

Quel progrès génétique pour une agriculture durable ?¹

Jean-Marc Meynard et Marie-Hélène Jeuffroy

UMR d'Agronomie INRA – INA-PG, 78850 Thiverval-Grignon ; meynard@grignon.inra.fr ; jeuffroy@grignon.inra.fr

1. Le besoin de variétés innovantes pour une agriculture en mutation

Dans le passé, les choses étaient relativement claires : le développement de l'agriculture était essentiellement apprécié par des critères économiques, et les variétés demandées par les agriculteurs et les filières étaient celles qui assuraient une productivité à l'hectare élevée et une qualité du produit répondant avec régularité à la demande du marché (Meynard et Girardin, 1991). La sélection végétale a ainsi fortement contribué à l'accroissement de la production agricole et de la productivité du travail, ainsi que, chaque fois que celle-ci était valorisée par le marché, à l'amélioration de la qualité technologique ou nutritionnelle des récoltes.

Cependant, du fait de cette attention quasi exclusive portée par l'ensemble du monde agricole aux performances économiques à court terme, on a assisté à une dégradation progressive de nombreux indicateurs environnementaux : pollution des eaux par nitrates et pesticides, réduction de la biodiversité, réduction du débit des rivières ou baisse des nappes phréatiques dans les régions d'irrigation intensive, érosion et inondations de villages par les eaux de ruissellement, atteintes à l'harmonie ou à la valeur culturelle de paysages (IFEN, 1997 ; Pujol et Dron, 1998). Ce n'est pas, intrinsèquement, le fait d'accroître la production par hectare qui contribue à dégrader l'environnement, c'est le fait d'évaluer les choix techniques sur leur seule efficacité économique qui conduit à des pratiques préjudiciables à l'environnement (Meynard et Girardin, 1991). Si l'on observe aujourd'hui, dans un nombre croissant de captages, des teneurs en pesticides supérieures aux normes (IFEN, 2001), c'est parce qu'ils sont devenus le moyen essentiel de maîtrise des ennemis des cultures. Cela s'explique par leur grande efficacité et leur simplicité d'emploi, comparées à celles des méthodes de lutte biologique ou culturales ; ils ont contribué à l'accroissement de la productivité du travail agricole et à l'amélioration de la régularité de qualité de nombreux produits. Mais la recherche d'une maîtrise de leur impact environnemental s'est concentrée sur les procédures d'homologation. Les utilisateurs de produits phytosanitaires n'ont qu'une vague idée des nuisances qu'ils produisent. Ils n'ont guère les moyens d'intégrer, dans le choix d'une matière active, d'une stratégie de traitement ou d'une variété (qu'il faudra, en fonction de sa résistance aux maladies, plus ou moins traiter), les impacts sur la faune ou la qualité de l'eau. De même, le retournement des prairies permanentes, continu en France depuis un demi-siècle, a contribué à la réduction de la biodiversité, a supprimé, en bordure de rivières, des zones favorables à l'épuration des eaux de surface, a accru les risques d'érosion et a réduit la quantité de carbone séquestré dans la matière organique. Il a été favorisé successivement par l'intensification des productions d'élevage, l'attribution de subventions pour favoriser le drainage des zones humides, le soutien des prix des productions céréalières, l'attribution de « primes » en fonction de la surface en céréales et oléoprotéagineux (SCOP) excluant les prairies permanentes, et le soutien spécifique aux cultures irriguées qui se sont substituées aux prairies dans les vallées (Martin et Meynard, 1997 ; Meynard *et al.*, 2003).

Les variétés cultivées ne sont pas directement responsables des nuisances, mais il est indéniable qu'elles ont été sélectionnées pour les systèmes agricoles qui en sont responsables. Il en est ainsi, par exemple, des variétés de blé qui dominent actuellement le marché, dont l'usage contribue indirectement aux pollutions des eaux par nitrates et phytosanitaires : leur productivité élevée ne s'exprime qu'accompagnée d'une protection phytosanitaire suivie ; leur résistance très élevée à la verse autorise des excès d'engrais azoté sans que cela entraîne trop de préjudice pour l'agriculteur. La grande réussite de la sélection de maïs précoces très productifs a indirectement favorisé l'expansion des

¹ D'après Meynard J.M., Jeuffroy M.H., 2002. Progrès génétique et agriculture durable. *Le Sélectionneur Français*, 53, 69-82. Avec l'aimable autorisation de l'éditeur.

surfaces irriguées et le retournement de prairies permanentes auxquelles le maïs s'est souvent substitué. En d'autres termes, l'activité de sélection végétale est très cohérente avec le système technico-économique dans lequel sont utilisés ses produits. Si le système change, la sélection doit évoluer (voir aussi, dans ce dossier, l'article de Bonneuil *et al.*, p. 29).

Cette mutation est non seulement inéluctable, mais elle est déjà engagée. Pour devenir plus durable, l'agriculture devra concilier impératifs économiques et environnementaux, maîtrise du court terme et préservation du long terme, intérêts des acteurs du monde agricole et attentes des consommateurs et des citoyens vis-à-vis de celui-ci. Les moteurs économiques de cette mutation se mettent progressivement en place, sous l'impulsion des différents acteurs concernés (Pujol et Dron, 1998) : contrats territoriaux d'exploitations puis contrats d'agriculture durable, mesures agri-environnementales et écotaxes diverses, conditionnalité des soutiens publics, stratégies de la grande distribution basées sur l'attrait des consommateurs pour les produits d'une agriculture « propre », développement de filières de produits « biologiques », « issus de la production intégrée » ou du commerce équitable, des Associations pour le maintien d'une agriculture paysanne (AMAP), certification ISO 14001 d'entreprises agro-industrielles... On recense ainsi des initiatives des agriculteurs, des pouvoirs publics, des industries liées à l'agriculture, de la grande distribution, etc. Nous ne discuterons pas ici de l'impact actuel de ces dispositifs ou de leur efficacité environnementale potentielle, mais leur accumulation suffit à montrer que le mouvement vers une agriculture plus durable est engagé, même s'il n'est sans doute pas encore sensible au niveau du marché des variétés et semences.

Du fait de la diversité des dispositifs en cause, l'évolution sera plus ou moins rapide, plus ou moins radicale, selon les productions, les régions, les exploitations. *A minima*, on aura besoin de nouveaux systèmes de culture économes en eau, en intrants, globalement moins polluants et moins agressifs pour l'environnement, qui nécessiteront, à leur tour, une adaptation des variétés. De manière plus ambitieuse, dès lors que l'agriculture voit reconnaître sa multifonctionnalité, la prise en compte du rôle des systèmes agricoles dans la typicité des paysages, la prévention de l'érosion, la séquestration du carbone dans les sols² ou la préservation de la biodiversité peuvent entraîner une demande de systèmes de production innovants et, en conséquence, de variétés ayant des caractéristiques spécifiques. Des critères nouveaux devront être introduits dans les schémas de sélection, les ressources génétiques devront être examinées sous un angle renouvelé et des constructions génétiques originales imaginées.

2. Les nouveaux axes du progrès génétique

Ces éléments de contexte étant posés, nous allons maintenant essayer de montrer comment ces évolutions vont nous amener à modifier notre perception du progrès génétique et nous conduire à envisager de nouveaux objectifs de sélection. Nous aborderons cette question sous les deux angles évoqués précédemment, variétés pour des systèmes économes en intrants puis variétés pour une agriculture multifonctionnelle. Les premières sont nécessaires partout et rapidement ; l'intérêt des secondes est aujourd'hui plus localisé et ne prendra sans doute de l'ampleur qu'à plus long terme.

Envisager de nouveaux objectifs de sélection, liés en particulier à la protection de l'environnement, ne conduit bien sûr pas à remettre en cause les objectifs de sélection classiques, liés au marché et à l'économie des filières, qui restent essentiels, même si cet article met moins l'accent sur eux. Nous ne préjugeons pas, dans les lignes qui suivent, des modalités qui permettraient d'atteindre ces nouveaux objectifs, qu'il s'agisse de l'existence d'une variabilité génétique au sein des espèces cultivées sur les caractères considérés ou de l'utilisation de biotechnologies.

2.1. Variétés pour des systèmes économes en intrants

Variétés résistantes aux maladies

Pour qu'une résistance accrue des variétés aux maladies permette de réduire les intrants, il faut que soient associées, dans le même génotype, des résistances aux différentes maladies susceptibles d'être traitées par le même fongicide. Le problème est qu'il est difficile au sélectionneur de conjuguer ces exigences avec un rendement et une qualité élevés (Lonnet, 1997). Sur le blé, par exemple, les variétés multirésistantes aux maladies accusent toujours un déficit de rendement potentiel de quelques quintaux par hectare (de l'ordre de 5 aujourd'hui, Loyce *et al.*, 2001) par rapport aux variétés moins résistantes

² Le stockage de carbone dans la matière organique des sols contribue à une réduction de la teneur en CO₂ de l'atmosphère.

de la même génération. Pour retrouver, avec ces variétés multirésistantes, des marges comparables à celles des variétés classiques, il faut non seulement baisser les fongicides mais aussi les autres intrants. Par exemple, une plus faible densité de peuplement et une fertilisation azotée en baisse réduisent les risques de maladies (Saulas et Meynard, 1998). Pour le prix actuel du blé, les variétés multirésistantes associées aux itinéraires techniques à bas niveau d'intrants assurent des marges plus élevées que les variétés classiques en itinéraire technique intensif, comme le montrent clairement les résultats du réseau conduit conjointement entre 2000 et 2002 par les sélectionneurs du GIE Club des Cinq, l'INRA et Arvalis-Institut du végétal (Loyce *et al.*, 2001 ; Rolland *et al.*, 2003). La combinaison, dans un même peuplement végétal, de résistances multiples peut être également atteinte par des associations variétales ou des variétés de populations.

Dans le cadre de telles stratégies, d'autres caractères variétaux que les résistances aux maladies peuvent être valorisés. Par exemple, les variétés de blé d'hiver adaptées aux semis tardifs et tolérantes aux carences azotées constituent un atout supplémentaire dans des itinéraires techniques à bas intrants. En associant ainsi l'usage des résistances variétales à des stratégies globales de protection intégrée, on réduit la pression de sélection qui s'exerce sur les populations parasites et on accroît la durée d'efficacité des résistances variétales : évidemment, une agriculture durable suppose que les résistances aux pathogènes soient également durables. Il reste beaucoup à apprendre pour pouvoir gérer efficacement les résistances variétales et retarder leur contournement par les populations de pathogènes (Nelson, 2001). Cependant, l'intérêt des mélanges variétaux et de la diversification spatiale des gènes de résistance est déjà bien démontré et ces techniques mériteraient d'être plus utilisées (de Vallavieille-Pope *et al.*, 1991 ; voir l'article, dans ce dossier, de Vallavieille-Pope *et al.*, p. 101). Les techniques de protection intégrée peuvent également contribuer à la gestion de la durabilité des résistances : dès lors que l'on dispose, comme évoqué plus loin, de variétés de blé tolérantes aux carences azotées, on peut leur appliquer des stratégies de fertilisation rationnée pendant le tallage et le début de la montaison, ce qui diminue l'importance des épidémies d'oïdium, donc la probabilité de contournement des résistances variétales à cette maladie.

Variétés tolérantes aux adventices

Les variétés tolérantes aux adventices sont avant tout compétitives et aptes à dominer les adventices pour le partage des ressources (Debaeke, 1997). Ainsi, les variétés les plus compétitives vis-à-vis de l'interception de l'énergie lumineuse sont hautes et de montaison précoce ; elles couvrent rapidement le sol en début de végétation ou maintiennent en fin de cycle un indice foliaire vert élevé. Cependant, la compétitivité de la culture peut également être accrue par la modification d'autres techniques, comme la densité ou la date de semis (Debaeke, 1997). La tolérance aux adventices peut ainsi être obtenue indirectement par le biais d'une adaptation à ces modifications de techniques. Par exemple, un colza semé tôt sur une parcelle riche en azote (éventuellement après un apport de matière organique) croît très vite et, non seulement, épure le sol de ses nitrates mais devient rapidement très compétitif par rapport aux adventices et aux repousses de céréales (Dejoux, 1999), ce qui devrait permettre de réduire les traitements herbicides. Cependant, ce colza très développé à l'automne apparaît relativement sensible à la verse et surtout au phoma (Aubertot *et al.*, 2004). Une variété de colza adaptée à cette double fonction de piégeage de nitrates et « d'étouffement » de mauvaises herbes devra donc être résistante à la fois à la verse et au phoma.

Le plus efficace serait de conjuguer dans le même cultivar des caractères de tolérance aux mauvaises herbes et des caractères qui favorisent la lutte non chimique. Ainsi, Meynard *et al.* (1997) suggèrent qu'une variété de blé bien adaptée à l'agriculture biologique devrait conjuguer une hauteur de paille élevée (favorisant sa compétitivité), une tolérance aux semis tardifs (liés entre autres à la pratique des faux semis) et une résistance à l'arrachage par la herse étrille, outil privilégié de la lutte contre les adventices en système biologique. On peut faire l'hypothèse que ce dernier caractère est fonction de l'ancrage des racines adventives.

Variétés peu exigeantes en azote

Les travaux réalisés sur la variabilité génétique du blé pour la réponse du rendement à l'azote sont très significatifs des potentialités qui existent dans ce domaine. Des études récentes (Le Gouis et Pluchard, 1996) ont montré qu'en situation de fertilisation azotée réduite, la production de certaines variétés était beaucoup moins affectée que celle de la plupart des autres. Un tel comportement peut être lié à une plus grande efficacité d'absorption du système racinaire (Van Sanford et MacKown, 1986 ; Le Gouis *et al.*, 2000a), du fait éventuellement de son plus grand développement. Cette variabilité de la croissance du système racinaire sera, on peut le supposer, surtout discriminante en sols profonds car, dans la majorité des sols, la progression des racines en profondeur est stoppée par la faible porosité du

sous-sol. La tolérance à des carences azotées peut également être liée à une moindre sensibilité du nombre de grains par m² à un état azoté limitant de la culture ou à une capacité supérieure de rattrapage d'une réduction du nombre de grains par une augmentation du poids de mille grains (Bouchard et Jeuffroy, 2000 ; Le Gouis *et al.*, 2000b). Une tolérance aux carences azotées peut conférer à une variété un atout pour l'agriculture biologique, où l'azote est l'un des premiers facteurs limitants des céréales (David *et al.*, 2005). En agriculture conventionnelle, une telle variété permettrait de réduire les apports d'engrais azoté, induisant une amélioration du bilan énergétique, une réduction des pertes gazeuses directes (volatilisation) et de l'excédent de bilan sur la rotation, et une amélioration du bilan économique de la culture. Enfin, on observe entre variétés de blé de grandes différences d'absorption d'azote après floraison, qui expliquent une part importante de la variabilité des teneurs en protéines (Barbottin, 2004). Il serait particulièrement intéressant de repérer précocement les variétés capables de bien valoriser des apports tardifs d'azote, fréquents aujourd'hui sur blé. Des critères observables précocement et facilement mesurables sont actuellement recherchés pour caractériser les variétés de blé (soit en cours de sélection, soit lors de leur inscription) par rapport à leur comportement vis-à-vis de l'azote (Barbottin et Jeuffroy, travaux en cours).

Sur des espèces comme le colza ou le pois, une amélioration de la remobilisation de l'azote des organes sénescents vers les organes en croissance pourrait être profitable à l'environnement et à la qualité des récoltes. Sur colza, les feuilles tombent au sol avec des teneurs en azote qui peuvent être assez élevées, jusqu'à 3 % d'après Dejoux (1999). Ainsi, des variétés qui remobiliseraient mieux l'azote des feuilles avant leur chute permettraient de réduire les besoins de la culture par un recyclage interne (réduisant par là-même le besoin d'engrais) mais aussi de limiter la quantité d'azote minéral restant dans le sol après la récolte (qui peut contribuer à des fuites de nitrate dans l'hiver qui suit). On pourrait également en espérer un accroissement du transfert d'azote vers les graines, et donc une augmentation de la teneur en protéines des tourteaux, qui pourraient ainsi être mieux valorisés en alimentation animale.

Variétés tolérantes à la sécheresse

Bien souvent, la première manifestation de la sécheresse est un manque d'azote (Sebillotte *et al.*, 1978), car la couche arable, où se localise en agriculture intensive la majeure partie de l'azote minéral³, est desséchée bien avant que la réserve utile ne s'épuise : une variété tolérante aux stress azotés présente donc déjà un premier atout pour les régions sèches.

Des variétés résistantes au stress hydrique sont nécessaires, d'une part, pour limiter les besoins en eau d'irrigation et, d'autre part, pour éviter la déprise dans les régions de sols superficiels, où le facteur limitant majeur de la production est souvent le manque d'eau. Les causes de différences génétiques de résistance au stress hydrique ont été abondamment étudiées (Ludlow et Muchow, 1990 ; Monneveux *et al.*, 1997). En région tempérée, les mécanismes majeurs de réponse des plantes au manque d'eau correspondent à des ajustements au niveau de la plante entière (Tardieu, 1996) permettant de réduire la perte d'eau par transpiration (fermeture stomatique, réduction de l'expansion foliaire, sénescence foliaire) ou d'accroître le prélèvement d'eau (accroissement de l'expansion racinaire). Les variétés tolérantes à la sécheresse mettent en œuvre ces mécanismes de manière efficace et précoce ou présentent des organes reproducteurs peu affectés par le stress : durée de cycle calée sur la période où l'eau est disponible, réduction de la sensibilité du développement reproducteur aux « phases critiques », étalement des stades reproducteurs de manière à répartir les risques face à un stress temporaire. La capacité à recommencer à taller après la levée d'un stress et l'étalement de la floraison lié au tallage constituent ainsi, chez le mil chandelle, des facteurs essentiels de la tolérance au stress hydrique (de Rouw et Winkel, 1998).

2.2. Variétés et espèces pour une agriculture multifonctionnelle

Des génotypes pour développer de nouveaux usages des produits agricoles

L'agriculture est traditionnellement productrice de denrées alimentaires. Une évolution importante de son rôle dans la société est de produire de plus en plus pour les usages non alimentaires : énergie renouvelable (les variétés de blé, de colza, de betteraves adaptées à la production de biocarburants doivent-elles avoir des caractéristiques spécifiques ?), matières premières pour l'industrie chimique, produits pharmaceutiques (Pujol et Dron, 1998). En dehors des biocarburants, les débouchés ne représentent souvent que de petites filières, des niches, mais parfois à forte valeur ajoutée.

³ L'azote apporté par les engrais et l'azote minéralisé par l'humus du sol et les résidus de la culture précédente.

Sélectionner spécifiquement pour ces niches sera indispensable, malgré la surface concernée très faible.

Cependant, un développement de filières non alimentaires pour des espèces dont l'usage majeur restera alimentaire imposera de maîtriser les flux de gènes entre cultures ayant des débouchés différents. Ce qui est assez facile aujourd'hui pourrait devenir complexe demain si les filières se multiplient ou si des seuils de contamination fortuite très bas sont imposés par l'aval ou la réglementation. Les premiers résultats obtenus sur la difficulté de faire cohabiter, dans le même paysage agricole, des variétés de maïs ou de colza OGM avec les variétés d'une filière « garantie non OGM » ou d'une filière d'agriculture biologique (Le Bail et Meynard, 2001 ; Messéan *et al.*, 2006) préfigurent peut-être les difficultés à venir pour gérer la traçabilité et la ségrégation des filières sur les espèces totalement ou partiellement allogames. La sélection peut proposer des solutions intéressantes, par exemple, en colza, l'utilisation d'associations variétales comportant une majorité de mâles stériles pour limiter la dispersion du pollen, ou la création de variétés cléistogames⁴, qui pourraient à la fois être moins allogames et émettre moins de pollen (Fargue *et al.*, 2001).



Diversification des espèces sélectionnées

Le coût élevé des investissements en sélection aboutit à une concentration croissante des efforts sur un petit nombre d'espèces, caractérisées par un marché de semences porteur. De ce fait, on observe un décalage croissant de productivité entre les « grandes » espèces, sur lesquelles il y a des moyens et de la concurrence, et les « petites » espèces, peu travaillées en sélection. Or, la diversité des espèces, tant au sein des rotations que dans l'espace, est considérée, à juste titre, comme un point clef de l'agriculture durable. En effet, les rotations courtes favorisent les parasites telluriques (INRA, 1986) et les adventices (Debaeke, 1997) ; les assolements peu diversifiés sont favorables au développement d'épidémies de maladies et de populations de ravageurs à dispersion aérienne (Riba et Silvy, 1989). La recherche d'une diversification des cultures devrait créer une demande de sélection pour des espèces peu travaillées aujourd'hui. Les pouvoirs publics pourraient favoriser celle-ci par une politique volontariste, qui supposerait non seulement d'encourager la sélection sur ces espèces, mais aussi l'organisation de filières pour leurs produits.

Dans le cadre de cette diversification, une attention particulière devrait être portée aux légumineuses : la fixation symbiotique permet en effet d'économiser l'énergie utilisée dans la synthèse des engrais et de réduire les pertes gazeuses (NH_3 , N_2O) pendant la culture (Munier-Jolain et Carrouée, 2002). De plus, on sait depuis longtemps que les légumineuses fournissent une quantité d'azote importante à la culture qui suit, ce qui permet d'économiser de l'engrais sur cette dernière, à condition toutefois de prendre des précautions particulières pour maîtriser les fuites de nitrate. Pour toutes ces raisons, on pourrait imaginer que les systèmes de culture utilisant beaucoup de légumineuses bénéficient d'un soutien public spécifique, au titre de l'environnement. Augmenter la productivité, comme dans le cas du pois d'hiver par rapport au pois de printemps ou la valeur d'utilisation des légumineuses, par une teneur en protéines des graines plus élevée, une digestibilité accrue... pourrait permettre d'accroître l'intérêt économique de ces espèces et donc leur fréquence dans les rotations. Évidemment, il serait souhaitable d'améliorer l'efficacité de la fixation symbiotique des légumineuses, soit en sélectionnant des variétés affectant une plus grande quantité de carbone aux nodosités (mais on peut craindre que cela entraîne une perte de rendement), soit en améliorant l'efficacité de la fixation (rapport entre azote fixé et carbone consommé). Cependant, que l'on se focalise sur la sélection du rhizobium ou sur celle de la légumineuse, une attention particulière doit être accordée au fonctionnement de la symbiose en milieu non optimal. Les milieux peu favorables à la nodulation (sols motteux, tassés, battants...) sont en effet très fréquents en parcelles agricoles et sont responsables du fait que l'azote est l'un des principaux facteurs limitants du rendement du pois protéagineux dans le Bassin Parisien (Doré *et al.*, 1998).

⁴ Cléistogamie : mode de reproduction dans lequel la fécondation se produit avant ouverture de la fleur, assurant ainsi l'autofécondation. In Conseil international de la langue française : *Dictionnaire d'agriculture*. Editions CIFL-PUF, Paris, 1999, 1 111 p.



Le développement des usages non alimentaires pourrait être favorable à cette diversification des cultures à condition que les filières s'organisent autour de nouvelles espèces et non autour de variétés spécifiques des espèces les plus cultivées. Pour les biocarburants, une filière à base de plantes lignocellulosiques telles que le miscanthus, les taillis à courte rotation ou le panic semble ainsi plus souhaitable que les filières basées sur le blé ou le colza, qui atteignent déjà dans de nombreuses régions les limites agronomiques de leur extension.

Des plantes de couverture et d'interculture, pour des fonctions de plus en plus nombreuses

Les « cultures intermédiaires » occupent la parcelle entre deux cultures de rapport. Autrefois appelées « engrais verts », en liaison avec leur objectif d'amélioration de la portance du sol et de sa stabilité structurale, elles jouent aujourd'hui davantage un rôle de « cultures pièges à nitrate » (CIPAN). Il serait souhaitable d'améliorer la capacité d'absorption d'azote de ces dernières. Cette amélioration devrait porter sur une large gamme d'espèces, afin d'éviter la multiplication des inoculum de maladies des plantes cultivées (par exemple, le seigle, utilisé en CIPAN, augmente le risque de piétin échaudage du blé ou la moutarde celui du sclérotinia ...).

On songe aujourd'hui à utiliser les cultures intermédiaires pour leur effet de « biofumigation » (effet toxique sur certains pathogènes du sol). Par exemple, les glucosinolates de certaines espèces du genre *Brassica* se transforment en isothiocyanates, à effet fongicide⁵ (Angus *et al.*, 1994). On étudie leur effet nématocide ou herbicide, comme dans le cas des plantes à effet allélopathique (Delabays *et al.*, 1998). À l'extrême, certaines cultures intermédiaires peuvent être utilisées pour dépolluer des sols de métaux lourds accumulés (bioremédiation des sols). L'optimisation de ces différents effets peut devenir un objectif de la sélection de plantes à cycle court non productives, dès lors que, sous l'impulsion de réglementations ou de labels, se développeront les systèmes utilisant plus qu'aujourd'hui les apports potentiels des plantes d'interculture.

En région intertropicale, se développent actuellement de nouveaux systèmes écologiques basés sur la présence permanente dans le champ d'un couvert végétal, constitué successivement des plantes de production et de « plantes de couverture » (Séguy *et al.*, 1996). Le sol n'est jamais labouré et le semis des cultures est réalisé dans le mulch de matières organiques issu de la destruction des plantes de couverture. En France, l'enherbement des interrangs est pratiqué depuis longtemps en vigne ou en verger, où il joue un rôle important dans la prévention de l'érosion et le piégeage des nitrates (Lafosse *et al.*, 2001). De plus, ces plantes de couvertures assurent une régulation, par la compétition, de l'alimentation hydrique et minérale de la plante cultivée, qui peut être favorable à la qualité des fruits ou de la vendange. Des « systèmes sans travail du sol avec couverture végétale permanente » sont actuellement à l'étude en grande culture (de Tourdonnet *et al.*, 2003). Les intérêts avancés concernent la prévention de l'érosion, l'amélioration de l'activité biologique et de la structure du sol, l'accroissement de la séquestration du carbone... et, pour l'agriculteur, la réduction des temps de travaux. Le développement de tels systèmes en région tempérée induirait un besoin de plantes de couverture fabriquant peu de biomasse aérienne, pour limiter la compétition avec la plante cultivée, et beaucoup de biomasse racinaire, pour fournir un substrat organique à la faune du sol⁶, et qui n'aient pas de parasites communs avec les plantes cultivées (Ghiloufi *et al.*, 2001). Si de telles plantes n'existent pas, il faudra les inventer...

Des génotypes spécifiques pour l'interface entre espaces agricoles et urbains

La prise en compte de la multifonctionnalité de l'agriculture rend nécessaire de considérer le rôle important que jouent les espaces agricoles dans la vie des non-agriculteurs, dans la qualité des paysages. Pour atteindre cet objectif, des variétés de caractéristiques spéciales peuvent être souhaitées à l'interface des espaces agricoles et urbains. Par exemple, en zone périurbaine, il est de plus en plus difficile d'exercer son métier d'agriculteur, à cause du morcellement parcellaire, de l'imbrication des parcelles avec les zones habitées, de la présence d'oiseaux en quantité importante qui interdisent certaines cultures, de l'existence de rocades et d'autoroutes qui allongent les temps de déplacement d'une parcelle à l'autre. Or, dans ces zones périurbaines, les terres agricoles sont aujourd'hui

⁵ La sélection, pour la richesse de leurs parties végétatives en glucosinolates, de variétés issues d'hybrides interspécifiques (*Sinapis alba* x *Brassica napus*, ou *Brassica rapa* x *Brassica nigra*) a débuté à l'université de l'Idaho (Brown *et al.*, 1999).

⁶ La faune a un rôle essentiel pour la porosité du sol dans ces systèmes sans travail du sol.

considérées, non plus comme des réserves foncières, mais comme des « poumons verts », des sources de paysages (Fleury et Donadieu, 1997). L'agriculture périurbaine appelle donc particulièrement des variétés nécessitant peu d'interventions techniques ou d'intrants. On peut imaginer que cette agriculture bénéficie, à moyen terme, d'un soutien spécifique des collectivités locales, intéressées par son maintien. Dans ce cas, ce soutien pourrait être conditionné à l'emploi de géotypes choisis pour leurs qualités esthétiques, qu'il s'agisse de variétés pures ou de mélanges variétés cultivées et d'adventices florifères (par exemple, l'association blé/coquelicot/bleuet des images d'Epinal).



Variétés et espèces pour les espaces interstitiels

L'agriculture durable accorde beaucoup d'importance aux espaces interstitiels, bordures de routes et chemins, bordures de champ, qui représentent potentiellement des sources d'auxiliaires pour la lutte contre les ennemis des cultures, des abris ou des corridors pour la faune sauvage et des obstacles au ruissellement (Baudry et Papy, 2001 ; Debras *et al.*, 2001). Afin de remplir ces rôles de manière efficace, la composition botanique de ces espaces doit être bien maîtrisée. Un marché spécifique pour les plantes de bordure pourrait se développer, mettant en avant leur intérêt pour la lutte intégrée ou la faune locale. Dans une telle perspective, il ne serait pas aberrant d'imaginer que se développe une activité de sélection sur ces espèces.

3. Conséquences pour la sélection et la filière semences

3.1. Diversification de la demande variétale

Les paragraphes précédents illustrent la grande diversité des demandes liées à l'agriculture durable. Les enjeux environnementaux sont très divers selon les localités et les réglementations environnementales sont souvent fondées sur des zonages agro-écologiques : les variétés devront être économes en azote dans certains milieux, économes en eau dans d'autres, résistantes aux maladies cryptogamiques ailleurs. Le choix des variétés et des espèces dans la rotation sera fondé tantôt sur un objectif prioritaire de prévention de l'érosion, tantôt sur celui de protection des ressources en eau. À cette diversité écologique se superpose la diversité des agricultures et la segmentation des filières. Le progrès génétique se mesurera de moins en moins par une amélioration moyenne des performances (du rendement, par exemple, comme on a pris l'habitude de le faire pour les grandes cultures) mais par une amélioration de l'adaptation des variétés disponibles à la diversité des demandes locales.

3.2. Conséquences pour la sélection

Bonneuil *et al.* (p. 29) montrent comment cette diversification des demandes contribue au développement de processus locaux d'innovation variétale : sélection participative, sélection par des petites entreprises locales, création de variétés industrielles réservées.

Quelles que soient les modalités de la sélection et les acteurs qui la réalisent, la définition des objectifs de sélection devient plus complexe. La réalisation d'une vraie prospective sur la manière dont la variété sera utilisée au sein des systèmes de culture devient en effet indispensable, car beaucoup d'impacts environnementaux sont très contingents de la manière dont la variété sera utilisée. Or, on manque aujourd'hui de méthodes permettant d'analyser, en prenant en compte les modifications induites des systèmes de culture, l'intérêt économique et environnemental de nouveaux objectifs de sélection. Pour mener à bien une telle prospective, une voie consiste à simuler sur ordinateur les nouveaux itinéraires techniques, adaptés à la nouvelle variété, et leurs conséquences sur la production et l'environnement. L'évolution rapide de la modélisation agronomique rend aujourd'hui cette ambition réaliste (Jeuffroy *et al.*, 2006 ; Edmeades *et al.*, 2001). Un travail de ce type, par exemple, a été réalisé sur pois, dans le but de déterminer les traits phénotypiques à associer au gène de sensibilité à la photopériode dans les variétés de type Hr : Vocanson (2006) montre que les variétés à floraison précoce, indéterminées et à petits grains obtiennent avec régularité les meilleurs résultats. Fargue *et al.* (2005) ont, de la même manière, analysé l'intérêt de l'utilisation des lignées cléistogames dans les programmes de sélection du colza, en vue de maîtriser les flux de gènes intraspécifiques, en s'appuyant sur l'utilisation du modèle de flux de gènes dans les paysages agricoles GeneSys (Colbach *et al.*, 2001). Un travail sur les méthodologies d'utilisation de modèles agronomiques en vue de définir

simultanément les objectifs de sélection et les modalités d'utilisation des futures variétés est nécessaire.

Cependant, beaucoup d'impacts environnementaux ne sont perceptibles que sur grande parcelle ou sur le long terme : comment sélectionner en les prenant en compte ? Là encore, un travail de fond est nécessaire pour relier ces impacts, différés ou difficilement accessibles à la mesure, à des critères non destructifs, utilisables précocement en sélection (Cuny *et al.*, 1998). Pour apprécier la résistance à différents stress de génotypes en cours de sélection ou leur capacité à rendre des services précis dans le cadre de nouveaux systèmes de culture, on peut imaginer que les sélectionneurs s'appuient davantage sur les outils du diagnostic écophysio-logique : méthodes d'appréciation du statut azoté des plantes (Lemaire et Meynard, 1997), mesure de l'abondance isotopique naturelle du carbone (Mehra *et al.*, 1999 ; Turner, 2001) ou de la teneur en glucosinolate de tel ou tel organe (Brown *et al.*, 1999). L'importance prise, dans les systèmes à bas intrants, par une sélection sur le système racinaire impose de se doter de nouveaux outils de mesure de la masse racinaire, basés sur des méthodes non destructives (van Beem *et al.*, 1998).

Une réflexion importante sur les milieux de sélection doit également être menée, en relation avec une estimation de la fréquence et de l'intensité des stress auxquels les variétés seront susceptibles d'être soumises en milieu agricole (Edmeades *et al.*, 2001) : la sélection de variétés tolérantes au stress azoté doit-elle se faire sans apport d'engrais azoté, ou avec un apport minimum, et à quel moment ? Quel précédent choisir pour l'expérimentation ? Plus généralement, si l'on s'oriente vers la sélection pour des systèmes à faible niveau d'intrants, l'extrapolation des résultats des essais sera plus délicate qu'aujourd'hui : en effet, un niveau d'intrants élevé permet d'extérioriser le potentiel photosynthétique de la variété. Quand on baisse les intrants, les facteurs limitants sont plus nombreux, et plus divers (stress azoté, stress hydrique, maladies, adventices...) d'une situation à l'autre en culture. Un diagnostic *a posteriori* des conditions de milieu sur la parcelle de l'essai constitue un moyen de savoir si les génotypes ont été soumis aux conditions de milieu auxquelles ils sont censés être adaptés (Brancourt-Hulmel *et al.*, 1999 ; Leflon *et al.*, 2005).

3.3. La connaissance des nouvelles variétés

Les dispositifs d'évaluation expérimentale de la valeur agronomique des nouvelles variétés sont aujourd'hui standardisés, à l'image des systèmes de culture. La seule diversité échantillonnée est celle du milieu (sols, climat). Si des créneaux spécifiques sont recherchés pour différentes familles de variétés, il faudra envisager d'expé-rimenter chacune, en pré- comme en post-inscription, avec des systèmes de culture adaptés. Pour aider les agriculteurs et leurs conseillers à choisir les variétés qui seront cultivées dans un contexte donné, il sera nécessaire de les caractériser sur de nouveaux critères, par exemple tolérance au stress azoté, au stress hydrique, capacité à absorber beaucoup d'azote, efficacité en biofumigation, aptitude au semis précoce ou au semis tardif... En tout état de cause, on ne pourra échapper à une réflexion de fond sur les procédures qui devront être mises en œuvre par le Comité technique permanent de la sélection (CTPS) pour étudier les variétés avant leur mise sur le marché : analyse du comportement en système à faible intrant ou en système biologique ; appréciation de l'impact environnemental probable de l'adoption de la variété, sous différentes hypothèses de milieu et système de culture ; nouvelle section pour de nouveaux types de plantes, à vocation essentiellement environnementale, etc.

3.4. La diffusion des variétés innovantes

Les organismes d'approvisionnement jouent un rôle essentiel dans la diffusion des nouvelles variétés. Par les conseils techniques qu'ils émettent, par des politiques de prix différenciés et par la contractualisation des productions avec les agriculteurs, ils favorisent certaines variétés et en excluent d'autres des assolements régionaux (Le Bail, 2000). Ainsi, en orge de brasserie, les contrats sont souvent passés, pour une zone géographique donnée, sur une seule variété afin de ne consacrer qu'un seul silo de stockage à ce débouché. Les variétés de blé multirésistantes aux maladies, dont l'intérêt en système à bas intrants a été évoqué plus haut, semblent rarement conseillées car ce sont les mêmes entreprises⁷ qui vendent aux agriculteurs semences et fongicides. Verra-t-on l'émergence de circuits de distribution parallèles, spécialisés dans les produits pour l'agriculture durable, comme il en existe pour l'agriculture biologique ? Nous pensons cependant que les organismes d'approvisionnement

⁷ Et, plus précisément, les mêmes technico-commerciaux qui savent qu'ils doivent leur salaire aux bénéfices liés aux ventes de phytosanitaires.

pourraient jouer un rôle important dans le développement d'une agriculture plus durable, pour peu qu'ils y trouvent leur compte (et cela pourrait être le cas si le marché permet de valoriser les certifications environnementales, ou si les pouvoirs publics réorientent leurs budgets incitatifs). Ils ont déjà montré leur efficacité pour une adaptation des conseils à la diversité des contraintes agronomiques ; ils pourraient diffuser des conseils adaptés à la diversité des enjeux environnementaux, et vendre les semences correspondantes. Ils savent déjà planifier la répartition spatiale des variétés, dans une région, en vue d'une ségrégation de filières (Le Bail et Meynard, 2001) ; ils pourraient gérer la diversité génétique aux niveaux spatial et temporel pour limiter les risques de contournement de résistance.

4. Conclusion

La sélection d'une variété prend beaucoup de temps. Il faut donc anticiper sur le contexte futur pour déterminer les critères de sélection et les créneaux potentiels de marché. Or les systèmes de culture de l'avenir dépendront fortement de réglementations, de mesures de politique agricole, d'incitations des pouvoirs publics, etc. Et s'il y a, en agriculture aujourd'hui, quelque chose qui n'est vraiment pas durable, ce sont les politiques agricoles et les réglementations, qui changent constamment ! En l'absence d'une lisibilité à long terme des politiques publiques, il est difficile aux acteurs de la sélection d'engager des programmes, et aux autres acteurs de modifier de manière radicale leur organisation et leurs pratiques. Il serait souhaitable de réfléchir à ce que pourrait être un contrat d'objectifs entre les semenciers, les pouvoirs publics, la profession agricole et la recherche. Ce contrat porterait sur la mise en place de stratégies coordonnées, ambitieuses et réfléchies sur le long terme, sans lesquelles l'agriculture peinera à devenir réellement durable ■

Références bibliographiques

- ANGUS J.F., GARDNER P.A., KIRKEGAARD J.A., DESMARCHELIER J.M., 1994. Biofumigation : isothiocyanates released from *Brassica* roots inhibit growth of the take-all fungus. *Plant and Soil*, 162, 107-112.
- AUBERTOT J.N., PINOCHET X., DORÉ T., 2004. The effects of sowing date and nitrogen availability during vegetative stages on *Leptosphaeria maculans* development on winter oilseed rape. *Crop Protection*, 23(7), 635-645.
- BARBOTTIN A., 2004. *Utilisation d'un modèle de culture pour évaluer le comportement des génotypes : pertinence de l'utilisation d'Azodyn pour analyser la variabilité du rendement et de la teneur en protéines du blé tendre*. Thèse de Doctorat, INA P-G, 178 p. + annexes.
- BAUDRY J., PAPY F., 2001. The role of landscape heterogeneity in the sustainability of cropping systems. In J. Nösberger, H.H. Geiger & P.C. Struik (eds) : *Crop science: Progress and Prospects*. CABI Pub., 243-259.
- BEEM J. VAN, SMITH M.E., ZOBEL R.W., 1998. Estimating root mass in corn using a portable capacitance meter. *Agronomy Journal*, 90(4), 566-570.
- BOUCHARD C., JEUFFROY M.H., 2000. Conséquences d'un déficit de nutrition azotée selon les variétés. *Perspectives agricoles*, 262, 70-74.
- BRANCOURT-HULMEL M., LECOMTE C., MEYNARD J.M., 1999. A diagnosis of yield-limiting factors on probe genotypes for characterizing environments in winter wheat trials. *Crop Science*, 39, 1798-1808.
- BROWN A.P., BROWN J., DAVIS J.B., 1999. *Developing high glucosinolate cultivars suitable for biofumigation from intergeneric hybrids*. 10th International Rapeseed Congress, Canberra, 26-29/09/1999, poster.
- COLBACH N., CLERMONT-DAUPHIN C., MEYNARD J.M., 2001. GeneSys : a model of the influence of cropping system on gene escape from herbicide tolerant rapeseed crops to rape volunteers. I. Temporal evolution of a population of rapeseed volunteers in a field. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 83, 235-253.
- COMMISSION MONDIALE SUR L'ENVIRONNEMENT ET LE DÉVELOPPEMENT, 1989. *Notre avenir à tous ; rapport Brundtland*. Éditions du fleuve, Montréal, 432 p.
- CUNY H., WERY J., GAUFRES F., 1998. A simple indicator for diagnosing nitrate leaching risk below the root zone using the Tensionic tensiometers. *Agronomie*, 18, 521-535.
- DAVID C., JEUFFROY M.H., HENNING J., MEYNARD J.M., 2005. Yield variation in organic winter wheat: a diagnostic study in the Southeast of France. *Agronomy for Sustainable Development*, 25, 213-223.
- DEBAEKE P., 1997. Le désherbage intégré en grande culture : bases du raisonnement et perspectives d'application. *Cahiers Agricultures*, 6, 185-194.
- DEBRAS J.F., COUSIN M., RIEUX R., 2001. Contre le psylle en vergers de poirier : principes de base pour la création de haies-réservoirs d'auxiliaires. *Phytoma*, 536, 26-31.
- DEJOUX J.F., 1999. *Évaluation d'itinéraires techniques du colza d'hiver en semis très précoces. Analyse économique, conséquences environnementales et économiques*. Thèse INA-PG, 244 p.
- DELABAYS N., ANÇAY A., MERMILLOD G., 1998. Recherche d'espèces végétales à propriétés allélopathiques. *Revue suisse de viticulture, arboriculture et horticulture*, 30(6) 383-387.

- DORÉ T., MEYNARD J.M., SEBILLOTTE M., 1998. The role of grain number, nitrogen nutrition and stem number in limiting pea crop (*Pisum sativum*) yields under agricultural conditions. *European Journal of Agronomy*, 8, 29-37.
- EDMEADES G.O., COOPER M., LAFITTE R., ZINSELMEIER C., RIBAUT J.M., HABBEN J.E., LÖFFLER C.N., BÄNZIGER M., 2001. Abiotic Stresses and Staple Crops. In J. Nösberger, H.H. Geiger, P.C. Struik (eds) : *Crop Science: Progress and Prospects*. CABI Pub., 137-154.
- FARGUE A., COLBACH N., ANGEVIN F., CHAMPOLIVIER J., RENARD M., MEYNARD J.M., 2001. GENESYS : *Modelling the influence of cropping systems and varieties on transgenic rapeseed volunteers' dispersal*. ESF workshop. Ceske Budejovice, 13-15/09/2001
- FLEURY A., DONADIEU P., 1997. De l'agriculture périurbaine à l'agriculture urbaine. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*, 31, 45-51.
- GHILOUFI M., SAULAS P., PICARD D., 2001. *Towards cropping systems with permanent ground cover and zero tillage in open fields cropping systems in France*. 1st World Congress on Conservation agriculture, Madrid, 21-25/10/2001
- IFEN, 1996-1997. *Indicateurs de performance environnementale de la France*. Tec & Doc Lavoisier, Paris, 15 p.
- IFEN, 2001. Les pesticides dans les eaux. Bilan des données 1998 et 1999 réalisé en 2000. *Études et travaux*, n° 34, 1 p.
- INRA, 1986. Les rotations céréalières intensives. Dix années d'études concertées INRA-ONIC-ITCF, 1973-1983. INRA Éditions, Paris, 481 p.
- JEUFFROY M.H., BARBOTTIN A., JONES J.W., LECOEUR J., 2006. Crop models with genotype parameters. In D. Wallach, D.Makowski and J.W. Jones (eds) : *Working with crops models*. Elsevier, 281-307.
- LAFOSSE E., BIARNES A., WÉRY J., 2001. *Enquêtes sur les pratiques d'enherbement du vignoble. : résultats et perspectives*. INRA-ENSAM, Montpellier, 8 p.
- LE BAIL M., 2000. Qualité des produits végétaux et territoire : contribution de l'agronomie. *OCL*, 7, 499-503.
- LE BAIL M., MEYNARD J.M., 2001. Isolement des collectes et maîtrise des disséminations au champ. Projet "Pertinence et faisabilité d'une filière non-OGM en maïs et soja". Rapport du Programme n° 3, 57 p.
- LEFLON M., LECOMTE C., BARBOTTIN A., JEUFFROY M.H., 2005. Characterization of environments and genotypes for analyzing genotype x environment interaction. Some recent advances in winter wheat and prospects for QTL detection. *Journal of Crop Improvement*, 14(1-2), 249-298.
- LE GOUIS J., PLUCHARD P., 1996. Genetic variation for nitrogen use efficiency in winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Euphytica*, 92, 221-224
- LE GOUIS J., BÉGHIN D., HEUMEZ E., PLUCHARD P., 2000a. Genetic differences for nitrogen uptake and nitrogen utilisation efficiencies in winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 12, 163-173.
- LE GOUIS J., JEUFFROY M.H., HEUMEZ E., PLUCHARD P., 2000b. Différences variétales pour le fonctionnement du blé tendre en conditions de nutrition azotée suboptimales. In P. Maillard, R. Bonhomme (éds) : *Fonctionnement des peuplements végétaux sous contraintes environnementales*. INRA Éditions (Les Colloques), Paris, n° 93, 531-538.
- LEMAIRE G., MEYNARD J.M., 1997. Use of the nitrogen nutrition index for the analysis of agronomical data. In G. Lemaire (éd.) : *Diagnosis of nitrogen status in crops*. Springer Verlag, 45-55.
- LONNET P., 1997. Les résistances variétales chez le blé. *Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 83, 37-50.
- LOYCE C., ROLLAND B., BERNICOT M.H., BOUCHARD C., DOUSSINAULT G., HASLE H., MEYNARD J.M., 2001. Les variétés de blé tolérantes aux maladies : une innovation majeure à valoriser par des itinéraires techniques économes. *Perspectives agricoles*, 268, 50-56.
- LUDLOW M.M., MUCHOW R.C., 1990. A critical evaluation of traits improving crop yield in water-limited environments. *Advances in Agronomy*, 43, 107-153.
- MARTIN P., MEYNARD J.M., 1997. Systèmes de culture, érosion et pollution des eaux par l'ion nitrate. In C.Riou : *L'eau dans les agrosystèmes*. INRA, Paris, 303-322.
- MEHRA O., MONNEVEUX P., NACHIT M., DELÉENS E., 1999. La composition isotopique du carbone, critère intégrateur du fonctionnement photosynthétique : application à l'amélioration génétique du blé dur en conditions méditerranéennes. *Cahiers agricoles*, 8, 37-47
- MESSÉAN A., ANGEVIN F., GOMEZ-BARBERO M., MENRAD K., RODRIGUEZ-CEREZO E., 2006. *New case studies on the coexistence of GM and non-GM crops in European agriculture*. Technical Report Series, European Commission, ESTO, IPTS, EUR 22102 EN, 112 p.
- MEYNARD J.M., DEBAEKE P., DEJOUX J.F., SAULAS P., 1997. Quelle sélection variétale pour une agriculture durable ? *OCL*, 6, 426-430.
- MEYNARD J.M., DUPRAZ P., DRON D., 2003. Grande culture. *Les Dossiers de l'environnement de l'INRA*, 23, 69-91.
- MEYNARD J.M., GIRARDIN P., 1991. Produire autrement. *Le Courrier de l'Environnement de l'INRA*, 15, 1-19.
- MONNEVEUX P., THIS D., BELHASSEN E., 1997. Amélioration génétique de la résistance à la sécheresse. In C. Riou, R. Bonhomme, P. Chassin, A. Neveu, F. Papy (éds) : *L'eau et l'espace rural. Production végétale et qualité de l'eau*, INRA Éditions, Paris, 122-142.
- MUNIER-JOLAIN N.G., CARROUÉE B., 2002. Quelle place pour le pois dans une agriculture respectueuse de l'environnement ? Argumentaire agri-environnemental. *Cahiers Agricoles*, 12(2), 111-120.
- NELSON R., 2001. Biotic stress in crops. In J. Nösberger, H.H. Geiger, P.C. Struik (eds) : *Crop Science: Progress and Prospects*. CABI Pub., 155-173.

- PUJOL J.L., DRON D., 1998. *Agriculture, monde rural et environnement : qualité oblige. Rapport de la Cellule Prospective et Stratégie du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement*. La Documentation Française, Paris, 589 p.
- RIBA G., SILVY C., 1989. Combattre les ravageurs des cultures : enjeux et perspectives. INRA Éditions, Paris, 230 p.
- ROLLAND B., BOUCHARD C., LOYCE C., MEYNARD J.M., GUYOMARD H., LONNET P., DOUSSINAULT G., 2003. Des itinéraires techniques à bas niveau d'intrants pour des variétés rustiques de blé tendre : une alternative pour concilier économie et environnement. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*, 49, 47-62 ; *Les Dossiers de l'environnement de l'INRA*, 24, 63-78.
- ROUW A. (DE), WINKEL T. 1998. Drought avoidance by asynchronous flowering in pearl millet stands cultivated on-farm and on-station in Niger. *Experimental Agriculture*, 34(1), 19-39.
- SAULAS P., MEYNARD J.M., 1998. Production intégrée et extensification sont-elles compatibles ? *Les Dossiers de l'Environnement de l'INRA*, 16, 9-15.
- SEBILLOTTE M., BOIFFIN J., CANEILL J., MEYNARD J.M., 1978. Sécheresse et fertilisation azotée du blé d'hiver. Essai d'analyse de situations au champ par l'étude des composantes du rendement. *Science du Sol*, 3, 197-214.
- SÉGUY L., BOUZINAC S., TRENTINI A., CÔRTEZ N.A., 1996. L'agriculture brésilienne des fronts pionniers. III. Le semis direct, un mode de gestion agrobiologique des sols. *Agriculture et Développement*, 12, 38-58.
- TARDIEU F., 1996. Drought perception by plants. Do cells of droughted plants experience water stress ? *Plant Growth Regulation*, 20, 93-104.
- TOURDONNET S. DE, CAROF M., SAULAS P., 2003. *A contribution to the development of cropping systems with permanent cover crop in open fields in France*. 2. Congresso Mundial sobre Agricultura Conservacionista, Iguassu Falls (BRA), 2003/08/11-15, 262-265.
- TURNER N.C., 2001. Optimizing Water use. In J. Nösberger, H.H. Geiger and P.C. Struik (eds) : *Crop Science: Progress and Prospects*. CABI Pub., 119-135.
- VALLAVIEILLE-POPE C., GOYEAU H., LANNOU C., MILLE B., 1991. Pour lutter contre les maladies foliaires : la culture de variétés de céréales en mélange. *Phytoma*, 424, 28-36
- VAN SANFORD D.A., MACKOWN C.T., 1986. Variation in nitrogen use efficiency among soft red winter wheat genotypes. *Theoretical and Applied Genetics*, 72, 158-163.
- VOCANSON A., 2006. *Évaluation ex ante d'innovations variétales en pois d'hiver (Pisum sativum L.) : approche par modélisation au niveau de la parcelle et de l'exploitation agricole*. Thèse de Doctorat, INA P-G, Paris, 250 p. + annexes.