses espèces cultivées sont des hybrides naturels : blé, colza, moutarde, fraise, etc. L'homme a cherché à s'approprier cette capacité de certaines espèces à se croiser. Sans être exhaustif, peuvent être cités la clemenvilla (hybride de clémentine et de tangerine), les festulolium (hybrides de fétuque et de ray-grass), l'aprium et le pluot (hybrides de prunier et d'abricotier), la caseille (hybride de cassissier et de groseillier épineux), le limequat (hybride de kumquat et de citron vert).

✓ L'hybridation intraspécifique

C'est le même outil que précédemment. Au sein de la même espèce, le pollen d'un des parents féconde l'autre parent qui a été castré. Il y a orientation de la reproduction dans la réalisation du croisement, puis sélection des plantes intéressantes et multiplication. Ces étapes obligent à différencier les hybrides qui sont des produits de départ vers la sélection de lignées (blé, orge) et les hybrides qui sont les produits finaux issus des croisements de lignées (maïs, colza, betterave...).

Dans ce dernier cas, le produit obtenu (F1) présente souvent des caractéristiques supérieures à chacun des parents (vigueur hybride). Cette caractéristique particulière est perdue si les produits issus de

parents F1 sont replantés. Cette logique impose aux semenciers le maintien des lignées parentales et protège indirectement leur travail de sélection. Elle oblige également les cultivateurs voulant préserver leur rendement à se réapprovisionner régulièrement en semence F1.

✓ L'hybridation élargie

Cet outil est encore plus complexe d'utilisation que le précédent. Le croisement, naturellement impossible, entre deux espèces très différentes, est forcé en culture *in vitro*. Le phénomène naturel d'avortement des embryons obtenus est stoppé avant le début de sa réalisation. Quelques rares embryons viables sont sauvés et mis en culture de tissu. La survie d'une cellule, d'un embryon et d'un individu résulte du succès après nombre d'essais.

Cette technique a été utilisée chez le riz pour l'obtention de variétés résistantes à des maladies ce qui a permis d'éviter certaines famines, en Inde notamment. Elle combine deux variétés de riz incapables de se reproduire entre elles, une variété classique et une sauvage trouvée dans l'Uttar Pradesh et résistante au virus du rabougrissement herbeux (maladie du riz). En Afrique, elle a servi à produire le riz Nerica qui semble avoir un meilleur rendement et être mieux adapté au milieu.

Ce mode d'hybridation est largement utilisé dans le genre *Brassica* qui comprend une cinquantaine d'espèces et de nombreuses sous-espèces et variétés. Quatre espèces cultivées jouent un rôle important dans l'alimentation humaine : *Brassica oleracea* (les choux), *Brassica napus* (colza, rutabaga) *Brassica rapa* (navet, navette, chou chinois), *Brassica nigra* (moutarde noire).

2.3.2. Les mutations

Une mutation est une modification de l'information génétique dans le génome d'une cellule. Elle devient visible si elle est suffisamment importante et n'entrave pas la survie de la plante. C'est une modification de la séquence de l'ADN et une des causes principales de l'évolution des espèces.

Les mutations expliquent l'existence d'une variabilité entre les gènes. Elles sont dues à l'instabilité permanente des génomes et des séquences mobiles (transposons) qu'ils contiennent, à des erreurs de copie ou de réparation, à des coupures spontanées de l'ADN et à des phénomènes environnementaux (radiations, accidents climatiques, etc.) souvent mal connus. Les mutations qui sont les moins favorables, sont éliminées par le jeu de la sélection naturelle, alors que les mutations avantageuses, beaucoup plus rares, tendent à s'accumuler. La plupart des mutations sont dites neutres, elles n'influencent pas la valeur sélective.

✓ Les mutations spontanées

Dans la nature les mutations naturelles sont des phénomènes relativement rares (de l'ordre de 10^{-6} – 10^{-7}). A titre d'exemple, chez le colza, la mutation spontanée de résistance aux sulfonylurées (famille de composés qui sont actifs contre les dicotylédones en bloquant une enzyme végétale et utilisés comme herbicide) est de cet ordre de grandeur. Un hectare de colza produit 10^9 graines. Il produit donc

spontanément entre 100 et 1 000 graines mutées résistantes aux sulfonylurées. Il faut alors beaucoup de chance pour les trouver et les sélectionner. A titre de comparaison, les chances de gagner le gros lot au Loto français sont de 1 contre 19 millions.

Cependant, il n'est pas impossible de trouver les plantes mutées spontanément lorsque les modifications provoquées sont facilement identifiables, cas du chou-fleur cheddar de couleur orangée ou de certaines variétés de pommes issues initialement de mutations spontanées (Belrène, Bauline, etc.).

✓ Les mutations induites

La technique des mutations induites permet d'augmenter le taux de mutations en utilisant certains éléments physiques (UV, rayons X, irradiations), en faisant agir des composés chimiques (divers agents alkylants) ou en induisant la disparition ou la modification de caractères au cours de multiples repiquages en culture in-vitro.

Quelques chiffres permettent de mieux cerner les objectifs. Le taux de mutation spontanée chez *Arabidopsis* est d'environ une mutation par génération. Son génome mesure 140 millions de paires de bases. En extrapolant, on admet 8 mutations par génération pour le colza qui mesure 1 200 Mb, et, de la même façon, 38 pour l'orge et 100 pour le blé. Ces mutations peuvent s'accumuler ou disparaître. Chez *Arabidopsis*, entre écotypes non apparentés, une mutation en moyenne est décelée toutes les 300 paires de bases, soit un total de 466 000 petites différences. Pour l'orge, il y en aurait plus de 17 millions.

La mutagénèse par EMS (éthyl méthane sulfonate) chez *Arabidopsis* induit de l'ordre de 500 mutations par génération, soit 500 fois plus que la mutation spontanée, mais mille fois moins que la variation d'un écotype à l'autre. L'introduction de différences est relativement faible, mais les surfaces des cultures en sélection sont alors divisées par 500 par rapport à la seule utilisation de la variation spontanée. Cela augmente d'autant la probabilité de la mettre en évidence. La question se résume alors à un problème de sélection.

Vouloir établir une liste des variétés de plantes améliorées par mutagénèse reviendrait, à quelques exceptions près, à établir une liste de toutes les variétés de plantes cultivées dans le monde. Il y aurait plus de 3 000 variétés commercialisées (FAO 1964) pour plus de 170 espèces (70 maïs, 155 sojas, 42 cotons, 5 aubergines, 6 pommes de terre, 242 blés, 3 tournesols). Ces variétés mutées enregistrées sont utilisées dans près de 60 pays, principalement en Asie.

La liste s'allonge encore avec les variétés fruitières (ananas, poire, raisin, abricot, pêche, papaye, etc.) ou celles attachées au domaine de l'horticulture.

✓ Les mutations somaclonales

Pour favoriser l'action des éléments mutagènes de nature physique ou chimique, les cellules en culture *in vitro* sont mises dans des conditions très défavorables (stress par chaleur, froid, rayons). Les rares produits

viables obtenus sont mis en culture puis repiqués et enfin multipliés par voie non sexuée (bouturage par exemple).

Utilisée depuis longtemps sur la vigne, sur l'abricot ou sur la banane, cette technique est utilisée par exemple sur le poirier, pour rechercher des individus résistants au feu bactérien. Elle n'a pas donné de véritables applications.

2.4. La période des biotechnologies

Depuis moins de cinquante ans, le développement de nouveaux outils a permis de produire des plantes qui répondent de mieux en mieux aux contraintes sociales ou environnementales et d'entrevoir la possibilité de sélectionner des variétés sur des caractères qui étaient jusqu'alors considérés comme impossibles à obtenir (rendement, résistance, adaptation).

Il est possible schématiquement de réduire cette approche à l'utilisation en parallèle de deux techniques : la culture cellulaire et la réaction en chaîne par polymérase (PCR ou *polymerase chain reaction*) avec les diverses techniques qui en découlent. La première permet aux sélectionneurs d'échapper aux contraintes du milieu et de réaliser des essais en grand nombre. Les secondes mettent à la disposition des chercheurs des quantités manipulables d'ADN et de données permettant une caractérisation plus fine.

2.4.1. La culture cellulaire

✓ La polyploïdie

L'objectif est de multiplier le stock de chromosome ($2n$, $3n$, $4n$, etc.). L'individu ayant ainsi plus de 2 séries de chromosomes pourrait avoir une expression amplifiée de certains des caractères recherchés.

La technique la plus simple consiste à enduire des zones de multiplication intense (bourgeons notamment) par des agents divers comme la colchicine et à induire le doublement des chromosomes sans division cellulaire. La culture *in-vitro* a permis d'isoler les cellules en division et de favoriser la multiplication quasi à l'infini des essais et un parfait contrôle des agents mutagènes utilisés ou le repérage d'un doublement spontané d'un ou des chromosomes. Comme signalé antérieurement, l'objectif final reste de pouvoir sélectionner les accidents intéressants.

✓ La multiplication de masse

La culture cellulaire donne la possibilité d'accélérer la reproduction de plantes pérennes et d'arbres, puis leur multiplication. La réussite d'une mise en culture de certaines cellules entraîne un gain de temps sur l'obtention de nouveaux reproducteurs et la possibilité d'effectuer de nouveaux croisements.

Cet outil est très utilisé pour de nombreuses espèces à vie longue (citronnier, oranger, olivier, cocotier, peuplier, eucalyptus, etc.). Il permet de multiplier les clones d'une même espèce (café, cacao...) et de répondre à la nécessité de plantations polyclonales réduisant les risques en cas de modification importante du milieu ou de l'arrivée d'une pathologie particulière.

✓ L'hybridation somatique

Cet outil reprend des éléments propres aux croisements et aux mutations réalisés sur des cellules débarrassées de leur paroi. Ces protoplastes se divisent mieux que des cellules "classiques". Schématiquement, cette technique reproduit ce qui est naturellement réalisé lors d'une greffe où les entailles franches du porte-greffe et du greffon mettent en rapport des cellules débarrassées de leur paroi.

Au cours de la reproduction sexuée, les informations génétiques contenues dans le cytoplasme ne sont transmises que par la mère. Dans l'hybridation somatique, cette fusion de deux protoplastes conduit à une hybridation des noyaux et des cytoplasmes. Cet outil permet le transfert et l'amélioration de caractères à hérédité cytoplasmique. De nouvelles lignées mâles stériles de colza résistantes à l'atrazine ont été obtenues par cette technique. Elle trouve des applications importantes chez les agrumes.

La pomme de terre, *Solanum tuberosum*, est une espèce cultivée chez laquelle l'introduction de caractères par fusion de protoplastes est facilement réalisable. On a pu introduire des gènes de résistance au virus de l'enroulement, aux virus Y et X, au mildiou et à la pourriture bactérienne due à *Erwinia*, à partir des espèces sauvages d'Amérique du Sud, notamment *Solanum brevidens* et *S. bulbocastanum*.

✓ Les haploïdes et doubles haploïdes

La culture cellulaire permet l'observation et le suivi de cellules naturellement haploïdes (les gamétophytes mâles ou femelles ayant un stock chromosomique réduit à n). Ces cellules, porteuses de la reproduction, sont naturellement stériles.

Il peut paraître intéressant d'obtenir des individus à 2n chromosomes en partant d'un seul stock chromosomique et en évitant ainsi le brassage des gènes qui se déroule durant la fusion des gamètes. La culture cellulaire permet d'isoler les doublements spontanés ou induits par la colchicine par exemple. Il faut encore que ces cellules particulières se développent jusqu'à un stade végétatif permettant une plantation puis une multiplication rendant intéressant cet isolement et sa sélection.

Cette technique est communément utilisée chez l'orge, le blé, le riz, le melon, le poivron, le tabac, etc.

✓ Les plantes stériles

L'utilisation ultime des cultures cellulaires est la possibilité de multiplier des plantes stériles et de façon plus générale des plantes à multiplication végétative. C'est un cas particulier de la multiplication de masse. Les cultures cellulaires sont faites principalement à partir de cellules naturellement en division, les méristèmes. Les clones sont obtenus après isolement des sujets parvenus à un stade végétatif permettant la plantation et la sélection.

Cette technique est surtout utilisée dans les domaines horticole (orchidée) et fruitier (palmier). Elle répond à une demande des consommateurs recherchant des fruits sans pépins.

2.4.2. La biologie moléculaire

✓ La transgénèse

La transgénèse est la détermination et l'isolement de petits fragments d'ADN de diverses origines et leur incorporation au sein du génome d'un organisme receveur à l'aide d'un vecteur (virus, bactérie, etc.). La difficulté est d'avoir la meilleure connaissance possible sur l'élément transporté, sur l'action du vecteur utilisé et sur le lieu d'implantation de l'élément introduit. *In fine*, le principal obstacle reste surtout de régénérer une plante à partir d'une cellule transformée.

Cet outil est utilisé pour introduire un nouveau caractère dans des variétés de maïs, soja, colza, riz, pommes de terre, cotonnier, etc. Il est le moyen le plus prometteur pour l'obtention de variétés qui répondent à des critères difficilement sélectionnables (résistance aux insectes, à la sécheresse, adaptation au milieu, qualité alimentaire, etc.).

La transgénèse a été considérée initialement comme une technique efficace. Elle permet, en effet, le transfert de gènes ciblés, contrairement à l'hybridation, par exemple, qui porte sur des morceaux entiers de génome et non sur un seul gène.

Cependant, si, aujourd'hui, l'outil, lui-même ne semble pas poser de problème, son utilisation, en autorisant l'introduction de gènes (petits fragments d'ADN) étrangers à l'espèce considérée, entraîne des rejets de la part de la société, notamment en France. Ce sont des réactions ou des ressentis sociétaux face à de nouvelles espèces ou variétés pour lesquelles les connaissances sont insuffisantes tant sur leur développement et leurs interactions que sur leur devenir à long terme.

Cette situation renforce le besoin réel d'information dans ce domaine. Il nécessite la mise en place d'une véritable politique d'information, de gestion et de suivi du patrimoine génétique français qu'il soit animal, végétal ou microbien.

✓ La cisgénèse

La cisgénèse se distingue de la transgénèse par le fait de transférer artificiellement des gènes entre des organismes qui peuvent être croisés selon les méthodes d'hybridation classiques, donc entre des organismes étroitement apparentés. Ainsi peuvent être créés des plants de pomme de terre résistants au mildiou par transfert des gènes de résistance dans des variétés améliorées à haut rendement. Cette technique présente l'avantage de la rapidité par rapport aux méthodes classiques de sélection et, parfois, elle est la seule à permettre l'obtention d'une variété cultivable et consommable.

✓ La sélection génomique

La sélection génomique ou assistée par marqueurs dérive directement de la capacité nouvelle de lire les séquences d'ADN et d'en déterminer les divers polymorphismes. De façon très schématique, dans une variété qui présente des traits particuliers (résistance à la sécheresse, résistance à certaines maladies, etc.), on recherche des séquences spécifiques dont

la présence est corrélée à ces caractères dans la descendance de cette variété après hybridation avec une variété qui ne les possède pas.

Cet outil permet de sélectionner des caractères dits classiques (production, croissance, etc.) mais surtout des caractères plus difficiles à appréhender comme ceux liés à l'adaptation ou à la résistance.

La puissance de cette méthode s'exprime d'autant plus qu'il y a une corrélation forte entre un marqueur et un caractère particulier. Elle permet alors non seulement d'éviter le système long et coûteux des expérimentations, mais aussi d'avoir un regard plus large vers d'autres populations notamment celles contenues dans des banques de semences. On ne saurait redire ici l'importance de telles banques dans la satisfaction des besoins futurs.

Cette méthode alliée à de nouveaux outils de diagnostic comme la chromatographie en phase gazeuse ou liquide à haute performance, qui autorisent le dosage d'éléments en très petite quantité dans une graine, permet d'aborder la sélection de caractères non-visibles. Son emploi, qui n'altère pas le développement *in-vitro* de l'embryon, autorise une sélection directe sur la graine et réduit d'autant plus le temps d'obtention d'une nouvelle variété.

✓ Le tilling

Le principe du tilling (*Targeting Induced Local Lesions in Genomes*) combine des méthodes de mutagenèse aléatoire avec des méthodes modernes d'analyse de l'ADN grâce à l'identification à haut débit de mutations ponctuelles. Il s'agit de provoquer des mutations sur des génomes connus à l'aide de différents agents (chimiques ou physiques), de bien les localiser sur les séquences préalablement connues de l'ADN et d'observer les mutants correspondants. Un large éventail de variétés peut ainsi être étudié.

Initialement utilisé sur *Arabidopsis thaliana*, le tilling est utilisé sur la tomate, le melon, le pois, le colza, le blé, l'orge, la luzerne, etc. Son emploi vise principalement la recherche de résistances, de qualités gustatives ou nutritionnelles.

Cette technique sera, sans doute, appelée à disparaître avec l'arrivée des séquençages à haut débit et à faible coût directement sur la graine.

Le tableau 1 (voir page suivante) met en regard les diverses techniques décrites et les outils utilisés pour l'obtention de nouvelles variétés végétales. Quelques remarques en découlent.

- S'il est possible de dégager schématiquement trois périodes, ce type d'exercice a surtout un rôle didactique. En effet, aucune de ces périodes ne s'éteint. Chacune se perpétue et apporte à la suivante les éléments qui permettent d'avancer avec une meilleure connaissance des systèmes mis en jeu.
- Le développement des outils repose sur des phénomènes déjà présents dans la nature. L'homme accélère, développe, intensifie ou exacerbe des mécanismes déjà existants.
- Si la sélection, l'hybridation, la mutagenèse et même, dans une certaine mesure, la transgénèse reposent sur des processus naturels, ces derniers se produisent soit à un

rythme très lent soit avec une probabilité très faible. Seules, leur accélération et leur amplification ne sont pas naturelles. Elles restent utiles pour des raisons pratiques.

- Il convient donc de s'interroger non pas sur les outils eux-mêmes mais sur l'utilisation qui en est faite. Cette réflexion est essentielle.
- Le choix des outils doit tenir compte des besoins, des possibilités de réalisation des objectifs et des contraintes sociales, économiques et environnementales.
- Il convient d'assurer la conservation des ressources génétiques initiales pour permettre un retour aux situations antérieures, si nécessaire.
- La compréhension globale des phénomènes naturels est loin d'être acquise. Le champ de la connaissance est de très loin inférieur à celui qui reste à découvrir dans des domaines comme la physiologie végétale, l'expression des gènes ou les interactions avec le milieu. Dans ce contexte, il est important de renforcer le suivi de l'ensemble des nouvelles variétés afin de pallier aux nouvelles évolutions prévisibles et de garantir la perpétuité des phénomènes naturels observés.

Tableau 1 – Représentation schématique de l'évolution des techniques d'amélioration des variétés.

Période	Technique	Outil
pré scientifique scientifique biotechnologique	sélection	choix
	hybridation	hybridation interspécifique
		hybridation intraspécifique
		hybridation élargie
	mutation	mutagenèse physique / chimique
		mutagenèse somaclonale
		polyploïdie
	culture cellulaire	multiplication de masse
		plantes stériles
		hybridation somatique
		haploïdes et doubles haploïdes
	biologie moléculaire	transgénèse
		cisgénèse
		sélection génomique
		tilling

3. Le choix des caractères à améliorer

3.1. Quelques remarques

Les plantes sont remarquables par leur aptitude unique à utiliser l'énergie solaire pour produire leur propre énergie afin d'extraire des nutriments du sol, le carbone de l'air et ainsi produire de nouveaux constituants biologiques. Afin de clarifier quelques idées majeures, nous pouvons essayer d'imaginer une véritable "voiture végétale". Son réservoir est inutile, son énergie venant de sa carrosserie couverte de chloroplastes et invariablement verte. Cette couleur constitue un défaut sachant que le blanc et le noir ainsi que leurs dérivés constituent plus de 70 % des achats de voitures neuves en Europe. Son coffre est toujours plein de glucides, lipides et/ou protides, mais uniquement à certaines périodes de l'année. Cela fournit certainement beaucoup d'avantages mais nuit tout autant à ceux qui voudraient se soustraire à l'influence des saisons. Ainsi, dans la nature, les avantages de certains caractères peuvent être contrebalancés par des inconvénients tout autant biologiquement incontournables.

Pour répondre aux besoins alimentaires croissants des populations humaines, en quantité ou en qualité, l'homme a essayé, dès le début de l'agriculture d'améliorer les plantes qu'il cultivait, par une méthode empirique de sélection ou par un simple choix. En conservant les graines des plantes les plus performantes comme semence ayant un meilleur rendement ou une plus grande capacité de résistance aux conditions du milieu, l'homme a modifié l'aspect et les performances des plantes cultivées. Corrélativement, le nombre d'espèces végétales utilisées est passé de plusieurs milliers à quelques 150 espèces cultivées à grande échelle dont seulement sept céréales (blé, maïs, sorgho, riz, orge, mil, triticales) représentent en volume la moitié de l'alimentation humaine.

Pour revenir à l'exemple ci-dessus, cette voiture végétale ne donne pas satisfaction, si on la souhaite blanche. On a là ce qu'on peut appeler un objectif de sélection. On peut maintenir cet objectif pendant très longtemps. C'est ce qui s'est passé dans le domaine végétal où la possibilité de bons rendements a été longtemps le but principal de sélection. Pour mesurer le rendement, il est possible d'évaluer le nombre de quintaux de blé par hectare, d'abricots par arbre ou par verger, ou le nombre de fleurs par tige ou par rosier. Dans le cas du blé, au niveau du champ, il est impossible de repérer le sujet initiant le meilleur rendement. Mais, il est possible de compter le nombre de grains par épis. Compter, peser, mesurer, lire sont autant d'actions pour exercer un choix afin d'aboutir à l'objectif poursuivi. Ces actions mesurent ou évaluent des critères de sélection.

Comme souhaité, le travail va donc consister à obtenir une voiture végétale de plus en plus blanche. Sa couleur peut être évaluée avec un nuancier ou par l'intermédiaire d'un colorimètre. Les valeurs obtenues sont autant d'indices de sélection. En faisant un mélange des valeurs obtenues sur ce même critère de sélection (la couleur), on obtient un nouvel indice de sélection parfois appelé index (terme normalement réservé à des ensembles plus complexes). Il est envisageable également de vouloir un coffre plus grand. C'est un second objectif de sélection. Comme cette voiture a la capacité de grandir et de se renouveler, on va favoriser les sujets avec un plus grand coffre. On utilise trois critères de sélection (la hauteur, la largeur et la profondeur) que l'on combine en un seul indice de sélection (le volume) sur lequel on opère le choix. L'intrication des trois termes montre l'impérieuse nécessité de bien définir à chaque étape les objectifs de sélection visés, les critères de sélection utilisés et les indices de sélection retenus. Mais cette chaîne de décisions ne fonctionne pas dans les deux sens. Il serait illusoire de croire que si on possède une voiture blanche, c'est uniquement parce qu'on l'a choisie. Une multitude de facteurs sont intervenus : sa disponibilité, son prix, sa motorisation, son habillage intérieur en rapport avec la couleur, l'influence du voisinage, etc.

Mais, si on a une voiture totalement blanche, il n'y a plus de chloroplaste et elle ne fonctionne plus. C'est un dur retour à la réalité. Le produit final n'est *in fine* que la somme des divers choix opérés, des effets du hasard et des contraintes biologiques. C'est peut-être cela aussi que de travailler en biologie. "La plus belle vie possible m'a toujours paru être celle où tout est déterminé soit par la contrainte des circonstances soit par de telles impulsions, et où il n'y a jamais la place pour aucun choix" (Simone Weil).

3.2. De la théorie à la pratique

La théorie veut qu'un choix judicieux des objectifs de sélection repose sur une étude préalable des systèmes de production, incluant les localisations, de manière à déterminer objectivement la contribution respective de chacun des caractères à une fonction sociale, environnementale ou économique globale. Cette vision synthétique est celle des sélectionneurs. Elle permet d'optimiser le choix des caractères à améliorer simultanément, compte tenu de leurs relations génétiques et phénotypiques.

Cette démarche complexe est à la base du travail de sélection. Elle doit être gardée en mémoire lorsqu'on aborde l'incorporation d'un gène particulier. Il est aisément compréhensible que ces travaux lourds d'introgression sont entrepris sur des variétés déjà sélectionnées. Cette considération permet de bien faire la différence entre l'élément de transformation et le nombre de variétés qui la contiennent. Ainsi, d'après le catalogue européen, chez le maïs pour un événement de transformation (Bt Mon810) plus de 150 variétés ont été produites par une dizaine de sociétés. Les nouvelles biotechnologies tendent ainsi à susciter la création de lignées ou de souches spécialisées, améliorées en vue d'une utilisation particulière dans un plan plus vaste de mise en valeur faisant intervenir une première étape avec croisements et sélection, avant un nouveau processus de sélection.

Cette première phase avant spécialisation permet de contourner les problèmes soulevés par les liaisons négatives qui existent entre caractères de production, de vitesse de croissance, de précocité, de teneur en divers composants, etc. Les exemples sont nombreux. Chez le blé tendre, il existe une corrélation négative entre le taux de protéine et le rendement. De même, pour la féverole, une corrélation négative est mise en évidence entre la précocité et la résistance au froid. Cela explique qu'il n'existe pas encore de variété précoce et très résistante au froid. Les variétés tardives d'hiver sont intéressantes du fait de l'allongement de la durée de leur cycle qui contribue à leur bon rendement. Pour la pomme de terre, un schéma simple des diverses corrélations permet d'entrevoir la complexité du problème (figure 1).

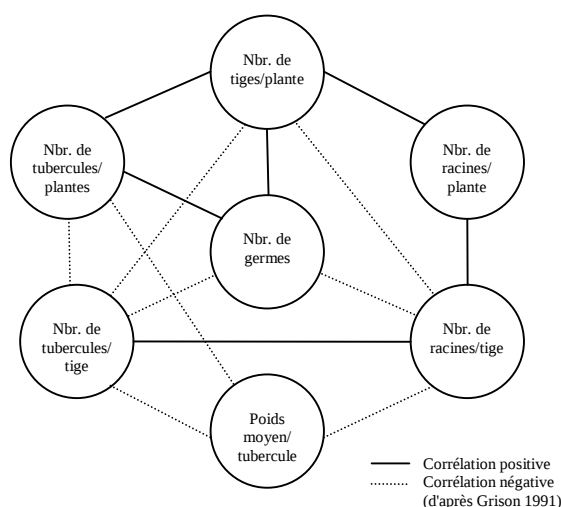


Figure 1 : Relation entre le nombre de germes, le nombre d'organes de la plante et le poids moyen par tubercule

L'objectif de sélection clairement défini, le problème est de choisir un ou plusieurs critères de sélection correspondant à cet objectif, c'est à dire de définir le ou les caractères sur lesquels seront effectivement jugés les sujets. Les qualités essentielles d'un bon critère de sélection peuvent être rapidement résumées. Il doit avoir une forte corrélation avec l'objectif, de façon à ce que le progrès obtenu par sélection sur ce critère se traduise par un progrès au niveau de l'objectif. Il doit être facilement mesurable, dans le cadre d'une technique standardisée, fidèle, précise et aussi bon marché que possible.

Le choix des critères de sélection dépend largement du mode d'expression des caractères retenus pour travailler.

- Certains caractères ne s'expriment que tardivement dans la vie de la plante. On choisit alors un critère d'expression plus précoce. Ainsi, dans la sélection des légumineuses des caractères liés au développement final sont mesurés très tôt en créant des conditions artificielles de croissance. C'est le cas pour les caractères liés à la bonne vigueur de croissance au stade juvénile, la réponse positive de la plante aux densités élevées de population, la tolérance à l'ombrage, la capacité de fixation symbiotique, etc.
- Certains caractères ne s'expriment que pour un seul sexe. Ce problème est particulièrement fréquent dans le monde animal. Cependant, si les plantes à fleur sont majoritairement hermaphrodites (96 %), l'existence chez certaines plantes d'individus ne portant que des fleurs femelles et d'autres que des fleurs mâles complique le travail de sélection pour ces espèces. Par exemple, pour la culture du palmier dattier, les phœniciculteurs doivent disposer judicieusement les pieds mâles parmi les pieds femelles porteurs de fruits. Le houblon et le chanvre font partie de ces plantes dioïques. Dans le cas du pistachier, un gène de production lié au sexe a été mis en évidence.
- Certains caractères ont une expression étalée tout au long de la vie des plantes, il convient alors de cumuler une information discontinue pour établir des indices de sélection. Cette situation est difficile à gérer, chez les légumineuses, par exemple, l'observation des nodules précoces nécessite un arrachage de la plante ce qui empêche d'observer l'apparition des nodules tardifs.

L'établissement des indices de sélection, qui sont prédictifs de la valeur génétique propre des individus, permet de les comparer entre eux et donc de choisir les reproducteurs de la génération suivante. Leur construction suppose l'attribution à chaque individu d'une note phénotypique qui ne peut, en général, être la mesure brute du caractère considéré mais en dérive après diverses corrections selon les facteurs environnementaux. Ces notes individuelles sont combinées à partir de l'ensemble des informations disponibles pour obtenir l'estimation de la valeur génétique.

3.3. La notion d'hérabilité

Dans le processus de sélection décrit ci-dessus, avec fixation d'objectifs et mesures de critères, aucune hypothèse n'est posée sur la forme d'expression du caractère dans le génome. Plus exactement, une hypothèse très forte a été prise quasi inconsciemment et schématiquement résumée de la façon suivante : un caractère présent chez un individu se transmet plus ou moins complètement à sa descendance. Elle obéit complètement aux théories de Mendel, qui ont permis toutes les avancées. En effet, si cette vision peut être considérée comme exacte au niveau d'un individu, elle ne l'est plus complètement au niveau d'une population. La notion d'hérabilité, souvent confondue avec hérédité, devient essentielle. Elle introduit une notion statistique de variabilité d'expression d'un caractère entre individus au sein d'une même population. La génétique sous-jacente reste évidemment mendélienne.

L'objectif n'est pas ici de donner une définition scientifique de cette notion mais de montrer son importance. L'observation d'un phénotype donné résulte de l'expression de son génotype sur lequel agissent des facteurs environnementaux. En d'autres termes, l'observation globale d'un champ de blé résulte de l'expression variable des divers grains de blé germés sur lesquels ont agi des facteurs divers et variés propres à la localisation d'un grain de blé donné. On observe une variation phénotypique.

Cette variance phénotypique peut être décomposée comme la somme de la variance génétique, due à des différences inconnues entre génotypes, et de la variance des effets de milieu, due à des différences dans l'environnement entourant le développement des individus, souvent impossible à évaluer. De cette définition et incluant le cas d'une population génétiquement homogène où il n'y a pas de variance génétique, la variance phénotypique est toujours supérieure à la variance génétique. L'héritabilité est le rapport variance génétique sur variance phénotypique. Cette dernière étant toujours supérieure à l'autre, l'évaluation se situe toujours entre 0 et 1. L'héritabilité indique donc la proportion de la variation phénotypique d'une population qui est d'origine génétique. C'est une bonne évaluation de la part d'un caractère qui se transmet de génération en génération.

Il est aisé de comprendre que l'héritabilité d'un caractère est une notion relative à une population étudiée dans un milieu donné : ce n'est pas une mesure absolue pour un caractère et une espèce. Pour une population donnée, l'héritabilité évolue au cours du temps en fonction des changements de l'environnement, de l'effet de la sélection, de la perte ou du gain de diversité génétique (mutation, migration).

Ces restrictions étant posées, il importe de connaître la valeur de l'héritabilité d'un caractère donné. En effet, plus l'héritabilité d'un caractère sera forte (proche de 1) plus ce caractère sera facile à améliorer, puisqu'elle représente la part de la variation observée due à la génétique, le reste étant dû au hasard. Ainsi, pour le maïs, il est possible de donner les valeurs suivantes pour différents caractères :

- recouvrement de l'enveloppe (entre 0,6 et 0,7),
- hauteur du plan (entre 0,5 et 0,6),
- longueur de l'épi (entre 0,4 et 0,5),
- nombre d'épis (aux environs de 0,2),
- rendement (entre 0,1 et 0,15).

3.4. Quelques remarques complémentaires

La création de nouvelles variétés végétales nécessite une somme d'opérations qui sont toutes plus ou moins aléatoires :

- recherche, isolement, croisement d'individus possédant des caractères souhaités,
- examen des descendants de ces parents,
- recherche des individus réunissant le plus grand nombre possible de caractères désirables,
- croisement de plusieurs individus ainsi sélectionnés avec d'autres génotypes,
- isolement en favorisant l'autofécondation, pour créer d'autres générations de descendants dont chacune sera testée (rendement, qualité, résistance, etc.).

L'amélioration des plantes, fondée sur les hybridations, demeure un procédé relativement lent et parfois problématique. Dans quelques cas, cette méthode d'amélioration classique a donné lieu à des descendants dont les effets sur la santé humaine se sont révélés délétères. Deux variétés de pommes de terre de descendance classique, par exemple, ont dû être retirées du marché en raison de leur teneur trop élevée en glyco-alcaloïdes. Un problème similaire est survenu dans le cas d'une souche de céleri sur le point d'être approuvée à des fins de distribution commerciale. On a, in-extremis, constaté qu'elle provoquait de l'eczéma de contact chez les travailleurs agricoles.

Lorsque la demande en nouvelles variétés devient plus forte et pressante pour des raisons économiques, sociales et/ou environnementales, il importe de travailler à partir de variétés reconnues et à moindres risques en laissant une part plus faible aux côtés aléatoires des croisements. C'est dans ce sens que de nouvelles techniques ont été mises au point.

3.4.1. Le transfert de gènes direct au sein d'une même espèce et entre espèces

Vers la fin des années 1970, des recherches sur une maladie ont abouti à la découverte d'un mécanisme naturel de transfert de gènes propre aux végétaux. La bactérie pathogène *Agrobacterium tumefaciens*, responsable de la maladie de la galle du collet chez un grand nombre de plantes, colonise la plante hôte et transfère un nombre limité de ses propres gènes directement et de manière permanente dans le génome des cellules formant la galle. Une fois insérés dans le génome de ces cellules, ces gènes bactériens contrôlent partiellement le métabolisme de manière à procurer un abri (la galle visible) et de la nourriture aux bactéries envahissantes.

L'observation de ce mécanisme naturel de transfert des gènes a suscité une vague de recherches connexes. Elles ont permis de découvrir que le processus de transfert des gènes d'*Agrobacterium* était sans lien direct avec la nature des gènes transférés. En d'autres termes, il y a dissociation entre le bout d'ADN transporteur et celui transporté. La possibilité d'introduire dans le génome des cellules de la plante n'importe quel autre fragment d'ADN en provenance de plantes, d'animaux ou de microbes apparaissait par appropriation du système *Agrobacterium* et transformation de ce dernier en véhicule apte à transférer de nouveaux gènes dans des plantes.

Cette découverte a cassé l'un des dogmes les plus anciens de la génétique : celui de l'incompatibilité des génomes d'espèces différentes, a fortiori de règnes (animal, végétal ou microbien) différents. Une limite de ce processus réside dans le fait que cette bactérie n'infecte pas aussi aisément toutes les espèces de plantes. Pour des plantes d'importance commerciale, notamment les céréales et les conifères, d'autres véhicules doivent être utilisés : soit d'autres souches d'*Agrobacterium* soit d'autres organismes (bactéries ou virus).

Par rapport aux autres méthodes utilisées dans l'amélioration des espèces végétales, ces techniques de transformation cellulaire à l'aide d'*Agrobacterium* ou d'un autre véhicule à gènes ne peuvent transformer qu'un pourcentage infime des cellules du tissu de la plante traitée. Pour créer une plante transformée constituée uniquement de cellules portant le nouveau gène, il faut réussir deux autres étapes :

- réussir à produire une plante entière exclusivement à partir d'une ou de plusieurs des cellules transformées,
- éliminer toutes les cellules non transformées dans le cadre de ce processus.

La régénération d'une plante s'avère souvent plus difficile à réaliser que le processus de transfert de gènes lui-même. La compréhension fine du développement d'une telle plante se limite, encore, à des connaissances empiriques.

L'élimination des cellules non transformées s'effectue habituellement en injectant simultanément un deuxième gène marqueur de sélection. Par exemple, ce gène marqueur code pour une enzyme ; son expression dans chaque cellule transformée confère à la cellule la capacité de survivre en présence d'un agent de sélection (un antibiotique, un herbicide ou tout autre anti-métabolite). S'il s'agit d'un antibiotique, le gène marqueur de sélection induira la production d'une enzyme conçue pour détruire l'antibiotique en question, permettant ainsi à la cellule d'échapper à l'empoisonnement. Seules les cellules transformées survivent.

Si la technique est globalement au point, il convient de souligner, cependant, que la population de plantes transformées est loin d'être homogène. En effet, le transfert de gènes entraîne l'insertion aléatoire de bouts d'ADN. Son implantation dans le génome récepteur est donc impossible à prédire. Les interactions qui peuvent exister dans la nouvelle plante entre le transgène et les autres gènes sont complètement aléatoires.

L'examen de la population transgénique et la sélection des individus, qui expriment le transgène d'une manière appropriée et utile, exige beaucoup de temps, d'effort et de compétence. De plus, elle peut être porteuse de gènes non souhaités ultérieurement, notamment celui ayant servi au marquage de la population sélectionnée. Un nombre limité de souches, affichant la stabilité nécessaire du caractère voulu lors des essais en laboratoire ou en serre, sera finalement sélectionné pour des fins de tests et d'analyses plus poussées, y compris des essais en conditions réelles à divers endroits pendant des années.

Finalement, cette technique, novatrice dans sa phase d'incorporation, se rapproche du processus utilisé pour l'évaluation de nouvelles variétés de cultures vivrières issues de techniques d'amélioration classiques lorsqu'il s'agit d'établir, par exemple, si leur rendement est supérieur à celui des variétés existantes.

Dans ce contexte, il apparaît clairement que la transgénèse n'apporte pas plus de rapidité dans le processus d'obtention variétale, mais qu'elle est un élément déterminant lorsqu'elle permet d'introduire des gènes (parfois de la même espèce) ayant une régulation différente, par exemple en surexpression des canaux Na^+/H^+ de la vacuole et donnant ainsi des plantes qui résistent au sel (tabac, tomate), et qu'elle est alors une source notable de variabilité génétique.

La transgénèse n'est alors qu'un outil supplémentaire au service des sélectionneurs. Comme tous les outils, elle doit être utilisée judicieusement. Dans un avenir proche, on parviendra à une grande précision dans la connaissance du génome, grâce à l'amélioration des techniques de séquençage. Le gain de sécurité sur le choix du gène d'intérêt recherché sera sans nul doute plus important. La transgénèse est alors l'outil indispensable pour gagner du temps sur les phases de recherche et de choix et pour répondre ainsi plus rapidement aux besoins des divers acteurs.

3.4.2. Le génotypage et le phénotypage

La technique de réaction en chaîne par polymérase (PCR) qui met à la disposition des chercheurs des quantités manipulables d'ADN pour en permettre la caractérisation, a pris une place considérable. Couplée avec diverses réactions enzymatiques, elle rend possible la lecture de l'ADN, c'est à dire le déchiffrement de l'enchaînement des divers nucléotides qui composent un fragment donné ou la totalité d'un génome.

Cette lecture séquentielle de tout ou partie de l'ADN composant le génome d'une espèce donnée est le séquençage. Des logiciels d'annotation agrègent les informations et prédisent, pas encore sans erreur, les gènes sur une séquence. Cette technique présente l'avantage de repérer des successions de lettres identiques (microsatellites) ou d'associations

spécifiques de lettres différentes et ainsi d'isoler des points particuliers appelés "marqueurs", qui prennent alors le nom des techniques spécifiques utilisées pour les mettre en évidence.

En génétique et surtout en amélioration génétique, une technique aussi simple et fruste de lecture n'est pas un handicap. Seules les différences entre individus sont, en effet, recherchées pour sélectionner les plus intéressants. Il convient en conséquence d'utiliser les techniques les moins coûteuses, les plus rapides, les plus faciles à mettre en œuvre, les plus fiables et robustes et enfin celles qui mettent en évidence le plus de polymorphisme entre les individus. Le tableau 2 donne un aperçu rapide des diverses techniques utilisables de repérage des marqueurs.

Marqueurs	RFLP Restriction Fragment Length Polymorphism	RAPD Random Amplified Polymorphic DNA	AFLP Amplified Fragment Length Polymorphism	SSR Simple Sequence Repeat (microsatellite)	SNP Single Nucleotide Polymorphism	DArT [®] Diverse Array Technology
Type	Co-dominant	Dominant	Dominant (présent/absent)	Co-dominant	Co-dominant	Dominant (présent/absent)
ADN requis	Micro-grammes Bonne qualité	Nano-grammes	Nano-grammes Bonne qualité	Nano-grammes	Nano-grammes	Nano-grammes Bonne qualité
Besoins	Long Sonde connue	Facile et rapide	Rapide si équipement disponible	Coût initial ++ Sans information sur séquences	Coût initial ++ Besoin d'information sur séquences	Services en prestation
Polymorphisme	++	+++	++++	+++	+++	++++
Transfert	Robuste	Faible répétabilité	Répétabilité moyenne	Robuste	Robuste	Robuste
Référence	Bolstein et al 1980	Williams et al 1990	Vos et al 1995	Tautz et Renz 1984	Rafalski 2002	Wenzl et al 2004

Tableau 2 – Comparaison de quelques marqueurs moléculaires (d'après A. Charrier 2009)

Sans aller plus profondément dans la connaissance de ces diverses techniques, quatre points essentiels sont à retenir.

- Les méthodes de lecture des divers nucléotides (génotypage) deviennent de plus en plus performantes, plus rapides et surtout beaucoup moins onéreuses à réaliser. Connaître le génome devient de moins en moins cher.
- Plus il y aura de marqueurs connus et bien répartis le long d'un fragment d'ADN répertorié, plus ce balisage permettra de se repérer dans le génome d'une espèce donnée.
- Dans le domaine de l'amélioration, la lecture de l'ADN ou la recherche de certaines balises, autrement dit le génotypage d'individus cherche à identifier une variation génétique à une position spécifique sur tout ou partie du génome. Le travail d'amélioration repose toujours et encore sur l'étude d'une variabilité détectée.
- Certes, il n'est pas nécessaire de connaître la totalité du génome pour pouvoir travailler. Mais, le lancement d'un programme de génotypage complet pour une espèce donnée est révélateur de travaux à venir. Quelques espèces ont déjà un génotypage complet (l'arabette, le riz, le blé, le maïs, le peuplier, la tomate, la pomme de terre, la vigne, le sorgho, le concombre, la fraise des bois, etc.). Le génotypage et le marquage du génome ne dispensent pas d'une étude approfondie des caractères recherchés (phénotypage).

L'étiquetage de nombreux gènes ou, mieux, de nombreuses liaisons entre gènes, donne l'espoir aux sélectionneurs d'associer des caractères agronomiques à des gènes marqueurs. Cette méthode est intéressante parce que les gènes d'intérêt agronomique sont nombreux avec des effets hiérarchisés, mais également parce qu'ils sont très modulés dans leur expression par les conditions de milieux et nécessitent de ce fait des analyses longues et coûteuses. En fait, l'espoir est que des marqueurs moléculaires simples puissent guider la génétique quantitative.

En d'autres termes, la relative stabilité de constitution du génome au sein des diverses espèces s'associe à l'extrême variabilité d'expression du phénotype d'une espèce donnée. L'objectif est alors de valoriser les connaissances acquises dans ces deux domaines pour un meilleur, plus rapide et sans doute moins coûteux choix du critère de sélection. Cette potentialisation des connaissances (génotypage et phénotypage) ne réduira sans doute que très peu la durée nécessaire à l'obtention de nouvelles variétés. Elle donnera la possibilité d'obtenir des variétés intégrant plus de caractères et répondant mieux aux contraintes sociales, environnementales et économiques. Des travaux importants restent à faire dans ce domaine.

La transgénèse n'est qu'un outil qui permet d'introduire une certaine forme de variabilité au sein d'une population. La plus grande source de variabilité d'une espèce se trouve au sein de l'ensemble des diverses variétés, souches, races et/ou individus particuliers qui la composent. L'ensemble constitue les ressources génétiques.

Il est aisément concevable que leur prise en considération devient complètement stratégique lorsqu'il s'agit de trouver de nouveaux marqueurs, de nouveaux critères ou de nouveaux caractères d'amélioration. Les ressources génétiques font partie intégrante de cet ensemble d'acquisition des connaissances nécessaires à l'obtention de nouvelles variétés qu'elles forment, aujourd'hui, avec le génotypage et le phénotypage. La figure 2 en donne une représentation simplifiée.

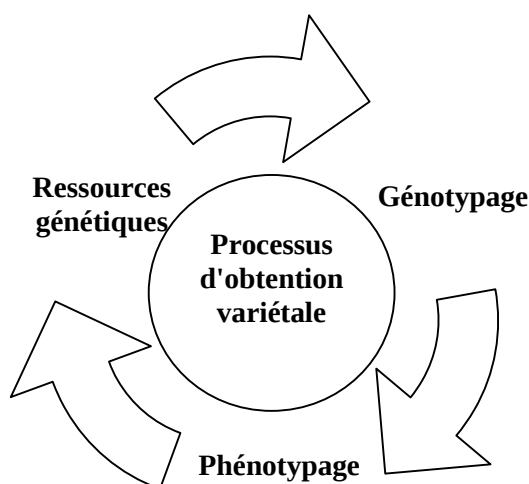


Figure 2 – Représentation schématique du cycle d'acquisition de connaissances nécessaire à un processus d'obtention végétale dynamique

Au niveau national, il apparaît que cet ensemble sera d'autant plus vertueux et dynamique qu'une panoplie claire de principes et de lois sera apte à protéger le travail fait par les différents acteurs tant publics que privés. Les données de génotypage peuvent rapidement être mises dans le domaine public, alors que celles décrivant les liens entre phénotype et génotype restent largement confidentielles et source d'échanges rémunérateurs.

L'État doit donc se positionner comme garant du travail réalisé par les obtenteurs quels qu'ils soient, en mettant en place un système de protection adapté aux nouvelles techniques employées et un mécanisme de conservation des ressources génétiques propre à en faciliter l'accès.

3.4.3. La sélection assistée par marqueurs ou sélection génomique

A partir des données de génotypage et de phénotypage, il est indispensable de mettre en évidence des liens qui unissent une séquence particulière de l'ADN et un caractère particulier. Les programmes traditionnels d'amélioration des plantes se fondent principalement sur l'évaluation des phénotypes dans plusieurs environnements. Le croisement repose sur un choix des meilleurs reproducteurs issus de populations les plus pures possible et pris dans des milieux similaires. Le pari réside dans l'espoir que le produit obtenu soit également adapté au milieu. La sélection génomique est une nouvelle approche qui combine des données de marquage de population lambda avec des données phénotypiques issues de populations de référence également génotypées.

Dans la pratique, la sélection génomique est appliquée à une population qui est différente de la population de référence pour laquelle les effets des marqueurs ont été estimés. Il est alors possible de faire un choix rapide des individus porteurs des marqueurs recherchés dans une population qui est déjà adaptée au milieu par exemple.

Il faut noter que si le gain de temps est appréciable pour l'isolement d'un individu intéressant, il est quasiment nul par rapport à la méthode traditionnelle, pour l'obtention d'une nouvelle variété. Il semblerait cependant qu'il soit possible d'intégrer plus de marqueurs et donc plus de caractères recherchés rendant les variétés obtenues en sélection génomique plus rapidement performantes.

Il convient de modérer cet enthousiasme. En effet, les résultats sont nettement positifs, lorsqu'il s'agit d'évaluer la variabilité d'une population, de rechercher les meilleurs croisements et d'étiqueter les gènes dont le repérage est coûteux. En revanche, la sélection génomique reste assez peu efficace lorsque les gènes du caractère recherché sont répartis en de nombreux points du génome et interagissent entre eux ou encore lorsque l'héritabilité de la caractéristique recherchée est faible.

Bien que l'on puisse, effectivement, attendre une aide à la sélection d'un caractère, par le marquage lié, il y a une certaine naïveté à croire qu'il va devenir possible de constituer un individu idéal porteur du plus grand nombre de gènes favorables. C'est faire abstraction des effets d'interaction entre les gènes et des effets de milieu. Tous ces phénomènes sont encore très mal connus. Comme la sélection traditionnelle ou la transgénèse, la sélection génomique fait partie des outils participant à la création variétale et renforce notre schéma antérieur (figure 2 voir page précédente).

Enfin, il faut se souvenir que les variétés sont issues d'une maîtrise parfaite des divers instruments de reproduction et de sélection. Elles existent grâce aux choix faits par les producteurs de semences répondant aux demandes des agriculteurs et des consommateurs. Une modification de ces dernières entraîne *de facto* un abandon de ces variétés qui sont alors appelées à disparaître. Ainsi aujourd'hui, les nouvelles biotechnologies permettent d'introduire un élément transformateur dans diverses variétés répondant déjà à des besoins établis et lui

conférant de nouvelles propriétés susceptibles de donner une réponse adaptée aux contraintes nouvelles sociales, économiques ou environnementales.

L'équation est alors relativement simple et se résume en deux points :

- Les variétés ne répondant plus totalement aux besoins du moment doivent être conservées pour permettre leur utilisation ultérieure sans repasser par un système important de croisements introduisant une part non négligeable de hasard. Cela passe par la mise en place d'une véritable politique nationale et européenne de conservation des ressources génétiques.
- Les producteurs de semences doivent être à même d'utiliser tous les outils nécessaires à la production de nouvelles variétés végétales aptes à répondre à la demande sociale, économique et environnementale. Cela passe par une meilleure formation et information sur les techniques mises en œuvre.

4. Un aperçu des travaux actuels

4.1. A la recherche de données

Au cours de deux précédents chapitres, des éléments de compréhension ont été donnés pour mieux aborder les biotechnologies agricoles. Le premier a été consacré aux outils, y compris les biotechnologies, utilisés par les sélectionneurs pour produire de nouvelles variétés de plantes. Si la sélection est devenue de plus en plus sophistiquée, les avancées ne se sont pas produites par le remplacement d'un outil par un autre, mais par une utilisation des moyens adaptés aux objectifs à atteindre. Le second chapitre a voulu montrer que si la formulation des objectifs de sélection est relativement simple, leur réalisation est toujours très compliquée et fait intervenir une multitude de facteurs. Les approximations et les généralisations dans l'emploi de certains termes entraînent des incompréhensions.

Les besoins des hommes changent avec l'évolution des modes de vie, des techniques de production et des modes de distribution. De nouvelles variétés remplacent les plus anciennes qui ne répondent plus aux besoins des producteurs, des transformateurs, des distributeurs et parfois des consommateurs. Des étapes importantes, parfois infranchissables séparent les souhaits de leur réalisation. Elles sont de nature technique, économique, environnementale, sociale ou éthique. Et l'obtention de la variété finale utilisable ne fait ressortir ni la prise en compte des contraintes ni la somme de travail nécessaire.

Les réflexions qui suivent, se situent à ce moment précis où les choix doivent être exercés pour permettre d'obtenir les variétés végétales utiles aujourd'hui ou dans 20 ou 30 ans. Dans ce rapprochement des besoins et des outils, il est difficile de se positionner à l'exact endroit où devront se prendre les décisions. Par contre, il doit être possible d'établir un point de vue permettant de favoriser soit l'utilisation de certains outils soit l'exercice d'un choix sur les critères à sélectionner.

En agriculture, les avancées ne peuvent se satisfaire d'arguments généralistes. En effet, il est vrai que certaines biotechnologies sont utilisées depuis fort longtemps pour la production de pain, de vin, de bière, de fromage ou de quelques médicaments. Elles ne sont également que l'amplification de phénomènes naturels et elles visent un but très louable qui est de satisfaire les besoins humains. Mais, cette utilité de l'outil n'est pas la question posée par notre société. Les biotechnologies sont des techniques qui utilisent des organismes vivants ou une partie de ceux-ci pour obtenir un autre organisme. La référence à la nature devient essentielle. Elle interroge en termes d'éthique, de bénéfices et de risques.

Une plante transgénique contient un gène artificiellement introduit autrement que par pollinisation. Le gène étranger (transgène) peut provenir d'une plante voisine ou d'une espèce complètement différente. Depuis longtemps, les sélectionneurs introduisent, par croisements successifs, des gènes d'une plante dans une autre plante voisine. Ils le font par la voie du pollen. La lenteur de cette voie est considérée comme un gage d'épuration. Elle permettrait d'aboutir à un produit final immanquablement "bon pour l'homme".

En toile de fond, la question "la nature fait-elle bien les choses" ne manque pas de surgir. Les facteurs agissant sont nombreux et les réponses multiples. Les débats sont sans fin et il est probablement impossible de dire ce qui bon ou mauvais pour la nature. Les modifications actuelles dans l'obtention des nouvelles variétés végétales naissent de la multitude des souhaits exprimés par les divers acteurs et des nouveaux développements des techniques aptes à leur répondre. La question est de savoir si la demande est justifiée et raisonnable et si les moyens mis en œuvre pour y répondre sont acceptables et prudents.

Les données permettant d'appréhender et de comprendre ce processus sont rares ou difficiles à obtenir soit parce qu'elles procèdent d'une idéologie particulière rendant malaisée l'interprétation, soit parce qu'elles relèvent d'investissements économiques pour lesquels une certaine confidentialité se comprend.

Toutefois, il nous a été possible d'utiliser deux jeux de données : une source issue de la revue de presse hebdomadaire du GNIS (dite "source GNIS") et une autre issue du site Internet de l'Institut pour la santé et la protection du consommateur du Centre commun de recherche de la Commission européenne (European Commission Joint Research Center, dite source SNIF).

4.2. La source GNIS

Le GNIS (Groupement national interprofessionnel des semences et plants) publie de façon régulière une revue de presse réservée à ses professionnels. "Semences Webdo" a pour objectif d'être le reflet des principaux articles concernant la filière semences parus au cours d'une semaine. Sous le titre de chaque article, sont repris le contenu, et les opinions exprimées par les rédacteurs et journalistes des articles cités. En aucun cas, elle ne représente la position du GNIS. Il semble que cette source donne une très bonne image de ce qui se passe dans la filière semencière française.

A partir des années 2009 et 2010 et quelques mois de 2011, soit un ensemble d'à peu près 80 revues de presse, environ 2 500 résumés étaient disponibles. Par une étude de mots sur cette base ont été isolés 222 résumés contenant au moins un outil et/ou un critère de sélection variétale, comme définis dans les chapitres antérieurs.

Ce travail a permis d'isoler 206 caractères recherchés en sélection avec de nombreuses redites (par exemple, le critère "rendement" est trouvé 31 fois avec diverses associations). Une uniformisation des termes a été réalisée en conservant par espèce les mots rencontrés dans les divers résumés conservés. Ainsi pour le blé, les termes "adaptation à la sécheresse" et "résistance aux conditions pédoclimatiques" ont été conservés alors qu'ont été associés, pour la betterave, le terme général de "résistance aux conditions climatiques" et, pour la féverole, celui de "résistance à la sécheresse". Si, pour les caractères, les termes rencontrés ont été globalement respectés, pour les outils, une interprétation des données a été faite. Quarante espèces végétales ont été isolées montrant une très grande diversité allant des plantes de grandes cultures (blé, betterave), aux fruits (fraise), aux légumes (asperge, aubergine) ou aux espèces moins répandues (quinoa). Les résultats sont donnés au tableau 3 (voir page suivante).

Compte tenu du caractère partiel des données, l'étude n'avait pas l'ambition de dégager par espèce les nouvelles variétés qui pourraient arriver sur le marché dans les 20 prochaines années. Elle permet de tracer les grandes tendances actuelles et d'obtenir ainsi, à travers les articles de la presse agricole française, une image des principaux sujets de discussion sans présager de la réalisation future.

Les éléments suivants sont apparus :

- Le croisement reste l'outil majoritairement utilisé pour l'obtention de nouvelles variétés quelle que soit l'espèce considérée en sélection.
- Lorsque des techniques modernes sont utilisées (transgénèse par exemple), elles sont complétées par les méthodes dites traditionnelles.
- Si la recherche d'un meilleur rendement reste toujours présente, la prise en compte de facteurs techniques et environnementaux est très importante.

Tableau 3 – Aperçu des travaux d'amélioration des principales espèces à partir des données de Semences Webdo (source GNIS 2009 – 2010).

Espèces	Années	Caractères	Outils
Asperge	2010 2011	Gamme d'asperges verte et blanche Résistance à la fusariose Variétés précoces Tolérance aux maladies Qualités gustatives	Croisement Sélection variétale
Aubergine	2009	Résistance aux ravageurs (Inde)	Transgénèse
Betterave	2009 2010 2011	Rendement Résistance aux ravageurs Résistance aux conditions climatiques Résistance aux herbicides Assimilation azote Résistance à la maladie du feuillage Résistance aux nématodes Résistance à la rhizomanie	Croisement Sélection variétale Transgénèse Décryptage du génome
Blé Blé tendre Blé dur	2008 2009 2010 2011	Adaptation à la sécheresse Adaptation aux conditions pédoclimatiques Efficacité / azote Productivité Qualité de panification Réduction des intrants Rendement Résistance au piétin-verse Résistance aux maladies Résistance aux mycotoxines Résistance à la carie du blé Résistance à la cécidomyie orange Résistance à la fusariose et à la septoriose Résistance à la rouille brune Richesse en protéines	Croisement Sélection variétale Décryptage du génome Sélection génomique Transgénèse
Carotte	2009 2010 2011	Résistance aux maladies Qualités nutritives renforcées Rendement Précocité Résistance au stress hydrique	Croisement
Chicorée Laitue	2009 2010	Diversification de forme Diversification des couleurs Faiblesse des déchets Multifeuilles Qualité du blanchiment Résistance à la nécrose Résistance au Brenia Résistance aux maladies	Sélection variétale
Chou Chou-fleur Brocoli	2009 2010 2011	Adaptation aux zones de production Brunissement après cuisson Coloration Critères technologiques Enrichissement Mini-légumes Qualité du feuillage Résistance aux maladies	Croisement Sélection variétale
Colza	2009 2010 2011	Adaptation locale Composition en huile Rendement Résistance à l'orobanche Résistance à un herbicide Résistance au phoma Sensibilité aux stress	Croisement Sélection variétale Mutagenèse Sélection génomique Séquençage du génome
Courgette	2011	Formes et couleurs Précocité Résistance aux virus	Sélection variétale
Endive	2009	Rendement	Sélection variétale Phénotypage
Epinard	2009 2010 2011	Qualité du feuillage Résistance à l'anthracnose et à la cladosporiose Résistance au mildiou Résistance fongique	Sélection variétale
Féverole	2010	Résistance à la sécheresse Résistance à l'anthracnose Résistance au mildiou	Sélection variétale
Flageolet	2011	Finesse Homogénéité de couleur Port	Sélection variétale

Espèces	Années	Caractères	Outils
Fourrages	2009	Résistance aux maladies Qualité	Sélection génomique
Fraise	2010	Critères physico-chimiques et sensoriels Régularité qualitative Teneur en sucre	Sélection variétale Croisement
Haricot	2010 2011	Adaptation à la mécanisation Nain Résistance aux maladies Sans fil	Sélection variétale Croisement Hybridation
Lentille	2010	Rendement	Sélection variétale
Lotier	2010	Valeur agronomique	Sélection variétale Transgénèse
Lupin	2010	Résistance au froid	Sélection variétale
Maïs	2009 2010	Production améliorée de bêta-carotène Rendement Résistance à la sécheresse Résistance aux maladies (helminthes)	Sélection variétale Croisement Hybridation Mutagenèse Sélection génomique Séquençage du génome Transgénèse
Melon	2010	Résistance à la fusariose	Sélection variétale
Orge	2008 2010	Pouvoir diastasique Rendement Résistance à la sécheresse Résistance à l'oïdium Résistance au jaunissement Résistance aux maladies Teneur en protéines	Sélection variétale Hybridation, Sélection génomique Séquençage du parasite Transgénèse
Patate douce	2009	Richesse amylose	Transgénèse
Pois Pois d'hiver Petit pois	2009 2010 2011	Critères agronomiques Précocité Rendement	Sélection variétale
Pomme de terre	2009 2010 2011	Indice glycémique Résistance au mildiou Résistance aux maladies Résistance aux nématodes à kystes Résistance aux ravageurs Résistance polygénique Teneur en amylose faible	Sélection variétale Cartographie du génome Cisgénèse Marqueurs moléculaires Sélection génomique Transgénèse
Quinoa	2010	Intérêt agronomique	Sélection variétale
Radis fourrager	2010	Résistance aux conditions climatiques	Sélection variétale
Ray Gras	2009 2010	Densité Diminution de la teneur en lignine Finesse du feuillage, Gain de rendement en fourrage Qualité Rendement fourrager Résistance à la rouille Résistance à la sécheresse	Croisement Sélection variétale
Riz	2009 2010 2011	Consommation moindre d'eau Lutte contre le changement climatique Rendement Riz sans cuisson	Sélection variétale Séquençage du génome Transgénèse
Seigle	2010	Rendement Résistance aux maladies	Sélection variétale
Soja	2009 2010	Assimilation de l'azote atmosphérique Augmentation de la teneur en huile Qualité de l'huile Résistance à la rouille	Séquençage du génome Transgénèse
Tomate	2010 2011	Caractères agronomiques Rendement Résistance aux ravageurs	Sélection variétale Sélection génomique
Tournesol	2009 2010 2011	Richesse en huile Résistance au mildiou Rendement Tolérance aux herbicides	Sélection variétale Mutagenèse Séquençage du génome
Triticale	2009	Résistance à l'oïdium Rusticité	Sélection variétale Croisements
Vigne	2010	Résistance au virus du court noué	Porte greffe transgénique

- Des facteurs de résistance à des pathologies diverses sont quasi généralisés à toutes les espèces, mais il n'a pas été possible d'en dater la prise en compte.
- Des caractères liés aux besoins exprimés par les consommateurs, encore difficiles à déceler, commencent à apparaître chez certaines espèces (qualités gustatives des asperges et des carottes, formes et couleurs des courgettes, haricots sans fil, riz sans cuisson, etc.).

4.3. La source SNIFs

Dans le cadre de la directive européenne 2001/18/CE du 12 mars 2001 relative à la dissémination volontaire d'organismes génétiquement modifiés dans l'environnement, il est fait obligation à une organisation qui souhaite procéder à la dissémination volontaire d'un OGM ou d'une combinaison d'OGM d'adresser auparavant une notification à l'autorité compétente de l'Etat membre du territoire où la dissémination doit avoir lieu.

Le Centre commun de recherche (CCR) (European Commission's Joint Research Centre ou JRC) de la Commission Européenne travaille depuis plus de dix ans au développement d'outils appropriés pour répondre à cette obligation. L'Institut pour la protection de la santé et des consommateurs (IPSC, Institute for Health and Consumer Protection ou IHCP), grâce à son laboratoire de référence européen, valide les méthodes analytiques standardisées pour la détection et la quantification des OGM dans l'alimentation humaine et animale. Il doit également publier l'ensemble des informations résultant de cette directive européenne.

Il est compréhensible que cette information, du fait de sa complexité, soit difficilement accessible au citoyen ordinaire. Par décision du Conseil du 3 octobre 2002 (2002/81 3/EC), un formulaire de synthèse de notification (Summary Notification Information Format set SNIFs) doit être rempli par les demandeurs. Il répond à la nécessité de permettre l'échange le plus large possible d'informations pertinentes, présentées d'une manière uniforme et facilement compréhensible, sans préjudice du fait que les informations ainsi fournies ne sauraient servir de base à une évaluation des risques pour l'environnement.

Il est ainsi possible de consulter aisément l'ensemble de ces notifications déposées depuis le 17 octobre 2002. La base de données est accessible à partir du lien suivant : <http://gmoinfo.jrc.ec.europa.eu/>

Sur le même site, il est possible de collecter les statistiques des données relatives aux demandes faites sous l'ancienne directive 90/220/CE. Les données les plus remarquables sont synthétisées au tableau 4 (voir page suivante).

Une première lecture montre qu'il y a eu 2 297 demandes depuis 1991. Elles se répartissent sur une soixantaine d'espèces. Toutes les espèces sont quasiment représentées. Les demandes intéressent à la fois les diverses céréales, les espèces de grandes cultures, les légumes, les fruits et les arbres forestiers. Le maïs représente à lui seul 1/3 des demandes. D'autres espèces (betterave, colza, et pomme de terre) dominent ensuite nettement le tableau avec plus de 10 % des notifications. Des demandes comprises entre 1 % et 5 % des données sont observées pour le blé, la chicorée, le coton, le riz, le tabac et la tomate.

Le quart des demandes provient de la France puis de l'Espagne (18 %) et enfin de l'Italie (12 %). On trouve ensuite la Grande Bretagne (10 %), l'Allemagne (8 %), la Belgique (5 %) et la Suède (4 %).

Il apparaît donc que les biotechnologies agricoles et principalement ici l'utilisation de la transgénèse est largement répandue en Europe. Elle intéresse tous les pays et toutes les espèces végétales.

Tableau 4 – Répartition des notifications depuis 1991 entre les espèces et les pays (Source : IPSC 2011)

Espèces	Nom commun	Pays																						Total
		AT	BE	CZ	DE	DK	ES	FI	FR	GB	GR	HU	IE	IS	IT	LT	NL	NO	PL	PT	RO	SE	SK	
<i>arabidopsis thaliana</i>	Arabette					2																5		7
<i>solanum melongena</i>	Aubergine														10									10
<i>beta vulgaris</i>	Betterave		15		27	31	30	5	73	43	2		4	42		27						12		311
<i>triticum aestivum</i>	Blé		2		5		9			12		1		5										34
<i>betula pendula</i>	Bouleau							5																5
<i>brassica oleracea</i>	Brocoli		5					3									2					0		10
<i>canephora</i>	Caféier								1															1
<i>daucus carota</i>	Carotte																3							3
<i>chicorium intybus</i>	Chicorée		13						5	4				16		10								48
<i>dendranthema indicum</i>	Chrysanthème																1							1
<i>citrus sinensis x poncirus trifoliata</i>	Citrange						3																	3
<i>citrus sp.</i>	Citron													1										1
<i>cucumis sativus</i>	Concombre																	1						1
<i>brassica napus</i>	Colza		50		40	4	3	2	116	106				4	1	15						38		379
<i>gossypium hirsutum</i>	Coton						51		1		10													62
<i>cucurbita pepo</i>	Courge						2		1					3										6
<i>picea abies</i>	Épicéa							2																2
<i>festuca arundinacea</i>	Fétuque élevée								2															2
<i>fragaria fragaria x frag. ananassa</i>	Fraisier						2			1				5										8
<i>rubus idaeus</i>	Framboisier													1										1
<i>odoratissimum</i>	Géranium													1										1
<i>eucalyptus globulus</i>	Gommier bleu																			1				1
<i>eucalyptus grandis</i>	Gommier rose						1			2														3
<i>actinidia deliciosa</i>	Kiwi													3										3
<i>lactuca sativa</i>	Laitue								7					1										8
<i>otolepis</i>	Limonium													3										3
<i>linum usitatissimum</i>	Lin			1														1				1		3
<i>lilium longiflorum</i>	Lis			1																				1
<i>medicago sativa</i>	Luzerne		1				1																	2
<i>zea mays</i>	Maïs	1	28	4	30	7	221		280	7	6	25		98	1	17		5	18	21	2	5		776
<i>osteospermum ecklonis</i>	Marguerite du cap													17										17
<i>cucumis melo</i>	Melon						4		3					1				1						9
<i>prunus avium</i>	Merisier													3										3
<i>solanum nigrum</i>	Morelle noire				7																			7
<i>brassica juncea</i>	Moutarde			3																				3

		Pays																						
<i>brassica rapa</i>	Navet							1													2		3	
<i>dianthus caryophyllus</i>	Œillet															8							8	
<i>olea europea</i>	Olivier														2								2	
<i>citrus sinensis</i>	Oranger						4																4	
<i>hordeum vulgare</i>	Orge				1			2		2		2		1									8	
<i>citrullus lanatus</i>	Pastèque														1								1	
<i>petunia petunia x petunia hybrida</i>	Pétunia				2																		2	
<i>tremula x tremuloides</i>	Peuplier																				1		1	
<i>populus alba x populus trematula</i>	Peuplier blanc		1				1		8	1													11	
<i>populus deltoides</i>	Peuplier blanc				2				2	1										1			6	
<i>populus tremuloides</i>	Peuplier faux tremble								1														1	
<i>pinus sylvestris</i>	Pin sylvestre							2															2	
<i>pyrus communis</i>	Poirier																			1			1	
<i>pisum sativum</i>	Pois				3					1													4	
<i>solanum tuberosum</i>	Pomme de terre	2	2	6	70	10	18	4	13	40			1		7		63		2	4		32	274	
<i>malus domestica</i>	Pommier		2		1											3					2		8	
<i>malus pumila</i>	Pommier									1						1							2	
<i>prunus domestica</i>	Prunier			1			2													1			4	
<i>raphanistrum</i>	Radis sauvage								2														2	
<i>lolium perennen</i>	Ray Gras anglais					1											1						2	
<i>oryza sativa</i>	Riz						26		1						8								35	
<i>saintpaulia ionantha</i>	Saintpaulia																1						1	
<i>glycine max</i>	Soja				1		5		7						4						1		18	
<i>nicotiana tabacum</i>	Tabac			1	1		5	1	42	7					2								59	
<i>lycopersicon esculentum</i>	Tomate						16		5	1	1				48		2			2			75	
<i>helianthus annuus</i>	Tournesol						3		10								2						15	
<i>populus tremula</i>	Tremble				2													1					3	
<i>tritico-secale Wittmack</i>	Triticale																		1				1	
<i>vitis berlandieri x vitis riparia</i>	Vigne								1														1	
<i>vitis berlandieri x vitis rupestris</i>	Vigne								1														1	
<i>vitis rupestris</i>	Vigne								1														1	
<i>vitis vinifera</i>	Vigne				1				4						1								5	
TOTAL		3	119	17	193	55	407	27	587	229	19	28	5	1	287	2	156	1	11	25	22	97	6	2297
		AT	BE	CZ	DE	DK	ES	FI	FR	GB	GR	HU	IE	IS	IT	LT	NL	NO	PL	PT	RO	SE	SK	Total

AT : Autriche, BE : Belgique, CZ : Rep. Tchèque, DE : Allemagne, DK : Danemark, ES : Espagne, FI : Finlande, FR : France, GB Royaume-Uni, GR : Grèce, HU : Hongrie, IE : Irlande, IS : Islande, IT : Italie
 LT : Lituanie, NL : Pays-Bas, NO : Norvège, PL : Pologne, PT : Portugal, RO : Roumanie, SE : Suède, SK : Slovaquie

La tendance observée confirme l'étude des données issues du GNIS. Dans quasiment tous les pays d'Europe, les sélectionneurs végétaux travaillent sur de nombreuses espèces et utilisent toute la gamme des outils mis à leur disposition y compris la transgénèse essentiellement cantonnée à quelques grandes espèces et certains pays en position de leader.

Dans l'ensemble des données SNIFs, une soixantaine d'espèces font l'objet d'une notification qui porte sur des travaux abordant un nombre considérable de caractères (plus de 300), qu'il est impossible de lister dans ce document. Cependant, à partir de 2002, l'accès à une information plus détaillée concernant les demandes déposées auprès de l'IPSC est possible. Le tableau 5 donne leur répartition par année.

Tableau 5 – Répartition des notifications depuis 2001 en fonction des espèces et des années

Espèces	Années										Total
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
Arabette	0	0	2	0	1	1	1	0	0	0	5
Aubergine	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Betterave	0	2	2	0	1	0	4	5	9	9	32
Betterave fourragère	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Blé	0	3	4	0	1	0	2	1	0	1	12
Bouleau	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	2
Céréale	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
Chicorée	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Citrange	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	3
Citron	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Concombre	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
Colza	0	2	4	0	5	4	1	2	0	0	18
Coton	0	1	2	2	8	11	8	7	6	4	49
Fétuque	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Fraise	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Laitue	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
Lin	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	5
Maïs	0	29	25	51	88	54	53	80	49	16	445
Morelle noire	0	0	1	2	0	3	1	0	0	0	7
Orange	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3
Orge	0	0	1	0	0	0	2	1	0	1	5
Pétunia	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Peuplier	0	2	0	0	0	1	2	1	1	2	9
Pois	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	3
Pomme de terre	1	7	17	11	17	11	5	13	11	4	97
Pommier	0	3	1	1	0	0	0	0	1	1	7
Prunier	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	3
Ray-grass	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
Riz	0	19	0	1	1	0	0	0	0	1	22
Soja	0	1	1	0	0	1	0	0	2	0	5
Tabac	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	5
Tomate	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2
Triticale	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Vigne	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	2
Total général	1	74	65	72	128	91	87	111	83	41	753

Assez paradoxalement, le nombre d'espèces est plus réduit (35) et les notifications répertoriées sont au nombre de 753. De 1991 à 2011, 2 297 demandes ont été enregistrées.

L'année 2002 est une année charnière pour la mise en place de la procédure SNIFs. De 1 545 demandes entre 1991 et 2002 (moyenne 140 par an) on passe à 752 demandes (moyenne 68 par an) entre 2002 et 2011 et actuellement les notifications se stabilisent à une petite centaine par année.

Si les espèces majeures améliorées par transgénèse (betterave, coton, maïs et pomme de terre) se maintiennent avec des demandes supérieures à 5 par an (marquées en rouge dans le tableau 3), il est remarquable de voir le quasi-abandon de la transgénèse pour le riz par exemple. La réduction du nombre d'espèces signalée antérieurement porte, depuis 2001, notamment sur des légumes (brocoli, carotte, courge, melon, navet, radis), sur des fleurs (chrysanthème, géranium, lis, œillet), des fruits (caféier, framboisier, kiwi, pastèque, poirier, olivier) et des arbres forestiers (épicéa, pin sylvestre, tremble). La tendance paraît donc bien, après une sorte d'engouement pour l'utilisation de la transgénèse sur toutes les espèces, à un retour à des outils classiques (sélection variétale, croisement, etc.) pour l'obtention de nouvelles variétés. Cette remarque doit être modérée, car toutes les notifications ne concernent pas des programmes d'obtention variétale. Cependant, en s'ajoutant aux indications obtenues à partir des données GNIS, elle souligne l'utilisation par les obtenteurs de l'ensemble des outils mis à leur disposition.

Pour les espèces à développement très long (cas des arbres forestiers notamment), le faible nombre des notifications (9 pour le peuplier, 2 pour le bouleau) soulève une interrogation. L'emploi de l'outil de transgénèse, dans ce cas précis, fait gagner un temps important dans l'obtention de variétés aptes à répondre au problème du réchauffement climatique. Sa faible utilisation ne semble pas liée à l'exercice d'un choix des sélectionneurs mais plus directement à la prise en compte des contraintes liées à la société. Un équilibre doit être trouvé entre l'expression d'une demande et les contraintes de la réalité. En France, ces limites dans l'utilisation de l'ensemble des biotechnologies agricoles pourraient être dommageables pour la forêt.

Au cours de ces 10 dernières années, la répartition par pays semble bouleversée. Plus de 45 % des demandes intéressent l'Espagne et concernent le maïs pour les 2/3 des travaux. Ce pays déposait moins de 5 % des demandes entre 1991 et 2002, alors que la France en déposait 65 %. Aujourd'hui, cette dernière en dépose environ 10 %. Entre ces 2 périodes, l'Allemagne conserve des valeurs similaires (env. 8 %). Des pays montrent une réduction notable de leurs demandes (Belgique, Royaume-Uni, Italie, Pays-Bas). Mis à part l'Espagne et le maïs, de façon générale, il semble y avoir une réduction de l'usage de l'outil transgénique qui reste réservé à des espèces végétales spécifiques avec une réappropriation sans doute des outils classiques d'amélioration génétique.

En France, les acteurs traditionnels ont abandonné le terrain et sont partis à l'étranger pour réaliser leurs essais de semences. Nous sommes face à un paradoxe. Pour éventuellement produire des variétés adaptées à nos sols et à nos contraintes environnementales, les semenciers font leurs expérimentations de terrain hors de France.

Enfin, pour avoir une bonne vision du caractère étudié sur ces différentes espèces, une étude de mots a été effectuée sur la valeur donnée pour le "trait principal" sur l'ensemble des 753 demandes. Plus de 300 motifs de demandes ont été analysés. Les résultats sont donnés au tableau 6 (voir page suivante).

Pour lancer la première recherche, 6 termes génériques ont été choisis. Ils correspondent aux thèmes déjà rencontrés dans l'étude GNIS. Ils regroupent, par exemple les éléments suivants :

- Pour amélioration : amélioration de l'assimilation de l'azote, amélioration de la photosynthèse, amélioration des qualités boulangères, amélioration de la digestibilité, amélioration d'élasticité des fibres de lin, amélioration des caractéristiques de "fleurissement", amélioration de la qualité de maltage, etc.
- Pour modification : modification de la structure de la chromatine, modification de précocité de la floraison, modification de l'arôme du fruit, modification de l'architecture de la plante, de sa floraison et de sa fructification, etc.
- Pour régulation : régulation de la synthèse d'amylose, régulation négative du glucosinolates, régulation du niveau de nitrite, régulation négative de la pectine estérase, etc.
- Pour résistance : résistance aux bactéries (*Pseudomonas marginalis*), résistance aux champignons (résistance à la rouille tardive), résistance aux insectes, résistance aux nématodes, résistance au virus de la mosaïque de la luzerne, résistance au virus de la mosaïque du maïs, résistance au virus d'enroulement du feuillage de la pomme de terre, etc.
- Pour synthèse : synthèse d'albumine, synthèse d'antibiotiques, synthèse d'anticorps, synthèse de protéines antimicrobiennes, synthèse de citrate, synthèse de collagène, etc.
- Pour tolérance : tolérance à la sécheresse, tolérance au gel, tolérance au glyphosate, tolérance à un herbicide (non spécifique), tolérance au bromoxynil, etc.

Tableau 6 – Analyse des motifs de demandes depuis 2002 (Source IPSC 2011)

Recherche 01	Valeur	Recherche 02	Valeur	Recherche 03	Valeur
Amélioration	42 (13 %)	Amélioration, Stimulation	44 (14 %)	Amélioration, Stimulation, Evaluation, Gène	57 (18 %)
Modification	20 (6 %)	Modification, Développement, Inhibition	31(10 %)	Modification, Développement, Inhibition	31 (10 %)
Régulation	22 (7 %)	Régulation, Contrôle, Activation, Expression, Induction	43 (13 %)	Régulation, Contrôle, Activation, Expression, Induction, Optimisation, Réduction	50 (16 %)
Résistance	46 (14 %)	Résistance	46 (14 %)	Résistance	46 (14 %)
Synthèse	106 (33 %)	Synthèse	106 (33 %)	Synthèse, Sécrétion	107 (33 %)
Tolérance	22 (7 %)	Tolérance	22 (7 %)	Tolérance	22 (7 %)
Non classé	62 (19 %)	Non classé	28 (9 %)	Non classé	7 (2 %)
Total	320	Total	320	Total	320

Avec ces 6 premiers termes, il paraît possible de classer plus de 80 % des demandes. En rajoutant des termes très voisins ou considérés comme tels, on obtient une classification de plus de 98 % des notifications.

Le tiers des demandes concerne l'augmentation des capacités de synthèse des plantes soit pour produire des produits déjà synthétisés par la plante soit des produits nouveaux (anticorps, antibiotiques, enzymes, etc.). Ces recherches intéressent principalement l'industrie pharmaceutique et visent à donner une nouvelle fonction à la plante, relativement éloignée du rôle nutritionnel qui lui est classiquement dévolu. Les termes de contrôle, activation, régulation peuvent être rapprochés de cette notion de synthèse en ce qu'ils signent des recherches propres à réguler l'activité de synthèse. Le terme de tolérance pourrait être rapproché de cette notion de synthèse – régulation lorsqu'il s'agit de tolérance à un herbicide. Cependant, il est apparu plus judicieux de maintenir isolé ce terme qui recouvre la tolérance à la sécheresse et au gel. Une remarque similaire pourrait être faite sur la notion de résistance. Près de 50 % des notifications enregistrées concernent les capacités extraordinaires de synthèse des plantes et visent à donner à ces dernières un nouveau rôle dans la production d'une substance nouvelle (antibiotique, anticorps, enzymes). Cette recherche justifie l'utilisation de la transgénèse pour l'incorporation d'un gène qui a peu de chance d'être retrouvé par l'utilisation des croisements par exemple.

Le terme le plus fréquent est celui d'amélioration. Il intéresse 18 % des demandes. Il s'agit d'améliorer les plantes vis à vis de caractères qu'elles avaient déjà ou qu'elles ont perdus en fonction des demandes des acteurs des filières. Cela peut intéresser des critères quantitatifs ou qualitatifs propres à la demande des consommateurs (absence de certains acides gras, augmentation de la teneur en sucre, modification de la saveur, rendement, etc.) ou des critères technologiques (panification, précocité, fleurissement, etc.) correspondant aux besoins des industriels et des agriculteurs. Dans ce contexte, le terme de modification se rapproche fortement de la notion d'amélioration. Cet ensemble représenterait environ 30 % des demandes.

En conclusion, il paraît possible de scinder en 3 grands groupes les motifs de dépôts des demandes pour l'utilisation de la transgénèse par les sélectionneurs. Le premier viserait tous les travaux cherchant à donner à la plante un rôle nouveau en exploitant ses qualités exceptionnelles de synthèse. Il représente environ 50 % des demandes. Le deuxième, 30 % des demandes, contient toutes les recherches qui visent à mettre en valeur en fonction des nouvelles demandes des utilisateurs les qualités naturelles des plantes. Le troisième groupe, environ 20 % des demandes, s'attache aux phénomènes de résistance et de tolérance et correspond à la demande environnementale actuelle.

4.4. Une première approche

La recherche d'une meilleure connaissance des nouvelles variétés, qui se préparent actuellement pour un horizon de 20 à 30 ans, n'est pas une chose facile. Les contacts qui peuvent être établis demeurent empreints d'une grande discrétion, soit en réaction à une sensibilité exacerbée de la société vis à vis des biotechnologies végétales soit la nécessité de protéger le travail de création variétale par le secret.

En tout état de cause, les informations recueillies ne permettent pas d'orienter les décisions à prendre face à deux postures "méfiance" et "secret". Cependant, elles laissent penser que d'autres facteurs interviennent et notamment sociaux, économiques et environnementaux. Ce document ne serait pas complet si nous ne tentions pas une première approche de cette situation même si elle peut paraître, dans certains cas, préjudiciable au développement de l'agriculture.

Depuis près d'un demi-siècle, la connaissance de la société dans les divers domaines de la science a considérablement progressé. Il est fort heureux que les programmes d'éducation portent des fruits. Avec l'arrivée d'Internet, l'accès facilité à la connaissance a

permis le développement d'une soif de savoir, puis de connaître et enfin de comprendre. Mais, il a également estompé la différence entre le vrai et le faux. Le scientifiquement vrai côtoie le visiblement faux. Aujourd'hui, le patient regarde sur Internet avant de prendre rendez-vous chez son médecin. Il arrive alors en consultation avec un quasi-diagnostic voir avec une quasi-certitude sur le mal qui le frappe. Pour faire accepter son traitement, le médecin a obligation d'information pour montrer qu'il est nécessaire d'intégrer d'autres facteurs. La toute-puissance de la connaissance, en l'occurrence celle de la médecine, a disparu au profit d'un partage et de l'établissement d'une confiance raisonnée et non plus aveugle. Faut-il rejeter cette situation ? Certainement pas, elle apporte plus de bénéfice que de perte.

En France, après l'épisode du sang contaminé et en pleine crise de l'ESB (encéphalopathie spongiforme bovine), lorsque le journaliste de "Libération", Jean-Claude Jaillette, fait titrer le 1 novembre 1996, à la une du journal "Alerte au soja fou", il y a télescopage d'information. La société ne peut faire la distinction entre le vrai et le faux. Face à cette confusion voulue ou pas, il y a alors basculement de l'opinion en France, qui est passé de neutralité à opposition radicale. Aujourd'hui, malgré 148 millions d'hectares de plantes génétiquement modifiées – essentiellement maïs, coton et soja – cultivés par environ 20 millions d'agriculteurs dans le monde, avec 25 ans de recul et aucun cas documenté de danger lié à la consommation de ces plantes, il n'y a pas changement d'avis. Ce n'est pas un problème de biotechnologie mais un problème de société.

De la même façon, en France, il y a 40 millions d'automobilistes et sans doute autant de très bons chauffeurs qui accusent leur voisin de très mal conduire. Ce n'est pas un problème de voiture mais de société. Le flot des voitures s'écoule mieux lorsqu'il y a respect mutuel des automobilistes. Dans le domaine des biotechnologies, on avancera lorsqu'il y aura une volonté d'écoute et de respect entre les différents courants. Le Conseil d'orientation stratégique de la Fondation pour la recherche sur la biodiversité avait pour charge d'établir ce lien. Les enjeux techniques sont importants mais ils ne sont pas plus sérieux que les demandes de la société en qualité de vie, en bien-être et en protection de l'environnement. Un consensus reste à trouver.

Dans ce contexte de méfiance et d'incompréhension entre les scientifiques et la société, il n'est pas étonnant de voir se développer des sentiments identiques entre les semenciers et les organismes non-gouvernementaux qui, dans certains cas, s'autoproclament détenteurs d'une vérité bonne pour la société. Cette situation n'est pas propice pour le développement de notre société et pour obtenir des réponses satisfaisantes aux enjeux nationaux et internationaux propres à satisfaire les besoins sociaux, économiques et environnementaux.

Il apparaît paradoxal que dans un monde où il y a de plus en plus d'échanges sécurisés, les semenciers se tournent vers une culture du secret. En effet, la nécessité de mieux connaître le génotype des espèces végétales utilisées et l'utilisation du génotypage à haut débit vont engendrer une acquisition importante de données qu'il faudra partager. Ce partage permettra d'obtenir et de valoriser les données de phénotypage incroyablement plus lourdes à acquérir. En créant des liens avec les données de génotypage, elles seront cependant les seules à pouvoir répondre aux besoins de création de variétés nouvelles propres à satisfaire les diverses contraintes. Ces échanges d'information ne seront possibles que s'ils se passent dans un cadre réglementé propre à satisfaire la sécurité des travaux entrepris par les semenciers. C'est tout l'enjeu de la mise en place du protocole de Nagoya ratifié par la France le 20 septembre 2011. Il est d'une importance majeure pour les ressources génétiques, pour l'agriculture et l'alimentation.

5. Quelles sont les perspectives ?

Cette approche rapide des relations entre la science et la société était essentielle avant d'aborder ce dernier chapitre. Dans un contexte d'évolution des pensées et dans une société où il est de plus en plus difficile de partager des valeurs semblables, la place prise par les diverses espèces végétales est primordiale et va encore devoir s'accroître pour répondre aux besoins croissants et de plus en plus contraints des hommes. La satisfaction des besoins passera par l'emploi de toutes les biotechnologies telles que définies antérieurement. Elle devra développer de nouvelles variétés adaptées aux contraintes économiques, environnementales et sociales en utilisant des espèces déjà domestiquées ou en allant vers de nouvelles domestications. Ces dernières pourront faire totalement abstraction de la plante adulte et ne s'intéresser qu'au gène d'intérêt. Notre société doit se préparer à cette domestication au niveau du gène et à la nécessité de partage des valeurs propres à chacun. Ce défi va beaucoup plus loin que la simple sphère de la recherche ou de la science. Il touche également l'environnement et la société qui y vit.

En conséquence, de la présente étude et en envisageant l'ensemble des facteurs impliqués, seules des tendances peuvent être dégagées. Elles permettent alors d'orienter les décisions à prendre au cours des prochaines années. Il est possible de donner un aperçu de cette évolution à 20 ans des variétés végétales. Cette analyse ne transmet qu'un point de vue tenant compte des contraintes actuelles et dont l'évolution demeure impossible à prédire.

5.1. Des outils adaptés

Lorsqu'on évoque l'utilisation d'outils adaptés, il s'agit d'une évidence. Il est, en effet, peu probable qu'un ouvrier quel qu'il soit et, en l'occurrence, dans ce document, un chercheur, un obtenteur, un semencier, etc., puisse utiliser un outil non adapté. Cette phrase mérite cependant quelques éclaircissements.

En première approche, l'outil doit être adapté à l'objectif à atteindre. Un tournevis ne peut être utile pour enfoncer un clou ou un marteau pour visser. Certes, l'image est excessive. Dans le domaine des semences et de l'obtention variétale, les objectifs et les outils ne sont pas aussi tranchés. On comprend assez aisément que si on désire augmenter la teneur en sucre d'une betterave sucrière ; il est possible d'utiliser les outils qui ont fait leur preuve depuis plus d'un siècle et demi. Aujourd'hui, on demande à l'agriculture non seulement de répondre à des contraintes de rendement mais également d'utiliser moins de produits phytosanitaires, de fertilisants chimiques, d'eau et de correspondre à des demandes souvent mal formulées de la société. Le problème est alors beaucoup plus complexe et les facultés d'intégration des divers acteurs trouvent leurs limites.

La deuxième notion aborde la constante nécessité d'avoir des outils adaptés au temps. Très peu de personnes vont aujourd'hui à New-York en bateau et pourtant cela reste toujours possible. On peut s'interroger sur la nécessité d'un déplacement Paris – Londres pour une réunion d'une journée. L'outil, Eurostar, a donné cette possibilité. Mais c'est la société qui en a éprouvé le besoin. Était-ce bien raisonnable ? Sans aucun doute, la réponse est positive lorsque l'on considère les multiples avantages qui résultent d'une liaison rapide entre ces deux pays. Elle peut être beaucoup plus réservée lorsqu'on regarde d'un point de vue extrêmement restrictif de l'organisation d'une réunion d'une journée. Il n'en demeure pas moins que les Français ne vont plus à Londres en avion. Ils utilisent le train lorsqu'ils souhaitent visiter l'Angleterre. La société a des demandes, plus ou moins raisonnables. C'est une question de point de vue. Elle crée des outils et les utilise le plus judicieusement possible. Il en est de même dans le domaine des semences.

Ces deux remarques sous-tendent de manière presque constante les positionnements futurs. Initialement, les demandes sont justifiées et correspondent à un besoin. Pour répondre aux attentes, des outils sont développés. Secondairement, il peut y avoir une utilisation détournée ou trop systématique de ces instruments. L'action entreprise et l'objectif recherché peuvent apparaître alors non raisonnables. Ni l'un ni l'autre n'est pourtant individuellement à rejeter.

Pour nourrir le monde en 2050, la production alimentaire mondiale devra augmenter de 70 %. Mais, la société ne réclame pas à l'agriculture uniquement de nourrir les hommes, elle lui demande également de préserver l'environnement, de maintenir la biodiversité, de préserver les ressources en eau, de produire une part de l'énergie et de fournir des aliments de qualité voire médicamenteux. Ces demandes sont en lien avec des thèmes plus généraux : le développement durable, le changement climatique, la préservation de la planète, le respect des générations futures, etc. Le challenge est important. L'amélioration variétale n'est pas la seule voie possible. Les techniques agronomiques apportent, elles aussi, des solutions qui peuvent être transitoires et partielles mais qui, bien souvent nécessitent des semences adaptées. L'action au niveau des semences apparaît être un levier judicieux et pertinent pour apporter une partie des réponses aux défis. Elle doit se faire, cependant de façon raisonnée, en s'interrogeant notamment sur l'importance des gaspillages de notre société.

Dans ce contexte, il est essentiel de reconnaître et d'admettre trois points :

- **Les acteurs de la filière (chercheurs, obtenteurs, semenciers, agriculteurs) ne peuvent être freinés dans leurs objectifs et le choix de leurs outils.** Ils ont à leur disposition une boîte à outils complète, à utiliser pour répondre aux objectifs qui leur sont assignés. Cette utilisation est également modulée par les dates possibles de mise en oeuvre. En d'autres termes, la société ne peut avoir des exigences du style "Lettre au Père Noël" si, d'un autre côté, elle restreint l'utilisation de certains outils. Les opérations actuelles de séquençage à grande échelle du génome des espèces phares débouchent vers une acquisition importante de données aboutissant à la mise en place d'une sélection génomique de ces espèces puis à terme à l'isolement d'une partie des gènes d'intérêt et au transfert intra ou inter-espèces de gènes. La compréhension de cette logique implique le droit donné à tous les acteurs de la filière d'utiliser tous les outils disponibles.
- **La société doit effectivement se donner le droit d'utiliser la totalité de cette boîte à outils.** Cette solution est sans doute, aujourd'hui, la plus prometteuse. Cependant, il ne peut s'agir d'un blanc seing. En effet, un véritable cercle vertueux d'échanges doit s'établir entre la société et les acteurs des biotechnologies. A l'évidence, il apparaît que ces derniers sont également des membres de la société. Une arène de discussion doit donc être ouverte dont l'Etat restera l'arbitre.
- **Compréhension et transparence sont alors les deux mots clés.** En effet, dans ce contexte de dialogue, si la société s'implique dans une meilleure définition des objectifs et une acceptation complète des moyens à mettre en oeuvre, les acteurs, eux, s'engagent à une transparence totale des processus. Les avancées sont à ce prix. La société doit être au courant de ce que signifie, par exemple, "dresser les cartes d'identité génétiques des espèces de blé les plus productives ou résistantes aux parasites ou à la sécheresse" pour accepter in fine l'utilisation de la transgénèse mais également les techniques traditionnelles de croisement - sélection. C'est à ce prix que les semenciers trouveront la quiétude nécessaire à leurs investissements.

Ainsi, par exemple, un brocoli sauvage est particulièrement riche en composants naturels bons pour la santé. Des chercheurs britanniques ont sélectionné et amélioré, par voie classique, un brocoli avec une teneur deux à trois fois plus élevée que la normale en glucopharanine, précurseur d'une molécule active réputée combattre les maladies cardiovasculaires et certains cancers. Mais, cela nécessite une consommation de brocoli au moins hebdomadaire et presque cru. La société est-elle prête à manger régulièrement du chou cru ? La société est-elle disposée à changer ses habitudes alimentaires ? La vérité doit être dite et la question posée. Il convient ensuite d'en tirer les conséquences, d'aller plus loin dans le séquençage puis le transfert de gènes dans une autre espèce.

5.2. Des choix d'amélioration

Les variétés ne sont jamais sélectionnées au hasard. C'est du reste assez paradoxal car leur production fait appel depuis des siècles au hasard et pour longtemps encore, même si aujourd'hui les biotechnologies sont en train de transcender cette approche. Dans tous les cas, les choix d'amélioration répondent à des besoins précis qui intéressent l'agriculteur, le transformateur (brasseur, meunier, semoulier, etc.) ou le consommateur.

Un des premiers objectifs de la sélection de nouvelles variétés a été l'augmentation des rendements, condition nécessaire pour répondre aux besoins alimentaires d'une population toujours croissante et pour assurer les revenus des agriculteurs et le maintien de leurs activités. Initialement, les opérations d'amélioration génétiques se sont cantonnées aux quelques espèces directement utilisées pour l'alimentation de l'homme et de l'animal. Elles consistaient en un repérage visuel des mutations spontanées et en une sélection de certains mutants pour leurs caractères les plus désirables (saveur améliorée, récolte facile, taille supérieure, etc.). Par la suite, la compréhension des mécanismes scientifiques sous-jacents a permis une certaine généralisation des processus et leur extension à pratiquement toutes les espèces. Aucune espèce végétale propre à l'alimentation de l'homme et des animaux n'a échappé à l'amélioration génétique.

Ainsi l'homme a mis son empreinte sur quasiment toutes les espèces qui sont utilisées dans l'agriculture et l'alimentation. Il faut également y ajouter les plantes qui participent à la santé, au cadre de vie et aux loisirs (plantes médicinales, plantes à parfum, potagères, fleurs, gazon). S'en dégagent les points suivants :

- **Toutes les espèces domestiques végétales sont soumises à un processus d'amélioration et appelées à être travaillées avec l'ensemble des outils de sélection disponibles.**

Dans ces conditions, il semble inutile, voire utopique, d'établir une classification des diverses méthodes d'obtention des variétés (génotypage et ciblage de gènes, apport de gènes ou modification de l'expression de certains gènes) et ce d'autant que les méthodes peuvent être couplées.

Il apparaît au contraire essentiel de s'attacher prioritairement aux objectifs de sélection compris dans une véritable stratégie nationale agronomique de développement et de réponse aux attentes de la société. Il s'agit alors de recentrer l'obtention variétale sur l'homme.

- **La véritable question n'est plus de savoir comment est obtenue une nouvelle variété mais pourquoi elle l'est.**

La recherche d'un meilleur rendement reste toujours présente. Le Grenelle de l'environnement évoque cette exigence reprise dans l'article 31 de la loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à sa mise en œuvre : *"La vocation première et prioritaire de l'agriculture est de répondre aux besoins alimentaires de la population, et ce de façon*

accentuée pour les décennies à venir. Le changement climatique, avec ses aléas et sa rapidité, impose à l'agriculture de s'adapter, de se diversifier et de contribuer à la réduction mondiale des émissions de gaz à effet de serre. Pour cela, il est indispensable de préserver les surfaces agricoles, notamment en limitant leur consommation et leur artificialisation. Cependant, les processus intensifs de production font peser des risques parfois trop forts sur les milieux, menaçant aussi le caractère durable de l'agriculture elle-même. Au-delà des importantes évolutions des pratiques agricoles mises en œuvre depuis une dizaine d'années, un mouvement de transformation s'impose à l'agriculture pour concilier les impératifs de production quantitative et qualitative, de sécurité sanitaire, d'efficacité économique, de robustesse au changement climatique et de réalisme écologique : il s'agit de produire suffisamment, en utilisant les fonctionnements du sol et des systèmes vivants et, leur garantissant ainsi une pérennité, de sécuriser simultanément les productions et les écosystèmes. L'agriculture contribuera ainsi plus fortement à l'équilibre écologique du territoire, notamment en participant à la constitution d'une trame verte et bleue, au maintien et à la restauration de la biodiversité sauvage et domestique, des espaces naturels et des milieux aquatiques, et à la réhabilitation des sols".

Cette ligne de conduite ouvre inéluctablement à la mise en place d'une sélection génomique dont les précurseurs sont actuellement le décryptage de divers génomes et la recherche de gènes marqueurs. Elle préfigure un nouveau mode d'obtention variétale sans doute plus rapide mais surtout prenant en compte un nombre plus important de caractères aptes à répondre à la demande de la société.

Trois grands axes ont pu être dégagés pour le couple outil / caractère :

- **Le premier axe de développement intéresse particulièrement la recherche sur les capacités de synthèse des plantes.** Il répond aux demandes anciennes d'accroissement de rendement mais, pour beaucoup d'espèces, d'obtention en quantité plus importante de certaines substances déjà présentes (riz enrichi en vitamine A, riz à haute teneur en fer, augmentation de la teneur en protéine du manioc, de la banane plantain, de la pomme de terre), élimination des allergènes et anti-nutriments (manioc, céleri, riz), modification de teneur en amidon et de la composition en acides gras (soja, canola, colza, etc.) ou augmentation de la teneur en antioxydants (tomate, aubergine, melon, courgette). **La transgénèse et ses dérivés sont des outils particulièrement adaptés.**
- **Le deuxième axe intéresse l'amélioration des espèces pour les productions agricoles classiques. Les méthodes traditionnelles de sélection y demeurent encore les plus utilisées.** Les nouveaux outils biotechnologiques vont permettre de travailler sur plus de caractères à la fois, notamment ceux de nature technologique et/ou environnementale. Il semble qu'il sera possible de trouver une meilleure adéquation entre site de production et variété de semences. Dans ce contexte, les choix des utilisateurs et des consommateurs pourront être mieux respectés. Il convient alors à la société d'assurer une cohérence de pensée entre les résultats souhaités et les outils devant être utilisés.
- **Le troisième axe renferme tous les caractères prenant en compte principalement les contraintes du milieu (eau, intrant, pollution, pathologie). Cet axe concentre l'ensemble des problèmes pouvant être rencontrés dans les axes 1 et 2 :** création de plantes nouvelles susceptibles de satisfaire les besoins exprimés (domaine de recherche important avec utilisation des biotechnologies les plus modernes) et nécessité de répondre à des besoins exprimés par les consommateurs en tenant compte de certaines ambiguïtés. Là encore, les techniques

traditionnelles de sélection aidées de la transgénèse sont les plus utilisées pour obtenir de meilleurs rendements et mettre au point des plants résistants aux maladies, aux insectes et aux agressions abiotiques. Elles montrent ainsi leur puissance pour établir et respecter les liaisons étroites avec le milieu.

L'objectif principal de ce travail était de mettre en évidence les grands bouleversements qui pourraient survenir dans les 20 prochaines années concernant les nouvelles variétés végétales et leurs implications en termes d'organisation. Les réflexions confirment ce qui se dit encore discrètement mais qu'il est possible de percevoir lorsqu'on parcourt longuement et avec un regard attentif la presse nationale, notamment lors de l'étude GNIS rapportée ci dessus : il n'y aura pas de grandes nouveautés.

- **Face à une pression économique et environnementale forte, la société est devenue très exigeante sur son alimentation et sur la manière de la produire. L'agriculture a les moyens de répondre à cette demande, dans le domaine végétal par l'intermédiaire de sa filière semencière ; l'exigence est d'autoriser cette dernière à donner une réponse et à la critiquer si nécessaire.**

Un dialogue doit s'établir entre les divers acteurs de la filière de l'agriculteur au consommateur afin de connaître les enjeux, les possibles et les limites que chacun peut se donner en fonction des demandes et des possibilités des autres. C'est la seule voie possible. Elle entraîne de facto une nouvelle approche dans d'autres domaines.

5.3. Une nouvelle approche de l'agriculture

En 2009, la surface agricole utile occupait 53 % du territoire français métropolitain. Les bois et forêts en occupaient 28 %. Occupant près de 60 % du territoire, l'agriculture, dans son sens le plus large, influence fortement le milieu naturel : l'eau, le sol et l'air. L'impact de l'agriculture sur l'environnement n'a pourtant donné lieu que tardivement à une prise de conscience généralisée. Au lendemain de la seconde guerre mondiale, l'objectif de l'agriculture européenne était d'assurer l'autosuffisance alimentaire de l'Europe. L'altération de l'environnement, par l'activité agricole, a été longtemps perçue comme le prix à payer pour les gains de productivité. Aujourd'hui la société a de nouvelles attentes envers l'agriculture. Cette dernière doit produire non seulement des denrées alimentaires de qualité mais aussi des produits à usage non alimentaire, participer à la préservation des ressources naturelles, des paysages, du milieu et de la biodiversité. Elle doit également contribuer à l'occupation des territoires et à l'emploi rural.

Cependant, d'après le baromètre des préoccupations des français (TNS Sofres mars 2011), le couple "environnement et pollution" arrive en 7^{ème} position, et la 11^{ème} pour "sécurité alimentaire et qualité de la nourriture". Dans une autre étude de 2011 de ce même organisme, la provenance du produit est un critère qui compte de plus en plus pour le consommateur moyen. Ce facteur est un élément déterminant dans l'achat pour 45 % des français (plus 11 points par rapport à 2008), derrière le prix (83 %) et la date de péremption (65 %), mais cependant, devant la composition du produit (32 %) ou la composition nutritionnelle (21 %). Ces deux résultats peuvent se traduire par une très grande confiance des consommateurs dans la filière aval de production des produits achetés avec contrôle de l'origine mais sans préoccupation particulière. Il est probable que cette inquiétude est laissée à la charge de l'Etat.

Dans un domaine extrêmement large incluant les forêts et les biocarburants, l'ensemble des acteurs de la filière de production végétale qui va de l'agriculteur au consommateur en passant par les producteurs, les semenciers, les obtenteurs et les différents scientifiques chercheurs et gestionnaires, il peut apparaître paradoxal qu'il y ait un tel vide

entre une pression très forte mise sur l'agriculture avec un regard du consommateur uniquement sur le produit final et l'absence d'intérêt marqué et de collaborations institutionnalisées étroites entre les acteurs. Il serait trop simple de dire qu'il s'agit du résultat de la politique agricole européenne, cette dernière se retournant vers une demande de la société et rajoutant ainsi un étage à la réflexion. Il apparaît alors essentiel de mieux connaître l'ensemble des rouages impliqués dans les processus d'orientation et de décision en agriculture. Le risque est grand de se trouver dans un bateau ivre où les uns attendent ou suspectent une réaction des autres supprimant ainsi tout dynamisme à la filière.

- **La société a mis énormément de pression sur l'agriculture. Ses attentes n'apparaissent pas excessives, du moins pour la filière semences et plants. Cependant, aujourd'hui, il apparaît difficile d'en connaître l'origine exacte et le mode de formulation. Si cette dernière est certaine, elle est souvent mal comprise et risque de briser le dynamisme nécessaire. Il apparaît urgent qu'un dialogue soit instauré.**

La demande sociétale est importante et variable. Elle nécessite une acquisition croissante de données. Elle conduit à la mise en place d'une sélection génomique dont les précurseurs sont actuellement le décryptage de divers génomes et la recherche de gènes marqueurs. Ils préfigurent ainsi un nouveau mode d'obtention variétale, sans doute plus rapide, mais prenant surtout en compte un nombre plus important de caractères. Cette évolution pourrait aboutir à terme à une juste adéquation des semences en fonction des milieux, des espaces, des terrains et des champs.

5.4. Une nouvelle approche des semences

Depuis 20 ans, les changements dans les méthodes d'obtention des nouvelles variétés végétales touchent tous les pays d'Europe. Malgré une légère inflexion dans le nombre des recherches, il semble cependant que, depuis ces 10 dernières années, apparaisse une certaine stabilisation avec un choix mieux exercé sur les outils biotechnologiques utilisés en fonction des espèces.

De nouvelles variétés remplacent fréquemment des variétés plus anciennes qui ne répondent plus aux besoins des producteurs, des transformateurs, des distributeurs et des consommateurs. Les besoins des hommes évoluent rapidement avec l'évolution des modes de vie, des ressentis par rapport à l'environnement, des techniques de production et des modes de distribution. Les nouvelles variétés vont devoir intégrer de plus en plus de facteurs répondant non seulement à des contraintes économiques (rendement, faibles intrants), environnementales (adaptation à la sécheresse, adaptation au mode de production, résistance aux parasites) et sociales (composition, qualité, valorisation d'un milieu spécifique).

Dans ces conditions, il ne peut exister une variété unique répondant à toutes les demandes. Cette situation intéresse toutes les espèces que ce soit les céréales, les espèces de grande culture, les fourrages, les potagères, les florales ou les espèces forestières. En fonction des différentes conditions de sol, de climat, avec les maladies qui s'adaptent et avec l'évolution des techniques, la diversification des produits et les nouveaux débouchés, il va falloir fournir de nouvelles variétés qui auront une durée de vie sans doute encore plus courte. Seuls les semenciers vont pouvoir répondre à cette demande. Ils vont avoir besoin de tous les outils biotechnologiques pour atteindre cet objectif. Il faut leur donner une bonne visibilité à long terme. Or, nul ne peut aujourd'hui répondre à la question : quelles variétés issues des biotechnologies les plus avancées vont arriver sur le marché dans les 20 prochaines années ? En revanche, les points suivants semblent pouvoir être assurés.

- **Dans tous les domaines, un plus grand nombre de variétés issues de tous les outils mis à la disposition des semenciers sera nécessaire.**
- **Sans dynamisme fort, l'adaptation des textes et le suivi des évolutions ne seront pas possibles.**
- **Un dialogue permanent entre tous les acteurs de la filière devra être établi sous l'égide de l'Etat.**

Ce cadre de travail doit permettre aux semenciers de remplir les objectifs qui leur sont assignés, aux agriculteurs de veiller à une adéquation des besoins exprimés avec les techniques de production, aux consommateurs d'être capables de faire respecter leurs besoins et aux dirigeants de garantir la liberté de chacun.

La capacité de réponses des semenciers aux divers besoins, dont certains sont aujourd'hui encore inconnus, passe par la constitution de collections nationales de ressources génétiques. Elles permettent le maintien des variétés anciennes et des variétés plus récentes ne correspondant plus aux besoins du moment. De surcroît, elles garantissent l'accès libre et gratuit aux éléments de base des créations variétales.

- **La constitution des collections nationales de ressources génétiques végétales est le préalable essentiel à une réponse adaptée aux besoins de la société.**

Comme déjà vu, le Grenelle de l'environnement a reconnu l'importance du catalogue officiel des espèces et des variétés agricoles importantes économiquement. Il doit à présent intégrer les nouveaux critères liés aux contraintes technologiques et environnementales. Il doit intégrer également des contraintes propres à l'agriculture biologique. Par ailleurs, il est souhaitable que les variétés anciennes puissent trouver leur place au sein du catalogue afin d'être reconnues pour être cultivées même de façon réduite au sein des réseaux de conservation existants. Dans ce contexte le rôle du Comité technique permanent de la sélection (CTPS) doit être élargi et renforcé.

- **La constitution de réseaux d'espèces et de groupe d'espèces, qui assurent la gestion et la conservation des ressources génétiques végétales en liaison avec le CTPS et intègrent des structures publiques et privées, est la garantie que peuvent avoir les semenciers sur une vision à long terme du développement de la filière.**

Pour l'État, ces réseaux constituent la première étape de réponse aux engagements de Rio. Cependant, l'organisation, la gestion et le suivi de ces réseaux ne peuvent être confiés qu'à une structure indépendante sur laquelle le Ministère en charge de l'agriculture doit garder un œil attentif pour répondre aux besoins d'évolution des textes.

- **Le premier travail à mettre en œuvre est de donner un statut à ce patrimoine national que constituent les ressources génétiques.**

Si les sélectionneurs ont besoin d'une sécurité et d'une stabilité dans les objectifs à attendre et vis à vis des méthodes à employer, ils ont également besoin de s'appuyer sur un environnement juridique stable qui s'inscrit dans la durée. Le certificat d'obtention végétale (COV) vient d'être actualisé aux regards des nouveaux développements (loi n° 2011-1843 du 8 décembre 2011). Il protégera ainsi de façon plus efficace le travail des obtenteurs, empêchant l'appropriation de la variété par l'introduction de gène "breveté". Par ailleurs, en autorisant la pratique de semences de ferme pour certaines espèces (céréales, légumières, fruitières...) et à certaines conditions, ce mode de protection respectera mieux les droits des agriculteurs.

Ces évolutions doivent se faire dans un contexte de dialogue national et international. Cette nouvelle situation va nécessiter une connaissance reconnue du matériel échangé, une traçabilité parfaite entre des centres d'échange certifiés et une ouverture des collections. C'est la mise en place d'échanges sécurisés et parfaitement suivis entre des centres reconnus. Toutes les espèces, n'entrant pas dans ce schéma, échapperont à une forme quelconque de valorisation et seront vouées à la disparition.

- **Le maintien de la biodiversité des espèces passe par une gestion organisée des connaissances autour de chacune d'elles.**

5.5. Une nouvelle responsabilité

A l'issue de sa réflexion, le groupe de travail BioPaGe se trouve placé devant un dilemme. Initialement, la demande est claire : quelles sont les nouvelles variétés de plantes nées de l'utilisation des biotechnologies et, arrivant sur le marché dans les 20 prochaines années, qui vont nécessiter une modification des textes et règlements actuels ? La modestie est de mise car aucune réponse ne peut honnêtement être donnée. Il est utopique de croire qu'il est possible de connaître les diverses variétés qui sont en cours de création, de réalisation, de sortie ou même plus simplement en projet. Il est tout aussi impossible de savoir quels sont les textes qui devront subir des adaptations. Faudra-t-il interdire les fleurs bleues lorsqu'elles sont naturellement blanches ou roses ? Faudra-t-il réguler les "alicaments", au croisement de la nutrition et de la santé, alors que ces denrées promettent non seulement de nourrir, mais également de soigner ?

Toutefois, ce n'est pas en adaptant au coup par coup les textes réglementaires qu'il sera possible de répondre aux diverses demandes. Il faut donc envisager une autre approche. Certains écrits permettent déjà de voir la nécessité de prendre une nouvelle posture dans le domaine des ressources génétiques et plus particulièrement dans celui des ressources phylogénétiques.

Dans la préface du livre de Michel Chauvet et Louis Olivier (1993) "La biodiversité, enjeu planétaire", André Cauderon, de l'Académie des sciences et de l'Académie d'agriculture, écrit :

"La diversité du monde vivant, composante essentielle de ce que nous appelons aujourd'hui l'environnement, s'imposait aux hommes de l'ère pré-industrielle : phénomène grandiose d'ordre évidemment supérieur, base de ressources indispensables au quotidien, puissance omniprésente et parfois redoutable, la biodiversité était l'objet de vigilance et de respect ; elle occupait une place éminente dans les mythes qui structuraient les cultures. Depuis quelques millénaires, les systèmes agricoles artisanaux ont contribué à réduire le décalage hiérarchique entre cette force mystérieuse et les sociétés dont elle permettait la survie..."

Il y a un quart de siècle, l'état des ressources génétiques ne préoccupait guère l'opinion et les dirigeants français. Les milieux scientifiques, techniques et économiques directement concernés sous-estimaient les risques croissants liés aux interactions écologie / économie. Aujourd'hui, le danger d'une érosion biologique accélérée constitue pour les équilibres de la planète un handicap majeur reconnu. La Convention sur la diversité biologique met l'accent sur des thèmes à la fois scientifique, technique, économique et réglementaire, qui mêle tout naturellement coopération fraternelle et compétition impitoyable. Dans le domaine agricole et plus particulièrement dans celui des ressources phylogénétiques, elle joue un rôle stratégique. Son action affecte les intérêts de tous les pays. Il faut y être présent et actif.

- **La France doit répondre aux engagements pris lors de la signature de la Convention sur la diversité biologique.**

Au cours de cette étude, les termes de ressources génétiques, de patrimoine, de gène, de combinaison de gènes, de réponse à des besoins, d'adaptation, d'évolution, etc. sont souvent revenus. Dans ces diverses répétitions, il faut reconnaître un système en mouvement permanent. Un gène dans ces multiples expressions ou une combinaison de gènes permet une adaptation à un milieu et une réponse à une demande humaine. Mais, dans un milieu changeant et face à une demande évolutive, il n'y a pas de bonne combinaison, ni de bonne expression d'un gène. Il va donc falloir modérer la demande et gérer les capacités de réponses des ressources génétiques. Elles doivent être capables de satisfaire aux demandes présentes et futures connues et inconnues. Mais, comment conserver ce qui ne s'exprime pas ? Comment conserver une résistance à une maladie si la maladie n'existe pas ? La conservation devient alors une stratégie qui trouve un juste équilibre entre ce qu'il faut conserver et les moyens à mettre en œuvre pour les conserver.

Pour développer sur le plan national, l'étude, la protection, l'utilisation et la gestion des ressources génétiques, un effort s'impose dans divers domaines : recherche, enseignement, agriculture, industrie, environnement, santé, coopération, etc.. Chacun de ces secteurs doit mobiliser tous ses opérateurs actuels ou potentiels - services publics, entreprises, organisations militantes - qu'ils soient nationaux, régionaux ou locaux ; faciliter le dialogue entre ces groupes ; mais aussi établir des liaisons avec les autres secteurs dont les préoccupations et le langage sont si différents. L'objectif est l'émergence sur le terrain et pas seulement dans les organigrammes, d'un réseau qui aide ses membres à réfléchir et avancer ensemble, et qui devienne crédible aux yeux des autorités, des médias et de l'opinion publique, crédible également à l'étranger, en rassemblant les acteurs capables de participer aux projets internationaux, d'y travailler efficacement et aussi d'expliquer les points de vue de leur pays.

- **L'absence d'une politique nationale en matière de conservation des ressources génétiques constitue un handicap pour la participation des Français à l'élaboration d'une véritable stratégie en la matière et celle de la France aux discussions et aux travaux internationaux dans ce domaine.**

Or, tout change, même l'idée que les hommes se font des ressources génétiques - et cette idée guide leur action. Les gènes ne sont plus vus comme il y a un quart de siècle, ni d'ailleurs les communautés vivantes ou les relations êtres vivants / milieu. De nouveaux fronts de découvertes peuvent s'ouvrir en matière de ressources génétiques et il faut y être attentif. A l'exercice des responsabilités se substitue le temps des exigences.

- **Il est important que la France se dote d'un observatoire de la diversité des ressources génétiques.**

Il permettra de répondre aux principales contraintes observées au cours de ce travail. Il pourra aborder le délicat problème des ressources génétiques animales. Il répondra à la nécessité d'une décision dans le domaine des ressources forestières. Il envisagera les champs au combien plus importants des ressources génétiques microbiennes et aquatiques, sources de nombreux développements industriels.

Dans ces conditions, les consommateurs bénéficieront du trésor génétique qu'ils auront su mériter, sans oublier l'intérêt intellectuel d'un thème étroitement lié à l'histoire des sociétés humaines. (A. Cauderon)

6. Conclusion

Faire des projections dans le futur apparaît être, à la lumière des informations qui viennent d'être rassemblées, une tâche risquée. Cependant, il semble que les modes d'obtention variétale et les relations avec les ressources génétiques, dans leur ensemble et particulièrement pour les végétales, vont évoluer selon trois axes : celui de la biodiversité, celui de la génomique et celui des biotechnologies. Tous les trois dépendent de la gouvernance qui sera établie en France et de l'avenir du paysage économique mondial.

Pour le premier, l'enjeu est sociétal et culturel. Il concerne les amateurs comme les professionnels, il porte sur la diversité biologique et ses usages, il est traversé de courants philosophiques variés. Il est en route et très clairement il est difficilement maîtrisé. Les avenir possibles seront indépendants du niveau de vie de nos concitoyens, mais dépendront de leurs ressentis et de leurs aptitudes à développer des démarches associatives. Tel qu'il apparaît aujourd'hui, le développement de cet axe doit conjuguer les capacités financières des pays riches et les attentes intellectuelles d'un habitant du monde pour mettre la biodiversité au sommet des préoccupations mondiales.

Pour le second, les connaissances en matière de génomes, d'expressions des gènes et d'intégration de ces expressions dans le développement des individus et de leur épanouissement dans des environnements variés vont continuer à s'accroître. Il suffit pour s'en convaincre de considérer le développement actuel des études concernant le séquençage complet du génome des plantes avec libre accès aux informations produites. Corrélativement les études de phénotypage restent plus confidentielles. La connaissance, qui se construit, va renouveler profondément la compréhension des ressources génétiques et apporter dans l'avenir les outils d'une gestion toujours plus dynamique et intelligente. Il se pourrait bien que ce dynamisme important génère une nouvelle approche des ressources génétiques qui seront encore plus étroitement liées au milieu et à une réponse aux besoins des agriculteurs, des transformateurs, des industriels ou des consommateurs.

Le troisième axe qui structure l'avenir est celui des biotechnologies. L'arrivée de la pensée "biotechnologie", comme celle des investissements financiers et industriels qui l'accompagnent, entraîne, de la part de la société, un nouveau regard sur la recherche. La sensibilité accrue de la société vis-à-vis du domaine biologique participe à la transformation accélérée des usages alimentaires et à des besoins nouveaux des consommateurs. Elle modifie les procédés de transformation, de conservation et de distribution des produits dérivés adaptés au goût des consommateurs. Les biotechnologies font puissamment évoluer le patrimoine des ressources biologiques. Dans ce contexte et dans l'ensemble de la démarche d'innovation qui se prépare, la société doit veiller à moduler sa demande afin de préserver la ressource. Cela passe par la mise en place d'un véritable débat public.

Il n'y a pas de temps à perdre. Nous sommes bien au temps des exigences à décliner en termes de choix, de maîtrise et de collaborations nationales et, sans doute, internationales.

7. Pour en savoir plus

7.1. Livres et rapports

Amélioration des plantes et biotechnologies. 1996, Y. Demarly, M. Sibi, John Libbey. Eurotext Edition, AUPELF – UREF, 170 pages.

Biotechnology-assisted Participatory Plant Breeding: Complement or Contradiction? A.M. Thro and C. Spillane. 2000, Working document n° 4, 140 pages.

Biotechnologies in Agriculture: A lot more than just GM crops. 2005, ISAAA, 39 pages.

Biotechnologies végétales : Environnement, alimentation, santé. A. Ricroch, Y. Dattée, M. Fellous. Vuibert édition, AFBV, 266 pages.

Biotechnology Provides New Tools for Plant Breeding. T.V. Suslow, B.R. Thomas, K.J. Bradford. 2002, Agricultural biotechnology in California series, 8043, 19 pages.

Breeding business. The future of plant breeding in the light of developments in patent rights and plant breeder's rights. N. Louwaars, H. Dons, .. [et al]. 2009, Center for Genetic Resources, The Netherlands, (CGN), 69 pages.

Carrefour de l'innovation agronomique. Qualité des fruits et légumes. 2010, Colloque INRA du 14 octobre, Avignon, 141 pages.
http://www.inra.fr/ciag/colloques_agriculture/qualite_des_fruits_et_legumes

EU Legislation on GMOs – An overview. 2010, D. Plan, G. Van den Eede. (Molecular Biology and Genomics Unit Head), Luxembourg : Publications Office of the European Union, 200 pages.

Glossaire de la biotechnologie pour l'alimentation et l'agriculture. A. Zaid, H. G. Hughes, E. Porceddu, F. Nicholas, 2004, FAO, 322 pages. Téléchargeable sur <http://www.fao.org/docrep/004/y2775f/y2775f00.htm>

Histoires de légumes : des origines à l'orée du XXI^{ème} siècle. M. Pitrat, C. Foury. 2004, Editions Quae, 410 pages.

Histoire et amélioration de cinquante plantes cultivées. C. Doré, F. Varoquaux. 2006, Collection Savoir faire, INRA, 812 pages.

Historical Perspectives on Apple Production: Fruit Tree Pest Management, Regulation and New Insecticidal Chemistries. P. J. Jentsch. 2009 Extension Associate Department of Entomology Cornell University's Hudson Valley Lab, 63 pages.

Industrial Biotechnology. Sustainable growth and economic success. W. Soetaert, E. J. Vandamme. 2010, Wiley – vch Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 500 pages.

International assessment of agricultural knowledge, science and technology for development (IAASTD): global report / edited by Beverly D. McIntyre . . . [et al.]. 2009, 606 pages.

La filière semences, au service de la terre. Contribution du GNIS. 2011, 25 pages.

Les fruits et légumes dans l'alimentation, enjeux et déterminants de la consommation. F. Caillavet, M. Causse, P. Combris, J. Dallongeville, M. Padilla, C. Renard, L.G. Soler. 2008, Editions Quae, 128 pages.

Méthodes de création de variétés en amélioration des plantes. A. Gallais. 2011, Éditions Quæ, 280 pages.

New plant breeding techniques. State-of-the-art and prospects for commercial development. M. Lusser, C. Parisi, D. Plan, E. Rodriguez-Cerezo. 2011, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 220 pages.

Novel plant breeding techniques. Consequences of new genetic modification-based plant breeding techniques in comparison to conventional plant breeding. 2009, JG Schaart, RGF Visser, Wageningen UR Plant Breeding, Wageningen University and Research Center, 60 pages.

OECD. 2010, Challenges for agricultural research. 128 pages.

OECD. 2011, Adaptation de l'agriculture au changement climatique : quel rôle peut jouer la biotechnologie ? 128 pages.

Prophyta. The annual 2011. Journal for breeders and producers of plant material. 52 pages.

Prospective : Avenir du secteur semencier. Répercussion pour la recherche. 1998, Série Bilan et perspectives INRA, tome 1, 154 pages et tome 2, 155 pages.

Quel avenir pour l'amélioration des plantes ? J. Dubois, Y. Demarly. 1995, Edition AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris, 514 pages.

Quelles sont les perspectives d'amélioration des plantes cultivées tolérantes à la sécheresse ? L.Gaufichon, J.-L. Prioul, B. Bachelier. 2010 Editions Fondation Farm, 61 pages.

Quels indicateurs pour suivre la diversité génétique des plantes cultivées ? Le cas du blé tendre cultivé en France depuis un siècle. Rapport FRB, Série Expertise et synthèse, 2011, 44 pages.

Seeds for the Future: The Impact of Genetically Modified Crops on the Environment. J.A. Thomson. 2007, Cornell University Press, 158 pages.

Semences et agriculture durable. 2011, P. Vialle, rapport CGAAER, 206 pages.

Semences et recherche : des voies du progrès. 2009, Avis et rapports du Conseil économique, social et environnemental présenté par J. Giroud. 96 pages.

The global pipeline of new GM crops: implications of asynchronous approval for international trade. A.J. Stein, E. Rodriguez-Cerezo. 2009, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 114 pages.

The resource outlook to 2050: by how much do land, water and crop yields need to increase by 2050? J. Bruinsma. 2009, FAO Expert Meeting on How to Feed the World in 2050, 33 pages.

Understanding the links between agriculture and health: focus 2020 / edited by C. Hawkes and M. T. Ruel. 2006, 36 pages.

Wheat - Global Alliance for Improving Food Security and the Livelihoods of the resource-poor in the Developing World. 2010, Draft proposal submitted by CIMMYT and ICARDA, to the CGIAR Consortium Board, 4 pages.

7.2. Articles

Amélioration des plantes et disparition des variétés de pays. C. Scribe. 2001, Dossier de l'environnement de l'INRA, 21, 83 - 90.

Biotechnology in agriculture. 2006, R.W. Herdt, Annu. Rev. Environ. Resour., 31, 265 – 295.

Cent ans de sélection du blé en France et en Belgique. 1995, G. Doussinault, D'après Quel avenir pour l'amélioration des plantes ? Ed. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris. 3 – 8.

Crop Improvement by Conventional Breeding or Genetic Engineering: How Different Are They? R. Manshart. 2004, Biotechnology, 5, 1 – 3.

Évolutions et ruptures en amélioration des plantes. H. Feyt. 2007, IRD Éditions, collection Colloques et séminaires, 215 – 228.

Five crop researchers who could change the world. E. Marris. 2008, Nature, 456, 563 – 568.

La domestication des plantes : de la cueillette à la post génomique. J. Jahier, B. Chalhoub, A. Charcosset. 2006, Biofutur, 266, 28 – 33.

Méthodes et objectifs de sélection des plantes fourragères. 2005, P. Bourdon, D. Noël, M.-C. Gras, J.-F Chosson. Fourrages 183, 377 – 388.

Objectifs et critères actuels de la sélection des luzernes pérennes. 1996, P. Lonnet. Fourrages 147, 303 – 308.

Quelles perspectives pour l'innovation variétale à l'INRA ? M. Lefort et G. Riba. 2006, Dossier de l'environnement de l'INRA, 30, 57 – 64.

Quels critères de sélection variétale pour l'avenir ? J.P. Fonbaustier, F.-X. Oury. 2006, Dossier de l'environnement de l'INRA, 30, 169 – 172.

The Theory and Practice of Genetically Engineered Crops and Agricultural Sustainability. D. E. Ervin, L. L. Glenna, R. A. Jussaume Jr. Sustainability, 2011, 3, 847-874.

7.3. Sites Internet

AgBioWorld - <http://www.agbioworld.org>

AgrowKnowledge - <http://agrowknow.org>

Arcadia Biosciences - <http://www.arcadiabio.com/>

Bill & Melinda Gates Foundation - Agricultural Development - <http://www.gatesfoundation.org/topics/Pages/agricultural-development.aspx>

Bioversity International - <http://www.bioversityinternational.org>

CheckBiotech - <http://www.checkbiotech.org>

Cirad - <http://www.cirad.fr>

Consultative Group on International Agricultural Research (CGIAR) - <http://www.cgiar.org/index.html>

DuPont Biotechnology - http://www2.dupont.com/Biotechnology/en_US

Food & Agriculture Organization of the United Nations (FAO) - <http://www.fao.org>

GeneGenie - <http://www.genegenie.com.au>

GNIS - <http://www.gnis.fr>

Golden Rice Project - <http://www.goldenrice.org>

INRA - <http://www.inra.fr>

International Maize & Wheat Improvement Center (CIMMYT) - http://www.cimmyt.org/english/wpp/gen_res/index.cfm

International Rice Research Institute (IRRI) - <http://www.irri.org>

Planet Biotechnology - <http://www.planetbiotechnology.com>

Molecular Farming News - <http://www.molecularfarming.com/news2.html>

Monsanto - <http://www.monsanto.com>

Science Daily - http://www.sciencedaily.com/news/plants_animals/biotechnology

Syngenta Foundation for Sustainable Agriculture - <http://www.syngentafoundation.org>

The Center for Global Food Issues - <http://www.cgfi.org>

USDA Biotechnology - <http://www.aphis.usda.gov/biotechnology>

Ventria Bioscience - <http://www.ventria.com>

7.4. Conférences et articles de loi

34^{ème} Conférence sur la carotte. Des recherches toujours actives. 2010, Infos CTIFL, 266, 6 pages.

Amélioration des plantes : évolution des méthodes. A. Charrier. 2009, Présentation cours Montpellier Sup Agro.

Council decision of 3 October 2002 establishing, pursuant to Directive 2001/18/EC of the European Parliament and of the Council, the summary

notification information format for notifications concerning the deliberate release into the environment of genetically modified organisms for purposes other than for placing on the market.

Directive 2001/18/CE du Parlement européen et du Conseil du 12 mars 2001 relative à la dissémination volontaire d'organismes génétiquement modifiés dans l'environnement et abrogeant la directive 90/220/CEE du Conseil.

European Food Safety Authority. The Efsa Journal available online: www.efsa.europa.eu/efsajournal.htm

Les 6^{ème} rencontres du Végétal. Innovation et environnement dans les filières et territoires du végétal spécialisé. Quelles conséquences pour les démarches d'expérimentation ? Angers 10 et 11 janvier 2011.

List of SNIFs circulated under Article 9 of Directive 90/220/EEC From 21 October 1991 to 08 September 2008. For the latest update see : <http://bgmo.jrc.ec.europa.eu/>

Loi n° 2011-1843 du 8 décembre 2011 relative aux certificats d'obtention végétale. NOR : AGRX1119422L
<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000024940172&dateTexte=&categorieLien=id>

Textes de la Convention sur la diversité biologique :
<http://www.cbd.int/convention/text/>

Textes du Protocole de Nagoya sur l'accès et le partage des avantages :
<http://www.cbd.int/abs>

8. Appel à candidature

Appel à candidature n° 10157; groupe de travail BioPaGe

Sujet :

Appel à candidature n° 10157; groupe de travail BioPaGe De :

patrick dedinger <patrick.dedinger@agriculture.gouv.fr> Date :

Wed, 30 Jun 2010 15:45:07 +0200

Pour :

liste-multi-membres-CGAAER <liste-multi-membres-CGAAER@agriculture.gouv.fr>, liste-sec techniques-

CGAAER <liste-sec-techniques-CGAAER@agriculture.gouv.fr>

n°10157

Il est fait appel à candidatures pour participer aux travaux du groupe de travail BioPaGe portant sur les évolutions des biotechnologies et des ressources génétiques et selon les termes de la feuille de mission ci-jointe.

Il s'agit d'un des volets du programme de travail 2010 de la S7. Le groupe est piloté par Dominique Planchenault.

Un document sur l'avancée des réflexions sera attendu pour la fin de l'année 2010. Une publication d'une synthèse significative sera demandée en juin 2011.

NB: Les membres du CGAAER ayant participé au groupe de préfiguration chargé d'élaborer le projet de feuille de mission sont invités aussi à faire acte de candidature.

Ce groupe de travail est rattaché à la septième section.

Merci de me faire part de votre candidature, avec copie à la Présidente de la septième section et au pôle missions (Alain Escalière).

Cordialement,

Patrick DEDINGER Secrétaire
général