

Cultiver la biodiversité

François Papy
Académie d'Agriculture

Isabelle Goldringer
UMR de génétique végétale, INRA Le Moulon

papy.francois@numericable.fr ; isa@moulon.inra.fr

Le texte suivant est une reprise d'une communication faite à l'Académie d'agriculture de France le 13 octobre 2010 à l'occasion d'une séance consacrée à la biodiversité. Il est possible de lire un résumé des différentes communications et des discussions de cette séance dans les *Comptes-rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, vol. 16, 4, 29-39 ou en se reportant au site : <http://www.academie-agriculture.fr/>

Depuis le Néolithique, l'homme transforme un certain nombre d'espèces végétales en même temps que les milieux dans lesquels il les cultive. Cette co-évolution des espèces et des milieux de culture a connu des ruptures que les historiens dénomment révolutions agricoles. Le courant de recherche international dit « d'intensification écologique » qui, depuis plus de 10 ans, se fonde sur un usage intensif des processus écologiques (CIRAD, 2011 ; Griffon, 2010¹) marque une de ces ruptures que nous allons présenter, mettant en commun les réflexions d'une généticienne et d'un agronome. Cette rupture consiste à réintroduire en agriculture une diversité écologique dans les paysages agricoles en même temps que des diversités inter- et intra-spécifiques des plantes cultivées. C'est ce que nous désignons sous le terme de culture de la biodiversité.

Cette biodiversité cultivée permet de bien valoriser les ressources abiotiques (énergie lumineuse, matière minérale, eau, température, etc.) et de gérer, dans l'espace et le temps, les interactions entre les plantes cultivées, leurs bio-agresseurs et les ennemis naturels de ces derniers. Voilà l'idée maîtresse que nous développerons, argumentant cette proposition d'abord par un survol des deux dernières révolutions agricoles des temps modernes survenues en Europe du Nord, qui nous révèle qu'une première intensification écologique a été supplantée par des agricultures faisant un usage intensif d'intrants externes dont on mesure maintenant les limites. Suit un exposé de pistes de recherche sur la nouvelle intensification écologique qui émerge.

1. De nombreux Anglo-Saxons donnent un sens tout à fait voisin au concept de « *sustainable intensification* ».

Les dernières ruptures dans la co-évolution de la sélection des plantes et des procédés de culture

Ces ruptures ont été décrites par Mazoyer et Roudart (1997) et Ferault et Le Chate-lier (2009).

• La première intensification écologique

Les systèmes de culture à jachère

Dans le Nord de l'Europe dominant, au Moyen Age, des systèmes de culture à base de céréales. Entre les cycles de culture s'intercalent de longues périodes sans couvert cultivé, plus ou moins longues selon qu'aux moissons succèdent, un peu plus d'un an après, les semailles de céréales d'hiver ou, un peu plus de six mois après, celles des céréales de printemps. La fonction première de ces périodes dites de jachère est la maîtrise des adventices que l'on obtient par une succession de façons culturales. Sans doute cette jachère joue-t-elle aussi un rôle, difficile à vérifier, de rupture des cycles de pathogènes dans les successions céréalières. Selon que la longue jachère revient tous les deux ou trois ans on a des rotations biennales ou triennales.

L'exportation de matière par les récoltes est compensée par le transfert de matière que permettent les animaux d'élevage à partir des espaces où ils s'alimentent : le saltus, espace herbacé non cultivé, et les sous-bois. La stabulation améliore la qualité du transfert. Fondé sur l'exploitation directe de la fertilité naturelle de l'ager et, par transfert, sur celle du saltus, ce système minier épuise les ressources naturelles.

Au XIV^e siècle la production agricole régresse. Le rendement des cultures baisse ; le taux de matière organique du sol également. Pour compenser cette dégradation et nourrir une population qui croît, les hommes étendent l'ager. C'est au détriment des forêts et du saltus, sources de fertilité. L'ensemble du système n'est donc pas durable.

Au demeurant les ressources naturelles sont très mal utilisées puisque, pendant les longues périodes de jachères, le système de culture n'utilise par la photosynthèse pour fabriquer de la biomasse et que les façons culturales répétées favorisent la minéralisation de la matière organique du sol et la perte d'azote par lessivage. En valorisant mieux les capacités productives des écosystèmes (énergie lumineuse, fixation de l'azote, résistance aux bio-agresseurs des plantes cultivées, etc.), les systèmes de culture continue, fondés sur l'usage d'une grande variété d'espèces cultivées, qui vont succéder aux systèmes à jachère, constitueront une véritable intensification écologique au sens moderne que l'on donne à ce terme d'utilisation intense des fonctionnalités naturelles des écosystèmes.

Les systèmes de culture continue et la polyculture-élevage

Débutant par les Flandres, du XVI^e au XIX^e siècle, cette révolution va s'étendre progressivement à toute l'Europe. Au début, la jachère d'un an est remplacée par une légumineuse fourragère (trèfle violet, vesce, sainfoin, etc.) ou une graminée (raygrass), parfois le mélange des deux et la jachère courte de huit mois par des navets en culture dite dérochée. Plus tard, des prairies temporaires de plusieurs années, à base de luzerne ou de trèfle blanc et de graminées fourragères, s'inscrivent entre des cycles de culture d'espèces annuelles. La liste des espèces cultivées s'allonge : choux et maïs dans les régions méridionales, pomme de terre, betterave, lin et chanvre ailleurs. Les animaux trouvent ainsi sur l'ager une alimentation autre que les quelques fourrages résiduels qu'ils y glanaient précédemment. Les prairies permanentes (le saltus) sont cantonnées dans les terres difficiles à labourer, de par leur nature ou l'éloignement de l'habitat.

Ainsi se met en place un système de polyculture-élevage dans lequel la culture d'une grande diversité d'espèces permet de mieux valoriser les ressources naturelles. L'utilisation continue de l'énergie lumineuse par la photosynthèse produit plus de biomasse qui retourne partiellement au sol et accroît sa teneur en humus. La maîtrise des adventices qui justifiait naguère la jachère est assurée par la culture d'une succession d'espèces variées : espèces semées à grands

écartements permettant d'éliminer les adventices par sarclage, d'autres, semées dense, permettant de les concurrencer pour la lumière. La culture de légumineuses, annuelles ou pérennes, assure la fixation de l'azote de l'air qui profite à l'ensemble du système de polyculture-élevage. C'est l'azote fixé par les surfaces fourragères que l'on retrouve dans le fumier. La succession d'espèces différentes régule les populations de bio-agresseurs.

De génération en génération les plantes sont sélectionnées par les agriculteurs qui choisissent de reproduire des mélanges de celles qui sont les plus adaptées aux usages qu'ils en font et aux milieux de culture. Des échanges entre régions assurent un renouvellement de la diversité intra-spécifique qui, sans cela, s'amenuiserait. La sélection des plantes est diversifiante.

Afin de produire toujours davantage pour une population qui ne cesse de croître, ce système rencontre cependant des limites. Les déficiences minérales des milieux de culture, comme celle en phosphore, ou encore l'acidité du sol ne peuvent être corrigées par un recyclage local des matières organiques. Dès le XVIII^e siècle se pratiquent en France du marnage et des épandages de phosphates moulus du Quercy. Quant à la quantité d'azote, élément primordial de la production de biomasse, elle est limitée par la capacité de fixation des microorganismes du sol.

● *La révolution technique du XX^e siècle*

Des systèmes de culture à usage intensif d'intrants

Au cours des XIX^e et XX^e siècles, le passage de la polyculture-élevage à des systèmes spécialisés à usage intensif d'intrants va se faire par étapes (Papy, 2008). Grâce à la théorie minérale qui émerge dans la deuxième moitié du XIX^e siècle et au développement des transports, les carences physico-chimiques des milieux de culture sont corrigées. Se généralisent alors les amendements calciques pour corriger l'acidité des sols, les marnages et le redressement des teneurs des sols en phosphore. Ces correctifs faits, l'augmentation des rendements se trouve limitée par le manque d'azote. L'emploi d'engrais azotés pallie alors l'insuffisance des quantités d'azote fixées, à partir de l'air, par les micro-organismes, même avec la culture de légumineuses. Mais le nitrate du Chili (minéral) et le guano (organique) sont des engrais fossiles qui s'épuisent vite.

L'augmentation de production de biomasse des écosystèmes cultivés se serait sans doute arrêtée là, si une découverte n'était pas survenue au début du XX^e siècle : la synthèse de l'ammoniac à partir de l'azote de l'air. Elle va

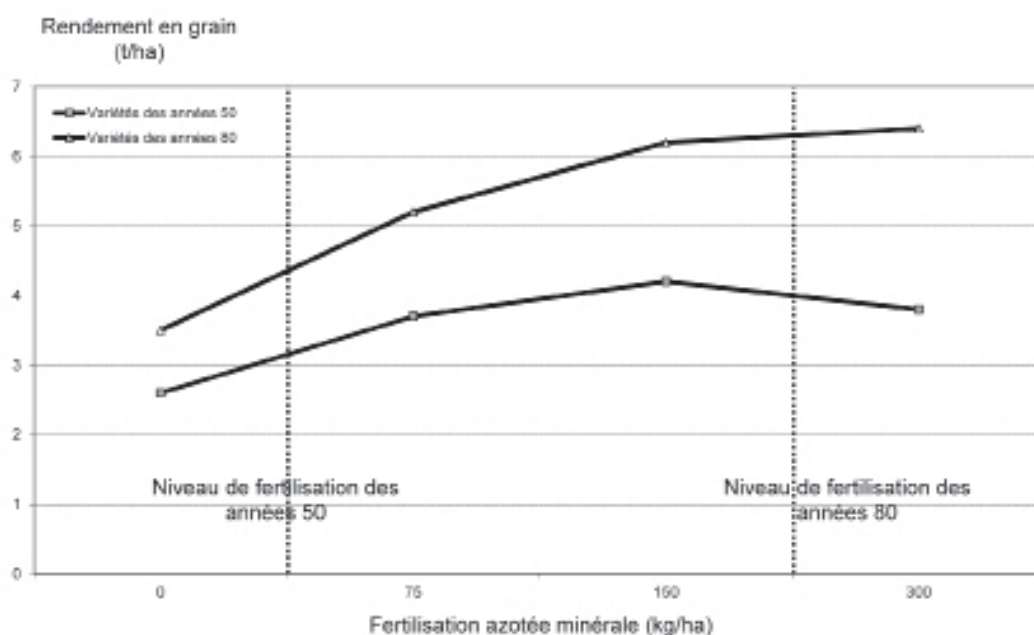


Fig. 1. L'interaction cultivar x pratique agronomique. À partir des années 1980 les gènes de nanisme introduits dans les variétés de blé leur donnent un meilleur rapport grain/paille, une moindre sensibilité à la verse et donc, à dose égale d'azote, une meilleure production de grains à l'hectare. D'après Evans et Fischer, 1999.

servir à la production d'engrais azotés et permettre le forçage de la production de biomasse dans les écosystèmes cultivés, tout en modifiant les échanges gazeux entre biosphère et atmosphère. Dans la deuxième moitié du XX^e siècle, l'usage croissant de la fertilisation azotée, une modification radicale dans l'organisation de la sélection végétale, la motorisation, ainsi que le développement des pesticides, la poursuite de l'aménagement des terrains (irrigation, drainage) et l'accroissement des moyens de transport vont radicalement modifier les systèmes de production agricole. Ces différentes techniques d'aménagement des terrains, de culture et d'amélioration des plantes, s'adaptant de façon évolutive les unes aux autres, aboutissent à des systèmes productifs très cohérents. L'alimentation azotée abondante des plantes cultivées les fragilise. Les céréales à paille deviennent plus sensibles à la verse ; la découverte, au Japon, de gènes de nanisme dans une variété de blé, Norin 10, permet, grâce à des croisements avec du matériel américain puis avec les géniteurs du Centre international pour l'amélioration du maïs et du blé (CIMMYT) par Norman Borlaug, de sélectionner des variétés à paille courte. Elles assurent ainsi une bonne valorisation de plus forts apports d'azote (fig.1 ; Evans et Fischer, 1999). Face à ces variétés de courte taille, la concurrence des adventices devient plus forte ; les herbicides règlent le problème. Les modes de

culture intensive rendent les plantes cultivées plus sensibles à différents bio-agresseurs ; les pesticides y remédient et dispensent les sélectionneurs de faire des efforts pour obtenir des variétés résistantes, afin de se consacrer à l'amélioration des performances marchandes en quantité et qualité technologique. La motorisation permet d'intervenir au bon moment sur de grandes surfaces, garantissant ainsi l'efficacité des différents intrants.

Le recours important aux intrants permet de se dispenser de cultiver une diversité inter-et intra-spécifique. La culture se sépare de l'élevage et des productions fourragères, les apports de fumier aux terres de culture n'étant plus nécessaires. L'emploi des pesticides permet de raccourcir les rotations et d'aller, dans certains cas, jusqu'à la monoculture. C'est ainsi qu'en un lieu donné diminue le nombre d'espèces cultivées. De plus, au sein de chaque espèce, la sélection restreint la base génétique des variétés. Les populations d'espèces cultivées sont devenues de plus en plus homogènes (lignée pure, hybride F1 ou clone, selon le mode de reproduction) pour être de plus en plus performantes dans des itinéraires techniques de plus en plus standardisés et adaptés au matériel végétal (Gallais, 2005 ; Bonneuil *et al.*, 2006). Enfin, la mécanisation pousse à accroître la taille des parcelles, par conséquent à supprimer des haies, des talus, des bordures de champs

et, ainsi, à ségréguer les espaces cultivés des lieux de préservation de la biodiversité sauvage (Theinail *et al.*, 2009 ; Papy et Ambroise, à paraître). Homogénéisation des paysages, des variétés et des procédés de culture vont de pair.

En termes de bilan, ces systèmes de culture (tout comme les systèmes d'élevage) constituent une incontestable réussite au plan de l'accroissement de la production qui, ainsi, a largement dépassé la demande alimentaire d'une population en croissance. Ajoutons qu'en intensifiant son agriculture le territoire français a vu sa surface forestière augmenter de 35 % au cours de la deuxième moitié du XX^e siècle, alors que, pour obtenir la même production avec les rendements du début de cette période, c'est le quart de la forêt qui aurait dû disparaître. C'est à mettre au crédit de cette intensification des terres de culture quand on sait le rôle que joue la forêt dans la régulation des gaz à effet de serre.

Les ambiguïtés d'un progrès

On connaît maintenant suffisamment les limites de cette révolution technique ; il n'est pas utile de les développer ici. Au niveau local, la qualité de l'eau, des sols, a souvent été dégradée, la biodiversité sauvage très affectée ; au niveau global on a pris conscience que le bilan des gaz à effet de serre de l'agriculture intensive est mauvais, en raison des consommations directes d'énergie fossiles et de la fertilisation azotée ; en plus de la consommation d'énergie qu'elle implique dans le processus de fabrication, cette dernière favorise l'émission dans l'atmosphère du protoxyde d'azote (N₂O), très puissant gaz à effet de serre. Dès les années 1970, la fixation de l'azote atmosphérique par l'activité humaine, consacrée principalement à produire des engrais, a dépassé les capacités des écosystèmes à réduire les formes oxydées des composés azotés jusqu'à pouvoir réémettre dans l'atmosphère la même quantité d'azote sous la forme ultime N₂ (Galloway et Cowling, 2002).

Mais, outre que ce progrès technique s'est accompagné de dégâts sur ce qui fait notre environnement, sans doute ne dit-on pas assez la régression que constituent ces procédés de culture et de sélection des plantes par rapport au progrès de la première révolution agricole décrite plus haut. Des capacités de production et de résilience des écosystèmes cultivés ont été perdues. En effet, les périodes d'inter-culture où les sols sont laissés nus sous-utilisent la capacité photosynthétique des couverts végétaux alors que le sol manque souvent de matière organique ; une forte fertilisation minérale réduit les symbioses bactériennes ou mycorhiziennes et, par conséquent,

les capacités naturelles de fixation de l'azote et de biodisponibilité des éléments minéraux ; si la capacité des plantes à capter l'énergie lumineuse a été prise en compte dans la sélection végétale, celle du système racinaire à capter les éléments minéraux et l'eau du sol a souvent été négligée ; dans les céréales à paille la sélection sur le nanisme a été accompagnée d'une réduction du système racinaire (Waines et Ehdiaie, 2007). Les insecticides ont très souvent des effets néfastes directs sur les auxiliaires, notamment les pollinisateurs, ou encore sur les vers de terre et les arthropodes du sol ; les fongicides sont plus toxiques encore ; les herbicides réduisent le nombre d'espèces adventices et indirectement des populations utiles de la méso-faune du sol (Collectif, 2009). L'usage continu de ces produits, ainsi que la réduction de la biodiversité inter- et intra-spécifique (tendance à la monoculture, variétés fixées) entraînent sur les populations de bio-agresseurs des pressions de sélection qui produisent l'apparition de populations résistantes aux pesticides et virulentes pour les plantes cultivées (Deguine *et al.*, 2008). La disparition de nombreuses structures paysagères comme les bordures de champs, les talus, haies, fossés, ont fait disparaître des habitats pour les auxiliaires des espèces cultivées.

Bref, pour faire face aux défis de demain, il faut maintenant progresser dans une synthèse des deux dernières révolutions agricoles. Diminuer les intrants et utiliser les capacités de production et de résilience des écosystèmes cultivés par la réintroduction de la diversité inter- et intra-spécifique des plantes cultivées, voilà les voies qu'il faut, désormais, prospecter.

Les recherches en cours...

... pour augmenter la biodiversité inter-spécifique, cultivée et sauvage

La diversification inter-spécifique consiste à organiser dans le temps et l'espace la culture de plusieurs espèces sélectionnées pour diverses fonctions de production ou de service et l'entretien d'espèces sauvages pour les services qu'elles jouent dans l'écosystème cultivé local.

Cultiver une diversité d'espèces

Sans doute ne fait-on que réactiver le rôle des rotations longues sur la maîtrise du parasitisme tellurique et des adventices, celui des assolements diversifiés sur les maladies ou ravageurs à dispersion aérienne et des légumineuses sur la fixation de l'azote de l'air, *etc.* Cependant les mécanismes en jeu sont de mieux en mieux connus parmi lesquels les interactions biochimiques d'al-

l'élopathie² semblent avoir un rôle important dans les relations entre espèces voisines dans l'espace (par exemple entre la plante cultivée et les adventices) ou dans le temps (effet d'un précédent culturel sur l'espèce qui suit). Si de nombreux effets d'allélopathie sont établis en conditions contrôlées, démontrer leur réalité en conditions agricoles est une affaire délicate (Doré *et al.*, 2004). Les connaissances sur ces mécanismes au champ progressent cependant. La gestion des rotations en est un bon exemple ; le rôle de différentes crucifères comme précédents culturaux sur la réduction de maladies comme la pourriture molle du pois ou le piétin échaudage des céréales par les composés chimiques qu'elle libère a été bien étudié (Reau *et al.*, 2005). Cette fonction de régulation des populations de bio-agresseurs peut être également confiée à des espèces mises en culture intercalée entre deux cultures d'espèces de rapport.

Dans la diversification des espèces cultivées, une attention particulière doit être accordée aux légumineuses qui, par symbiose avec le rhizobium, permettent d'économiser l'énergie de fabrication des engrais azotés, de réduire les pertes gazeuses et d'enrichir le sol en azote. Elles peuvent apporter jusqu'à 200-300 kg d'azote par hectare dans le cas des fourragères ou du soja (Brunel, 2005), à condition que les conditions de fonctionnement de la symbiose soient satisfaites, ce qui n'est pas le cas en sols battants et tassés. L'enrichissement azoté sert aux autres espèces mises en rotation.

La couverture continue du sol (très développée dans certaines agricultures tropicales) est obtenue par des plantes qui n'ont pas une fonction de rapport mais de service dans la prévention de l'érosion, la pénétration des eaux de pluie, le piégeage des nitrates, la séquestration du carbone et, par suite, l'augmentation de matière organique et de vie microbienne dans le sol. Elle est souvent pratiquée en inter-rang des vignes et vergers ; il peut être utile dans ce cas de contrôler mécaniquement ou chimiquement l'enherbement pour éviter, en été, la compétition pour l'eau (Dupraz, 2005). En grande culture des pays tempérés, la couverture continue du sol est pour l'instant peu pratiquée.

Cette diversification des espèces cultivées implique des efforts de sélection sur des plantes qui ont été jusqu'alors délaissées, non seulement sur des espèces de rapport mais aussi des espèces de service. C'est dire le défi qui est lancé à

l'amélioration des plantes qui, comme le disent Meynard et Jeuffroy (2006) va se mesurer par l'adaptation des variétés disponibles à la diversité des demandes locales.

Entretien une biodiversité sauvage

L'entretien d'une biodiversité sauvage est aussi partie intégrante des principes de l'intensification écologique (Baudry et Papy, 2001 ; Dupraz 2005 ; Deguine *et al.*, 2008 ; Thenail *et al.*, 2009). L'aménagement de structures paysagères faites de haies composites, de bandes enherbées et fleuries, plus ou moins larges, ou de simples bordures de champ maintenues en végétation est conçu, selon les cas, pour servir d'habitat à des auxiliaires indigènes, d'obstacle au ruissellement ou au transfert de pollen indésirable, de zone tampon... L'exemple des bandes fleuries qui attirent les syrphes adultes dont les larves consomment les pucerons des céréales illustre bien l'intérêt de gérer les habitats de sorte à favoriser les ennemis des bio-agresseurs des espèces cultivées et défavoriser ces derniers.

La biodiversité inter-spécifique a donc des avantages agronomiques reconnus. Les freins à sa généralisation viennent de la nécessité, pour la mettre en œuvre, de reconsidérer profondément les filières tant à l'amont qu'à l'aval des exploitations agricoles, et de concevoir des dispositifs de coordination entre exploitations au sein des terroirs agricoles. Mais qu'en est-il de la diversité intra-spécifique ?

... pour augmenter la biodiversité intra-spécifique

Avant d'aborder la question de savoir quel intérêt peut avoir l'accroissement de diversité intra-spécifique, il faut d'abord noter que les nouveaux procédés de culture impliquent de nouveaux idéotypes de variétés. La question a déjà été bien traitée dans une séance de l'Académie d'Agriculture en juin 2005³ et dans Meynard et Jeuffroy (2006). On peut résumer comme suit les caractéristiques à rechercher : une meilleure résistance aux stress azoté et hydrique généralement obtenue par un meilleur développement en profondeur du système racinaire, alors que, nous l'avons vu, le raccourcissement des pailles de céréales l'a réduite ; une bonne compétitivité vis-à-vis des adventices, tout comme, bien sûr, des résistances aux multiples maladies et prédateurs. Mais les populations pathogènes contournent les résistances plus vite encore qu'on ne peut mettre au point de nouvelles variétés (Gallais, 2005). C'est là l'un des problèmes majeurs de l'amélioration

2. L'allélopathie désigne l'effet d'une plante sur une autre par la production de composés chimiques libérés dans l'environnement.

3. Communication de M.H. Jeuffroy à la séance du 1^{er} juin 2005.



Diversité des blés. © Unité de génétique végétale, INRA Le Moulon.

ration des plantes cultivées qui en fait une activité qui ne peut avoir de cesse. C'est ainsi, par exemple, que l'usage du coton transgénique Bt contre les noctuelles aboutit, à cause de ce phénomène de contournement, à une course à la recherche de nouvelles entomotoxines contre les individus résistants ! (Deguine *et al.*, 2008).

Mais il existe plusieurs autres pistes de recherche jouant sur la diversité intra-spécifique.

La diversification des variétés dans l'espace et le temps

On trouve un bon exemple de ce mode de prévention des résistances dans l'obligation faite par l'agence américaine de protection de l'environnement aux producteurs de coton Bt de maintenir des zones refuges indemnes de coton possédant le transgène Bt. Cette mesure d'intérêt public vise à diluer, par brassage génétique, d'éventuels gènes de résistance entre populations soumises à la pression de sélection (Deguine *et al.*, 2008). Elle est malheureusement contrecarrée par les intérêts à court terme des producteurs et les stratégies des semenciers⁴. Un autre exemple est donné par la mise en place par le CETIOM en 2003, après un travail de caractérisation génétique des résistances du colza au phoma, d'un outil d'aide au choix de variétés. Il comporte des recommandations pour éviter certains voisinages (ou certaines successions) de types de résistance (Aubertot *et al.*, 2006).

Le mélange de variétés au sein d'une même parcelle

Le principe consiste à associer dans une même parcelle des variétés différentes par leurs gènes de résistance, mais homogènes pour les caractères qui déterminent le cycle cultural et la facilité de récolte. Les principaux facteurs de réduction de la sévérité des épidémies dans les associations variétales sont la faible densité de plantes sensibles, les effets de barrière des plantes résistantes et la résistance induite (Vallavielle-Pope, 2006 ; Finckh, 2008). Les associations d'espèces aux capacités différentes de résistance aux maladies et d'adaptation aux contraintes abiotiques procurent une meilleure stabilité des rendements que les cultures pures avec une qualité de produit qui peut être équivalente ou même

4. On comprend bien toutes les ambiguïtés de la transgénèse pour réguler les résistances aux maladies. D'un côté, les agences administratives établissent des réglementations pour circonscrire la généralisation d'un type donné de résistance et de l'autre, pour valoriser leurs brevets, les entreprises semencières développent sur plusieurs espèces les mêmes gènes de résistance. C'est le contraire d'une diversification intra-spécifique ; cette pratique favorise le contournement des résistances par les bioagresseurs.

supérieure. Mille *et al.* (2006) l'ont bien montré sur blé. À condition de renouveler les semences, l'association de variétés est une solution qui mérite d'être développée.

La maîtrise d'une certaine hétérogénéité intra-variétale

Une dernière voie est également explorée. Puisque l'homogénéisation des variétés était justifiée par la standardisation des itinéraires techniques, on peut se demander si, ces derniers l'étant moins dans une optique d'adaptation des procédés de culture aux capacités des écosystèmes locaux, il ne serait pas judicieux d'utiliser la capacité évolutive des populations d'espèces cultivées (Bonneuil *et al.*, 2006). Ne permettrait-elle pas de s'adapter à l'évolution des caractéristiques biotiques et abiotiques d'un milieu ou encore aux différents milieux de culture ? Un réseau d'essais de populations composites de céréales a permis de montrer la rapide différenciation des populations en fonction des lieux de culture par une adaptation tant aux populations pathogènes qu'aux caractéristiques des milieux, notamment le climat (Paillard *et al.*, 2000 a et b ; Goldringer *et al.*, 2006 ; Rhoné *et al.*, 2008 et 2010 ; Döring *et al.*, 2010 ; Wolfe *et al.*, 2008). Elle justifie de se pencher sur des dispositifs éclatés de sélection de variétés populations à condition que soient bien maîtrisés l'évolution des caractères d'intérêt dans le sens désiré ainsi que les échanges de semences entre régions pour maintenir la diversité intra-variétale (Dawson *et al.*, 2010).

Conclusion

Les différentes pistes, pour l'instant juste ouvertes, qui consistent à inscrire (à réinscrire, pour dire vrai) les procédés de culture et d'amélioration des plantes dans le fonctionnement des écosystèmes, demandent de nouvelles relations entre agriculteurs, agriculteurs et industriels, agriculteurs et semenciers, agriculteurs et tout autre acteur des territoires ; relations de coordination et de coopération pour valoriser les capacités fonctionnelles des écosystèmes. Voilà tout ce qui fait obstacle à la mise en œuvre de cette intensification écologique (Meynard, 2010). Les agronomes vont devoir s'impliquer dans la conception de modalités de transition. Autre relation entre les hommes, autre relation des hommes aux ressources naturelles que celle qui s'emploie à les exploiter, puis à constater et déplorer qu'elles soient finies. Autre économie pour tout dire ! ■

Références bibliographiques

- AUBERTOT J.N., BRUN H., LEMARIÉ S., MÉSSÉAN A., PINOCHET X., RENARD M., ROUXEL T., 2006. Un exemple de recherche pluridisciplinaire au service d'une innovation : le cas de la gestion durable des résistances du colza au Phoma. In : J. Caneill (Ed.). *Agronomes et innovations*. III^e édition des Entretiens du Pradel. Paris, l'Harmattan, 356 p.
- BAUDRY J., PAPY F., 2001. The role of landscape heterogeneity in the sustainability of cropping systems. In : Nösberger J., Geiger H.H., Struik P.C. (Eds.), *Crop Science. Progress and Prospect*, Cabi Publishing, Oxon, 243-259.
- BONNEUIL C., DEMEULENAERE E., THOMAS F., JOLY P.B., ALLAIRE G., GOLDRINGER I., 2006. Innover autrement ? La recherche face à l'avènement d'un nouveau régime de production et de régulation des savoirs en génétique végétale. *Les dossiers de l'environnement de l'Inra*, n°30, 29-51.
- BRUNEL B., 2005. La microbiologie des sols, un champ prometteur pour l'agro-écologie. In : *Demeter 2006*. Éditions Club Demeter.
- CIRAD, 2011. Inventer une nouvelle agriculture, http://www.cirad.fr/cirad_fr/innovation-expertise/competences-et-expertises/inventer-une-agriculture-ecologiquement-intensive-pour-nourrir-la-planete
- COLLECTIF, 2009. *Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies*. Expertise scientifique collective de l'INRA. Éditions Quae, 177 p.
- DAWSON J.C., RIVIÈRE P., GALIC N., PIN S., SERPOLAY E., MERCIER F., GOLDRINGER I., 2010. On-farm conservation and farmer selection as a strategy for varietal development in organic agricultural systems. *EUCARPIA 2nd Conference of the organic and low-input agriculture. Breeding for resilience: a strategy for organic and low-input farming systems ?* Paris, France, décembre 2010, https://colloque.inra.fr/eucarpia2010_organic_li/Proceedings
- DEGUINE J.P., FERRON P., RUSSEL D., 2008. *Protection des cultures. De l'agrochimie à l'agroécologie*. Éditions Quae, 187 p.
- DORÉ T., SENE M., PELLISSIER F., GALLET C., 2004. Approche agronomique de l'allélopathie, *Cahiers d'agriculture*, 13, 1-8.
- DÖRING T., WOLFE M., JONES H., PEARCE H., ZHAN J., 2010. Breeding for resilience in wheat - Nature's choice. *EUCARPIA 2nd Conference of the organic and low-input agriculture. Breeding for resilience: a strategy for organic and low-input farming systems ?* Paris, France, dec. 2010, https://colloque.inra.fr/eucarpia2010_organic_li/Proceedings
- DUPRAZ C., 2005. Entre agronomie et écologie : vers la gestion d'écosystèmes cultivés. In : *Demeter 2006*. Éditions Club Demeter, Paris.
- EVANS L.T., FISCHER R.A., 1999. Yield potential : its definition, measurement, and significance. *Crop Science*, 39, 1544-1551.
- FÉRAULT C., LE CHATELIER D., 2009. *Une histoire des agricultures*. Éditions France agricole, Paris, 164 p.
- FINCKH M.R., 2008. Integration of breeding and technology into diversification strategies for disease control in modern agriculture. *European Journal of Plant Pathology*, 121, 399-409
- FOK M., 2010. Autant en emporte la culture du coton transgénique aux États-Unis. *Cahiers d'agriculture*, 19, 292-298.
- GALLAIS A., 2005. Progrès réalisés en amélioration des plantes et agriculture durable. *Comptes-rendus de l'Académie d'agriculture de France*, séance du 1^{er} juin 2005.
- GALLOWAY J.N., COWLING E.B., 2002. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change. *Ambio*, 31, 64-71.
- GOLDRINGER I., PROUIN C., ROUSSET M., GALIC N., BONNIN I., 2006. Rapid differentiation of experimental populations of wheat for heading-time in response to local climatic conditions. *Annals of Botany*, 98, 805-817.
- GRIFFON M., 2010. *Pour des agricultures écologiquement intensives*. Éditions de l'Aube, 144 p.
- MAZOYER M., ROUDART L., 1997. *Histoire des agricultures du monde*. Éditions du Seuil, 543 p.
- MEYNARD J.M., JEFFROY M.H., 2006. Quel progrès génétique pour une agriculture durable ? *Les dossiers de l'environnement de l'INRA* n°30, 15-25.
- MEYNARD J.M., 2010. Diffusion des pratiques alternatives à l'usage intensif des pesticides : analyse des jeux d'acteurs pour éclairer l'action publique. *Colloque Écophyto R&D : Réduire l'usage des pesticides*, 28 janvier 2010, http://www.inra.fr/l_institut/etudes/ecophyto_r_d
- MILLE B., BELHAJ FRAJ M., MONOD H., DE VALLAVIEILLE-POPE C., 2006. Assessing four-way mixtures of winter-wheat cultivars from the performances of their two-way and individual components. *European Journal of Plant Pathology*, 114, 163-173.
- PAILLARD S., GOLDRINGER I., ENJALBERT J., DOUSSINAULT G., DE VALLAVIEILLE-POPE C., BRABANT P., 2000 a. Evolution of resistance against powdery mildew in winter-wheat populations conducted under dynamic management. I. Is specific seedling resistance selected ? *Theoretical and Applied Genetics*, 101, 449-456.
- PAILLARD S., GOLDRINGER I., ENJALBERT J., TROTTEZ M., DAVID J., DE VALLAVIEILLE-POPE C., BRABANT P., 2000 b. Evolution of resistance against powdery mildew in winter-wheat populations conducted under dynamic management. II. Adult resistance. *Theoretical and Applied Genetics*, 101, 457-462.
- PAPY F., 2008. Agriculture et industrialisation. In : *Encyclopaedia Universalis*, Universalis, Paris.
- PAPY F., AMBROISE R., à paraître. Projets agricoles, projets de paysage, entre découplage et jointure. Ouvrage en préparation à la mémoire de Jean-Pierre Deffontaines.
- REAU R., DORÉ T., QUINSAC A., 2005. Comprendre et utiliser l'allélopathie pour améliorer la gestion des cultures dans les rotations. In : *Demeter 2006*. Éditions Club Demeter, Paris.
- RHONÉ B., REMOUÉ C., GALIC N., GOLDRINGER I., BONNIN I., 2008. Insight into the genetic bases of climatic adaptation in experimentally evolving wheat populations. *Molecular Ecology*, 17, 930-943.
- RHONÉ B., VITALIS R., GOLDRINGER I., BONNIN I., 2010. Evolution of flowering time in experimental wheat populations: a comprehensive approach to detect genetic signatures of natural selection. *Evolution*, 64-7, 2110-2125.
- THENAIL C., JOANNON A., CAPITAINÉ M., SOUCHÈRE V., MIGNOLET C., SCHERMANN N., DI PIETRO F., PONS Y., GAUCHEREL C., VIAUD V., BAUDRY J., 2009. The contribution of crop-rotation organization in farms to crop-mosaic patterning at local landscape scales. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 131, 207-219.
- VALLAVIEILLE-POPE (DE) C., 2006. Management of disease resistance diversity of cultivars of a species in single fields: controlling epidemics. *Compte-rendu de l'Académie des sciences. Biologies*, 327, 611-620.
- WAINES J.G., EHDAIE B., 2007. Domestication and crop physiology: roots of green-revolution wheat. *Annals of Botany*, 100, 991-998.
- WOLFE M. S., BARESEL J. P., DESCLAUX D., GOLDRINGER I., HOAD S., KOVACS G., LÖSCHENBERGER F., MIEDANER T., ØSTERGA H., LAMMERTS VAN BUEREN E.T., 2008. Developments in breeding cereals for organic agriculture. *Euphytica*, 163, 323-346.