

Décembre 2014
volume n° 4 / numéro n° 2
www.agronomie.asso.fr

Agronomie

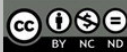
environnement & sociétés

La revue de l'association française d'agronomie



Variétés et systèmes de culture

Quelle co-évolution ? Quelles implications pour l'agronomie et la génétique ?



Agronomie, Environnement & Sociétés est une revue à comité de lecture et en accès libre éditée par l'Association Française d'Agronomie (AFA) sous le numéro ISSN 1775-4240. Plus d'informations www.agronomie.asso.fr/aes. L'AFA est une association à but non lucratif qui publie des travaux en accès libre.

Les articles sont publiés sous la licence Creative Commons 2.0. La citation ou la reproduction de tout article doit mentionner son titre, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue AE&S et de son URL, ainsi que la date de publication.

Quelle place de la génétique dans le futur avec la perspective d'augmenter la production et d'apporter une contribution positive à l'environnement ? L'exemple des céréales

Philippe GATE*

*Directeur scientifique ARVALIS - Institut du végétal
Administrateur et membre de l'Association des Sélectionneurs Français - E-mail :
p.gate@arvalisinstitutduvegetal.fr

Opportunités et exigences d'une agriculture multi-performante

Le contexte de la production agricole a évolué notablement ces dernières années avec le défi de nourrir et l'exigence de mieux gérer la planète, et face à un jeu de contraintes de plus en plus impactant : des contraintes décidées (restriction des solutions phytosanitaires, réduction des volumes d'irrigation avec des calendriers plus incertains), des contraintes subies (changement climatique) et quasiment programmées (volatilité des prix, augmentation du coût de l'énergie).

Face à ce défi, tout le monde est d'accord pour concevoir des systèmes de culture combinant quatre grands objectifs :

- Moins dépendants des intrants de synthèse, de la chimie, à l'hectare mais aussi à l'unité produite ;
- Pérennisant davantage les ressources naturelles, réduisant les impacts environnementaux, voire contribuant positivement aux enjeux écologiques, garantissant la santé des agriculteurs ;
- Plus résilients face aux changements globaux ;
- Tout en assurant un haut niveau de production, une qualité nutritionnelle et sanitaire irréprochables et une bonne efficacité économique.

L'atteinte de ces objectifs repose sur le développement d'une agriculture productive, dont l'augmentation des volumes par hectare au plan national est un impératif dans le système économique actuel, pour contribuer aux besoins alimentaires mondiaux et pour satisfaire des marchés export de proximité et en croissance structurellement forte dans les prochaines années. Cette nécessité d'accroître les productions disponibles pour des marchés en croissance ou demandeurs s'applique de la même façon à certains marchés domestiques : si la consommation de blé

meunier ou de maïs grain en alimentation animale est et sera stable, voire (alimentation animale) en légère érosion, d'autres (production biologique, protéagineux, produits industriels biosourcés...) ont un fort potentiel de développement. Ces objectifs imposent également la recherche d'une excellence environnementale face à une attente forte des citoyens, des clients, et aussi des producteurs eux-mêmes soucieux tant de leur cadre de vie, de la préservation de leur santé, que de la satisfaction des consommateurs de leurs productions.

La stratégie sera de combiner les apports d'une optimisation des systèmes en place (choix variétal, optimisation technique des pratiques, du pilotage des cultures..) efficace à court terme, et la recherche de systèmes de culture innovants ou de rupture, permettant de maintenir ou d'accroître la production, tout en recherchant une moindre dépendance aux intrants et une plus grande capacité de résilience vis-à-vis d'accidents climatiques de plus en plus fréquents.

La réalisation de ces objectifs (dans un cadre réglementairement contraint, de mise en œuvre de pratiques agro-écologiques, de réduction des intrants de synthèse, et de changement climatique), impliquera de mieux combiner l'ensemble des leviers techniques disponibles et utiles, y compris les intrants de synthèse dans une boucle itérative de progrès, Elle exigera en parallèle une évaluation continue des marges de progrès en fonction des avancées des connaissances et des innovations qui seront proposées aux producteurs : évaluer les fonctions éco-systémiques mais aussi la rentabilité économique, et également la faisabilité agronomique, afin d'estimer les risques de succès ou d'échec des solutions proposées.

Par ailleurs, certains objectifs de performance obligent à une investigation au-delà de l'échelle de l'exploitation. Certains effets ne seront bénéfiques et durables que si les pratiques sont modifiées à l'échelle des territoires et collectivement par les producteurs, comme par exemple, l'amélioration de la qualité de l'eau, la gestion quantitative de l'eau, la biodiversité fonctionnelle basée sur les auxiliaires, la gestion durable des résistances variétales...

L'objet de cet article est d'appréhender quelles sont les marges de manœuvre de l'amélioration génétique en prenant plus particulièrement l'exemple des céréales, dans une agriculture multiperformante, en interaction avec les autres moyens techniques à différents niveaux d'organisation (itinéraires techniques à l'échelle de la parcelle, systèmes de culture, et territoire).

Agriculture multi-performante et valorisation de la génétique

Schématiquement, la pleine valorisation de l'amélioration génétique pour une agriculture multi-performante dans un contexte de moindre dépendance aux intrants de synthèse, de meilleure gestion des ressources, et de changement climatique, impliquera de combiner davantage différents moyens d'action :

- Associer stratégie d'esquive et caractères de tolérance, de résistance aux stress biotiques (dûs aux êtres vivants, d'ordre parasitaire) et abiotiques (résultant de facteurs environnementaux, d'ordre climatique et nutritionnel) ;

- Régler les itinéraires techniques pour maximiser l'expression des caractères mais aussi rechercher dans le cadre de systèmes de culture innovants, des traits génétiques spécifiques à exploiter ;

- Face à une variabilité interannuelle de plus en plus présente, travailler davantage sur la stabilité (ou la variabilité) des comportements, proposer également des « bouquets variétaux » capables de prendre en charge en complément les facteurs limitants peu prévisibles et préjudiciables.

Pour être efficace, cette approche doit d'abord identifier et hiérarchiser les moyens d'action prioritaires en regard des facteurs qui sont et qui seront au cours du temps les plus limitants. Face à un facteur limitant identifié, il apparaît également indispensable de déterminer les voies de recherche les plus fructueuses. S'agissant par exemple de l'échaudage thermique des céréales, faut-il privilégier des semis plus précoces, une phénologie adaptée, ou améliorer la tolérance aux fortes températures ? Avec l'ambition de sélectionner des variétés productives sans réduire la teneur en protéines des grains, faut-il améliorer le transfert d'azote des parties végétatives vers les grains ou stimuler l'absorption racinaire post-floraison ?

Les réponses à ces questions, pas toujours abordées, permettent de savoir ce qu'il faut phénotyper (quels caractères observables analyser) en priorité, et aussi comment phénotyper. Mais cela n'est pas encore suffisant : il deviendra de plus en plus nécessaire de mieux connaître la variabilité des expressions en fonction des conditions de milieu et des pratiques. Ensuite, le travail nécessaire d'assemblage pour proposer les combinaisons de réglage les plus efficaces (variétés-pratiques-système de culture) impliquera également la mise au point d'outils de pilotage appropriés pour gérer les aléas interannuels.

Innover dans la phénologie des espèces

Le premier levier repose sur le choix le mieux adapté au milieu des espèces et des variétés en fonction de leurs caractéristiques physiologiques et des contraintes qui s'exercent par milieu. De ce fait, la connaissance des environnements, de leurs variabilités et de leurs conséquences sur les cultures devient, avec la connaissance du fonctionnement des cultures, des disciplines socles pour valoriser la génétique.

Par espèce et par variété, il convient de caler leur phénologie, c'est-à-dire leurs phases et leurs stades de développement de telle manière que la plante évite le plus fréquemment possible les stress présents dans le milieu : c'est la stratégie d'esquive qui repose sur les meilleures adéquations entre précocité, date de semis, densité de semis et pratiques culturales associées en cohérence.

Le changement climatique qui se traduit notamment par une élévation tendancielle des températures interpelle cette notion de stratégie d'esquive. Pour le sélectionneur de céréales à paille semées à l'automne, il s'agit de mieux stabiliser dans le temps l'apparition de certains stades de développement. En effet, en situations de températures automnales et hivernales « anormalement » douces (comme en 1995 et en 2007), le stade début-montaison risque

d'apparaître beaucoup trop tôt en cours de campagne occasionnant des préjudices significatifs : risque de gel d'épis de montaison, risque de verse car élongation en jours courts, faible interception du rayonnement. La recherche de nouveaux profils phénologiques avec des variétés plus stables peut être obtenue en associant aux gènes de précocité intrinsèque, des gènes de sensibilité à la durée du jour. En effet, les céréales sont des espèces de jours longs préférentiels, avec une variabilité de comportement entre les variétés, ce qui signifie que les jours courts peuvent ralentir plus ou moins fortement la vitesse de développement. Pour les variétés plus exigeantes en durée du jour, et à forte précocité intrinsèque, les stades pourront être suffisamment précoces (pour éviter certains stress) tout en conservant une plus grande stabilité de comportement, y compris interannuel, l'élévation des températures en jours courts ayant un impact modéré sur la vitesse de développement. S'agissant du maïs semé au printemps, l'offre supérieure de cumul de températures permet de semer plus tôt des variétés plus tardives tout en acceptant de mêmes niveaux de risques. La sélection de variétés plus tardives peut donc être une stratégie intéressante au moins pour le moyen terme. À l'échelle du producteur, le choix de variétés plus tardives semées plus tôt confère des rendements actuellement plus élevés. La progression des rendements du maïs plus soutenue dans les régions du nord de la France s'explique partiellement par ces changements de pratiques et le fait que le régime thermique sub-optimal pour la photosynthèse se rapproche de plus en plus d'un régime optimal dans ces régions. En effet, dans les régions du nord de la Loire, une plus grande partie du cycle de développement s'opérait avec des températures inférieures à l'optimum de la photosynthèse (entre 20 et 25°C). Le bénéfice de l'évolution du climat de ces 25 dernières années a donc été davantage marqué pour ces situations.

Le changement climatique s'accompagnant d'une variabilité climatique interannuelle de plus en plus forte, garantit de moins en moins une pleine réussite de ces stratégies d'esquive. Pour minimiser les impacts de cet aléa interannuel, on aura tout intérêt à cultiver dans une même exploitation plusieurs variétés à rythmes de développement différents dont la présence permet une meilleure stabilité des performances : c'est la notion de « bouquet variétal ». En effet, si l'on prend l'exemple des céréales à paille, les conseils qui sont aujourd'hui prodigués visent à ce que l'agriculteur sème d'abord les variétés plus tardives puis les variétés précoces. Le but est que chacune de ses parcelles ait le même calendrier des stades de développement pour limiter ou contourner les obstacles climatiques les plus fréquents. Comme on observe une plus grande variabilité dans le positionnement calendaire des stress (en particulier thermiques et hydriques), cette démarche a toute chance de devenir de moins en moins rentable pour le producteur. Les techniciens du développement doivent donc proposer des méthodes capables à la fois d'intégrer les événements tendanciels (contournables partiellement via l'esquive) et ceux plus aléatoires, moins prédictibles mais néanmoins dommaçables. Le fait que l'agriculteur sème en moyenne trois variétés dans son exploitation constitue une opportunité à exploiter. Au-delà des prescripteurs qui devront faire évoluer leurs méthodologies pour mieux conseiller les produc-

teurs, ces nouveaux scénarios devraient également interroger les sélectionneurs : être capable d'offrir par exploitant, pour les différents milieux un tel bouquet variétal. Cet objectif met en avant le besoin de travailler davantage sur des axes nouveaux de complémentarité et de diversité génétiques.

Avec l'opportunité de ressources thermiques supérieures et la nécessité d'être moins dépendant des intrants (en particulier des engrais azotés), les sélectionneurs pourraient également s'orienter vers des matériels ultra-précoces permettant une double culture sur une année. Des travaux plurianuels menés par Arvalis démontrent par exemple que les légumineuses cultivées en culture intermédiaire peuvent offrir jusqu'à 140 kg N.ha⁻¹ pour la culture de printemps suivante comme un maïs. Cette possibilité constitue aussi une source de réflexion pour redynamiser la sélection du blé de printemps, délaissée depuis l'après-guerre, alors que le rendement de l'orge de printemps a été sur un temps court de 20 ans environ fortement amélioré. Les bonnes années, le rendement de l'orge de printemps peut excéder 100 q.ha⁻¹, avec des records observés autour de 120 q.ha⁻¹.

Mieux valoriser les caractères de résistance et de tolérance à l'échelle de la parcelle

Cette première stratégie d'esquive doit bien entendu être combinée avec des traits génétiques associés à des critères de tolérance, d'efficacité ou de sobriété. On rappellera que pour les céréales à paille et pour le maïs, l'amélioration du progrès génétique (augmentation du rendement/ha/an) a été associée à une amélioration de la tolérance aux maladies (céréales et maïs), de l'absorption d'azote et/ou de l'efficacité d'utilisation de l'azote (blé), ainsi que de l'efficacité d'utilisation de l'eau (maïs). De ce fait le levier génétique est central car peut permettre une augmentation conjointe du potentiel de rendement et des critères de tolérance et de résistance.

• Mieux gérer les ressources : azote et eau

La sélection de variétés efficaces et sobres vis-à-vis de l'azote constitue une priorité forte : elle permet effectivement d'intégrer conjointement atténuation et adaptation au changement climatique. En effet, les engrais azotés sont à l'origine de la quasi-totalité des émissions des gaz à effet de serre dans les systèmes de grandes cultures, et on a démontré que le coefficient apparent d'utilisation de l'azote (CAU) est de plus en plus variable, compte tenu d'une disponibilité des pluies plus fluctuante en cours de montaison dans le cas du blé. Par ailleurs, l'azote est un élément qui sera de plus en plus rare et cher et néanmoins indispensable à la production : hormis les légumineuses, les plantes ont besoin - pour la production photosynthétique - d'azote.

L'efficacité dépend en partie de la génétique : dans le cas du blé par exemple, le besoin en azote pour produire un quintal de grains varie aujourd'hui de 2.7 à 3.5 kg N selon les variétés, ce qui correspond à un enjeu de 60 kg N.ha⁻¹ en termes de besoin azoté pour un rendement de 72 q.ha⁻¹ (moyenne nationale du rendement du blé). Les méthodes d'acquisition de telles références sont connues et éprouvées pour un certain nombre d'espèces et pourraient donc enrichir le dispositif de cotation des variétés au moment de leur ins-

cription. On peut ici mentionner qu'un dispositif expérimental nouveau qui vise à caractériser l'efficacité azotée est actuellement en cours de test dans le cadre du CTPS (Comité Technique Permanent de la Sélection, instance émanant du ministère qui coordonne l'inscription des variétés). En complément, il nous faut maintenir pour certaines espèces (le blé tendre et le blé dur notamment), une teneur en protéines satisfaisante pour les marchés avec de telles variétés efficaces, ce qui passe par une sélection visant à augmenter la migration d'azote vers le grain. Pour les céréales à paille, nous connaissons le chemin le plus efficace, d'un point de vue physiologique pour y parvenir : stimuler l'absorption tardive par les racines. Pour le blé, un surplus d'absorption modique après la floraison de 10-12 kg N.ha⁻¹ se traduit par une élévation moyenne de un point de protéines. La voie qui consisterait à stimuler le transfert d'azote des parties végétatives vers les organes récoltés serait sans doute incompatible avec l'obtention de rendements élevés, en anticipant la sénescence des feuilles.

La grande majorité des acheteurs de blé tendre (meunerie française, pays importateurs) exigent par ailleurs des variétés de type Blé Panifiable Supérieur (BPS), caractérisées par la présence de certaines protéines, notamment de gluténines. Il convient donc de vérifier que ces différents critères désirés (plus faible besoin en azote, plus forte absorption racinaire post-floraison et profil protéique type BPS) sont suffisamment indépendants pour être introduits sans trop de contraintes au sein d'une même variété.

Avec une ambition d'augmenter encore plus la production pour le futur, il sera sans doute nécessaire d'innover dans le profil des protéines des grains afin de pouvoir satisfaire les exigences de qualité avec des teneurs en protéines plus faibles. L'atteinte de tels objectifs qualitatifs engagera des recherches collaboratives impliquant davantage l'amont et l'aval. Une valorisation de ces nouveaux profils protéiques en complément aux profils actuels, plus riches en protéines, exigés par les importateurs des pays tiers, imposera une réflexion de l'ensemble des acteurs de la filière vers une plus grande segmentation du marché. Ces profils protéiques nouveaux (moins exigeants en azote des grains) procureront des degrés de liberté, des effets bénéfiques en amont : plus de rendement par hectare via la sélection car augmenter d'un point la teneur en protéines équivaut à diminuer le rendement de l'ordre de 10 q.ha⁻¹. Cette tendance est cohérente avec l'estimation des gains de rendement du blé tendre dus au progrès génétique segmentée par catégorie qualitative (BPS = blé panifiable supérieur, BP = blé panifiable, BAU = blé autres usages) : en moyenne, on trouve un écart de + 0.2 q.ha⁻¹.an⁻¹ entre les blés panifiables et les blés pour d'autres usages, écart qui peut approcher ou excéder la valeur de 0.3 q.ha⁻¹.an⁻¹ dans certaines régions comme la Bretagne ou les Pays de Loire. Par ailleurs, on peut mentionner que les variétés ou les espèces moins riches en protéines - comme le maïs - ou celles dont le procédé de transformation exige de faibles teneurs - comme les orges brassicoles - affichent des besoins en azote par quintal plus faibles (de l'ordre de 2.2 kg N.ha⁻¹ pour produire un quintal de grains). Inversement, les espèces dont les teneurs en protéines sont plus fortes (par ordre croissant, blé tendre BAU puis blé tendre BPS puis blé dur) se caractérisent par des gains de rendement dus à la génétique plus faibles et par une dépen-

dance à l'azote plus sensible (de 2.8 pour un blé type BAU à 3.9 kg d'azote pour le blé dur pour produire un quintal de grains). La demande de variétés de céréales à fortes teneurs en protéines a donc un double impact négatif : sur le progrès génétique et sur l'exigence en azote.

Concernant la dépendance à la ressource en eau, nos connaissances sur la physiologie nous permettent aussi d'adopter la voie la plus gagnante : pour de nombreuses espèces, il s'agit d'augmenter l'efficacité d'utilisation de l'eau par la plante en obtenant pour une même quantité d'eau transpirée une meilleure conversion en rendement. Vouloir adapter les variétés via la régulation stomatique (c'est-à-dire orienter la sélection vers des variétés fermant leurs stomates pour réduire la consommation d'eau) serait un échec car d'une part, les types de sécheresse (fréquence, intensité, période d'apparition...) sont de plus en plus variables inter-annuellement à l'échelle d'une même parcelle, et d'autre part les variétés à forte régulation ne profiteraient pas des années favorables. Une solution idéale serait d'identifier et de sélectionner des variétés avec une régulation stomatique s'adaptant aux scénarios et aux types de sécheresse.

Pour les espèces de printemps comme le maïs notamment, la stratégie d'esquive via des semis très précoces s'avère une piste à privilégier en complément. Si l'on tend vers des semis très précoces, les simulations montrent que la croissance du maïs risque d'être limitée par la présence de températures trop fraîches. Dans le futur, le recours nécessaire à des semis ultra précoces aura comme incidence de caler les premières phases du cycle à des températures sub-optimales pour la croissance et le passage de la transition florale. La sélection de variétés dont la photosynthèse serait moins sensible aux basses températures constitue un axe intéressant, avec d'ores et déjà des recherches en cours.

• **Mieux gérer les stress thermiques**

S'agissant toujours de l'adaptation aux fortes températures, les experts du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) proposent plusieurs pistes : la précocité variétale, la date de semis, la tolérance. Sur la base de cette proposition, les simulations effectuées avec des données météorologiques du passé et du futur s'avèrent très éclairantes : à l'échelle de la France mais aussi pour de nombreux pays, c'est le risque de température excessive au cours du remplissage des grains qui affectera le rendement du blé, plus que les autres paramètres climatiques. Afin de limiter les pertes de rendement consécutives aux excès de températures, on démontre qu'il nous faut en priorité améliorer la tolérance intrinsèque des variétés à la canicule car les stratégies d'esquive fondées sur la phénologie ou le recours à des semis précoces auront des effets bien plus marginaux et aléatoires. Du coup, cette conclusion questionne à nouveau le monde de la recherche : connaît-on les mécanismes physiologiques à l'origine de l'échaudage thermique ? Existe-t-il une variabilité génétique exploitable ? Que et comment phénotyper spécifiquement un tel trait ? Les grands programmes nationaux ou mondiaux n'ont intégré que tardivement cette dimension parmi leurs priorités.

• **Mieux gérer les bioagresseurs**

S'agissant de la dépendance aux produits phytosanitaires, un travail d'inventaire et de hiérarchisation doit être mené pour les différents bioagresseurs (maladies, ravageurs et adventices) : identifier par espèce, les bioagresseurs les plus nuisibles, puis par bioagresseur, les techniques et pratiques mobilisables en les hiérarchisant. Ce type d'expertise a été conduit sur la plupart des grandes cultures. Il conduit à graduer par espèce et par cible de bioagresseur, les efficacités relatives des différents leviers disponibles : génétique, agronomique, techniques alternatives, pilotage de la protection, et optimisation de la pulvérisation. Pour un grand nombre de maladies et pour certains ravageurs, les constats observés et les acquisitions en cours confirment clairement que le levier génétique s'avère souvent le plus efficace et le plus rentable. Il est crucial de rappeler que l'on a démontré que le progrès génétique du blé n'a pas fléchi en France depuis 1982. Il a été plus élevé sur les parcelles non protégées contre les maladies ($1.3 \text{ q.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) que sur des parcelles traitées ($0.9 \text{ q.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$). Ceci signifie que les variétés récentes sont simultanément plus tolérantes et plus productives. En cohérence, une étude récente démontre également que les notes de résistance aux principales maladies des variétés de céréales inscrites ont évolué très favorablement au cours des vingt dernières années.

Le facteur variétal pourra également être valorisé dans le cadre de techniques nouvelles de protection des cultures. C'est par exemple le cas des mécanismes de défense des plantes (SDP). Les puces génétiques récemment mises au point sont capables de révéler les différentes voies métaboliques qui sont déclenchés lorsque la plante développe un système de défense naturelle. Ces puces d'expression permettent donc à la fois d'identifier de futures molécules candidates et les fonds génétiques les plus aptes à déclencher de tels mécanismes, l'interaction génotype-produits SDP apparaissant effectivement comme très présente. La recherche de molécules olfactives attractives ou au contraire répulsives vis-à-vis de certains bioagresseurs (en particulier contre les ravageurs), et de molécules à propriétés allélopathiques (capacité d'une plante à inhiber la croissance d'autres plantes par sécrétion de substances chimiques) sont aussi des voies qui valoriseront la variabilité génétique des plantes cultivées et des plantes de services (couverts intermédiaires ou permanents).

La notion de « bouquet variétal » décrite plus haut constitue également une démarche à développer davantage dans le cadre de la gestion des bioagresseurs du fait notamment que les maladies sont de moins en moins inféodées à une région particulière : fortes épidémies de rouille brune dans le nord-ouest en 2007, de septoriose dans le sud en 2012, de rouille jaune dans le sud-ouest en 2014...

La réduction des solutions chimiques et l'apparition de résistances aux herbicides (dus en partie au recours à une même famille chimique et au raccourcissement des rotations), réduisent le spectre des solutions efficaces. En l'absence de variétés résistantes aux herbicides, la maîtrise de l'enherbement doit mobiliser en plus de l'usage raisonné des familles chimiques (quand cela est possible) prioritairement les leviers agronomiques : les effets rotationnels en priorité, notamment l'introduction d'espèces de coupure (sans oublier d'explorer l'opportunité récente des cultures

intermédiaires) et certains traits variétaux liées à l'architecture (pouvoir couvrant des variétés). Le recours à des semis à écartements plus larges en blé, pour rendre possible le désherbage mécanique, n'est pas à promouvoir avec les variétés actuelles : les pertes de rendement par hectare sont, d'après les premiers travaux, beaucoup trop importantes en particulier dans les zones à fort potentiel de rendement.

- **Mieux valoriser les relations génotypage-phénotypage**

L'offre technologique en capteurs de proxidtection (télé-détection rapprochée, sur de courtes distances) couplée à des modèles de fonctionnement des cultures ouvre des voies de progrès très intéressantes dont certaines encore insoupçonnées. Par exemple, la capacité à miniaturiser et à coupler les informations issues de différents capteurs sur les plantes (indice foliaire vert, teneur en chlorophylle), sur le sol (teneur en eau spatialisée) couplée à des observations et à des modèles de connaissance permettront assez rapidement d'estimer l'efficacité d'utilisation de l'eau à l'échelle de la micro-parcelle, donc de la lignée ! De même l'accès à de très nombreuses données de cinétiques fines sur la croissance (nombre de mesures par cycle de développement permises par les capteurs, sur un grand nombre de lignées) va sans doute permettre l'émergence de nouveaux formalismes en termes de modélisation du fonctionnement des cultures, mieux adaptés à l'amélioration des plantes.

De ce fait, ces outils et méthodes amélioreront la puissance d'interprétation des relations génotypage-phénotypage. Associés à une connaissance fine des conditions environnementales, des pratiques culturales des réseaux d'évaluation, la connaissance de la variabilité de l'expression d'un caractère en fonction du milieu sera plus accessible.

Nécessité d'intégrer les innovations génétiques dans un cadre d'investigation plus large :

... de la parcelle cultivée...

D'une manière générale, le levier génétique ne sera pleinement valorisé que s'il est intégré dans des systèmes de culture dont le réglage des techniques permet son entière expression, ou mieux, fournit des effets ou des services positifs additionnels. Pour passer du concept à la traduction opérationnelle, il nous faut connaître, intégrer, puis valoriser les interactions positives entre les caractéristiques variétales identifiées et les pratiques culturales ; identifier et valider les meilleures combinaisons qui permettent de réduire la dépendance aux intrants de synthèse ou aux ressources épuisables.

Le point crucial, source de réussite et peut-être d'innovations, est d'identifier en quoi un itinéraire technique nouveau (mobilisant par exemple davantage des pratiques agro-écologiques) modifie le parcours de croissance, de développement et d'élaboration du rendement et de la qualité. Cette investigation nous permettra effectivement de déceler des traits, des aptitudes phénotypiques spécifiques valorisant de nouvelles pratiques. En voici quelques exemples.

En restant à l'échelle de l'itinéraire technique, une meilleure résilience au stress hydrique combinera le caractère d'efficacité génétique avec la stratégie d'esquive qui détermine par milieu les meilleures trajectoires phénologiques. Un examen de la variabilité locale interannuelle des sécheresses imposera une approche définissant, compte tenu de cette variabilité, les meilleures combinaisons variétés-esquive, profitant de l'opportunité que le producteur cultive en moyenne trois variétés.

Pour l'azote, le premier objectif est de rechercher des sources d'azote naturelles (en substitution aux intrants de synthèse) notamment via les légumineuses par la rotation, l'introduction de culture intercalaires, de couverts permanents vivants ou morts, mais aussi par le recours aux produits organiques. Les études menées par les instituts techniques et de recherche ont permis d'en estimer leur composition chimique et leur biodisponibilité au cours du temps pour les cultures. Une deuxième voie consiste à améliorer l'extraction des éléments nécessaires à l'alimentation de la plante. En plus d'une gestion de la fertilité physique et chimique du sol pour garantir la capacité de production, on peut citer les possibilités offertes par l'activité biologique des sols ; notamment, les mycorhizes dont les filaments au contact des racines permettent une meilleure capacité d'absorption et aussi certaines bactéries (par exemple, les actinomycètes) qui ont une action sur la biodisponibilité en éléments majeurs.

On recherchera par les pratiques opérant au niveau du système de culture à augmenter les populations endogènes bénéfiques du sol, sachant que des inoculations de souches sont également des techniques qui peuvent être mises en œuvre. Les connaissances pour passer de l'identification des espèces présentes dans les sols à des notions de fonctions éco-physiologiques sont nécessaires.

S'agissant plus particulièrement de l'azote, le recours aux espèces associées (par exemple associations blé-légumineuses, colza-lentille...) permettent, à l'échelle de l'exploitation, de diversifier, et par complémentarité fonctionnelle, d'obtenir des volumes par exploitant supérieurs et parfois de meilleure qualité. S'agissant du blé, la performance agronomique du mélange en conduite non fertilisée est supérieure, avec des grains plus riches en protéines, ce qui ouvre des opportunités réelles pour des systèmes bas intrants ou bio.

À l'optimum de fertilisation azotée, ou proche de l'optimum, le volume récolté d'un blé en mélange avec un protéagineux sur 20 hectares est en général supérieur à celui récolté en culture pure sur 10 hectares ; et il est également aussi plus riche en protéines. Cet enrichissement en protéines s'effectue quasi-directement au détriment du rendement par hectare en fonction du niveau de concurrence, en termes de croissance, exercée par la plante associée. En réservant une plus grande surface de l'exploitation au mélange, il est donc possible de produire -via l'association- un plus grand volume de qualité avec sans doute des voies de progrès de réduction d'intrants.

Ces leviers agro-écologiques de la fertilisation sont un complément à ceux mieux connus et qui font, d'année en année, leur preuve en termes d'efficacité : efficacité des apports d'engrais (type d'engrais, moment d'épandage, ensemble des innovations liées à l'amélioration des produits et des

techniques permettant de mieux les épandre, en moindre quantité...), mise en œuvre d'outils de pilotage prenant en compte les aléas annuels, garantissant production et qualité en évitant tout excès, et aptitude génétique (efficacité d'absorption et d'utilisation de l'azote).

S'agissant plus particulièrement des variétés, il conviendra à l'échelle de la parcelle, d'associer au niveau de la variété plusieurs caractères (plus faible besoin, variété à forte fertilité des épis car caractère lié à une moindre exigence en azote pour produire un quintal de grains), plus forte absorption post floraison) avec des techniques culturales synergiques (fractionnement des apports azotés et densité de plantes pour une cinétique d'absorption efficace afin d'éviter une croissance et un excès d'absorption excessifs et trop précoces, nuisibles à l'efficacité). Le recours à des outils de pilotage sera dans ce cadre une garantie pour suivre la trajectoire optimale en termes d'absorption, évitant à la fois les états d'excès et de carence.

À l'échelle du système de culture, un blé cultivé depuis plusieurs années sous un couvert de légumineuses sera confronté à une concurrence vis-à-vis de la plante de service et disposera d'une offre en éléments (notamment en azote) qui pourra être différente en quantité totale (une offre en azote pourquoi pas supérieure si le système est bien piloté) et au cours du temps (concurrence en début de cycle, forte minéralisation en fin de cycle...).

Ces quelques éléments laissent clairement entrevoir des spécificités :

- À la fois génétiques, avec la recherche d'une croissance active en début de cycle, d'une tolérance aux carences précoces, et d'une capacité à bénéficier d'une minéralisation tardive (phénologie, effet *stay-green*, c'est-à-dire un maintien prolongé de la surface verte des feuilles lié à la teneur en chlorophylle et à la teneur en RubisCO, enzyme clé de la photosynthèse et capacité d'absorption post-floraison) ;

- Avec une adaptation dans le pilotage de la culture (prise en compte des fournitures en éléments de la plante de service, pour une adaptation des dates des apports).

En complément, on entrevoit que dans de tels systèmes, la quantité d'azote totale disponible pour la plante, en dépit d'une réduction de la dose d'engrais, pourra être supérieure à celle provenant d'un système « classique » conduit à l'optimum de fertilisation azotée pour le rendement. Cette possibilité ouvre aussi une voie nouvelle de rechercher des variétés capables d'absorber plus d'azote pour augmenter le couple rendement-teneur en protéines.

En revanche, pour un blé de printemps précédé d'une culture de légumineuse intercalaire, il est possible que la mise à disposition d'azote soit en tendance trop précoce et plus variable. Il faudra sans doute rechercher pour ce type de pratiques des variétés moins capables d'absorber l'azote pendant le tallage herbacé, via par exemple une architecture différente. En plus d'économiser de l'azote engrais, cette succession permettra également de réduire la pression et les dégâts de certaines maladies. S'agissant de la septoriose, l'inoculum primaire risque fort d'être plus faible (comparativement à un semis précoce d'automne) et sur-

tout la plante pourra davantage échapper au développement de la maladie vers les étages foliaires supérieurs via un rythme d'émergence des feuilles plus rapide.

Globalement, pour les maladies du feuillage il faudra marier au sein de la variété, génétique de résistance, architecture adaptée (freinage du développement de certaines épidémies), et également d'autres traits identifiés plus haut concourant à la tolérance et à l'efficacité (effet « *stay green* », indice de récolte plus élevé). Ces traits seront valorisés par un réglage adapté des pratiques : densité de semis (exerçant un rôle sur le « phytoclimat », l'architecture), date de semis (modifiant la vitesse de sortie des feuilles permettant un meilleur échappement) et statut azoté des feuilles à des stades clés (les excès d'azote même temporaires stimulent la production des spores de certains champignons comme les rouilles).

Ces références acquises vis-à-vis de l'azote et des maladies sont source de questionnements à la fois pour l'agronome et le sélectionneur : par exemple, s'agissant des céréales, l'architecture et l'indice foliaire sont-ils adaptés à des conduites « agro-écologiques » ? S'agissant des maladies, aurait-on tout intérêt à diminuer l'indice foliaire vert (total de la surface déployée par les parties vertes des feuilles par m² de sol), souvent supra-optimal, proches de 5-6 pour le stabiliser à 3 ou 4 jusqu'à la fin du remplissage ? Pour l'efficacité azotée, il serait nécessaire d'éviter le tallage herbacé excessif jusqu'à la fin du tallage et d'obtenir un taux de montée, une croissance plus soutenue par la suite.

De telles hypothèses, valorisant ces techniques, pourraient être testées en utilisant des lignées isogéniques dans différentes modalités de cultures.

... au territoire

Ces réglages doivent à moyen terme franchir l'échelle de la parcelle et de l'exploitation vers une dimension plus territoriale : des objectifs majeurs comme la gestion de l'eau, la durabilité des résistances, la biodiversité fonctionnelle et une meilleure résilience face aux aléas climatiques nécessiteront effectivement un paramétrage et un schéma d'organisation à ce niveau d'échelle spatiale.

Pour la gestion quantitative de l'eau à l'échelle territoriale, les étapes à satisfaire sont par ordre de priorité le choix du panier d'espèces, le recours à des variétés efficaces puis la stratégie d'esquive et le pilotage des cultures dont l'irrigation. Concernant la gestion qualitative, les objectifs prioritaires sont de localiser, de caractériser les parcelles à risques afin de proposer des solutions adaptées, efficaces et rentables économiquement (changements de pratiques, aménagements des bordures de parcelles).

En relation avec la gestion de la durabilité des résistances, les informations génétiques disponibles pour certaines maladies vont permettre de prochainement tester la pertinence d'organiser différemment le paysage variétal en fonction des pathotypes. La disposition actuelle des variétés, leur taux de renouvellement permettent-ils une mosaïque suffisante pour garantir la durabilité des gènes de résistance ? Des démarches sont à l'étude sur la rouille brune du blé, le phoma du colza... mais leurs évaluations en cours restent délicates (gestion à l'échelle du territoire, évaluation sur plusieurs années...), de même que la faisabilité des règles de décision collectives.

Concernant la gestion de la biodiversité fonctionnelle, l'échelle supra parcellaire apparaît comme un niveau privilégié à mieux exploiter : au-delà des aménagements intra et extra parcellaires, les concepts de nurserie (zone dédiée à la production d'auxiliaires, de prédateurs) et de corridor écologique doivent interpeller la notion de complémentarité spatiale entre les différents éléments fixe du paysage et également entre les différents systèmes de production (systèmes grande culture, polyculture élevage, agriculture bio...). Plus simplement, les lâchers d'auxiliaires n'auront une action efficace et durable que s'ils sont déployés sur des surfaces à la fois suffisamment proches et étendues. La biodiversité fonctionnelle devrait également valoriser et explorer davantage la variabilité génétique inter et intra-espèces. Par exemple, s'agissant de l'activité des diptères, une concordance des cycles par une phénologie mieux adaptée des couverts au niveau des dates de floraison mais aussi par le choix de variétés ayant une plus grande et longue accessibilité au nectar (variétés à nectaires extra-floraux). Rechercher au contraire des décalages de floraison entre le blé (avec par ailleurs des variétés qui fleurissent sur un pas de temps court) et les graminées de la parcelle ou en bordure pour limiter la dissémination de l'ergot. Egalement rechercher et installer en bordure des espèces incapables de développer le champignon. De manière générale, pour les concepts de nurserie ou de plantes piège, proposer des couples plante-auxiliaire adaptés afin d'améliorer les facteurs d'attractivité, de prolifération ou de répulsivité.

La notion de bouquets variétaux décrite plus haut constitue également une voie de progrès pour mieux stabiliser le volume et la qualité à l'échelle territoriale pour un organisme de collecte. Quelles répartitions spatiales des bouquets variétaux compte tenu de la connaissance des milieux (occurrence des facteurs limitants en termes d'intensité, de variabilité spatiale et interannuelle) ? Quels itinéraires techniques, systèmes de culture associés proposer à ce niveau d'échelle ?

Pour synthétiser

Dans la perspective d'augmenter la production et d'apporter une contribution positive à l'environnement, le levier génétique occupe et occupera une place centrale et décisive car il permet d'actionner conjointement les composantes nécessaires à cet objectif : potentiel de rendement et de qualité, tolérance, efficacité et sobriété.

La stratégie gagnante pour le développement d'une agriculture multiperformante, avec la perspective d'augmenter la production et d'apporter une contribution positive à l'environnement, passe par un certain nombre d'étapes à remplir :

- Identifier le plus rapidement possible les facteurs les plus limitants pour prioriser les actions de recherche ;
- Choisir les voies les plus efficaces compte tenu de nos connaissances pour définir les axes de recherche les plus gagnants ;
- Éprouver sur le terrain, les hypothèses de réglages des techniques avec des dispositifs adaptés, par exemple avec des essais analytiques à plusieurs facteurs dans les

systèmes, à des fins d'acquisition de nouvelles références (optimisation du réglage des combinaisons des pratiques culturales), de démonstration et de quantification (moindre dépendance des systèmes aux intrants de synthèse, via par exemple des courbes de réponse aux intrants...);

- Et réduire le fossé entre ce que nous savons et les décisions ou les actions qui sont prises, par exemple à court terme en améliorant les règles d'inscription des variétés et les dispositifs expérimentaux d'évaluation (évaluer dans des systèmes nouveaux, plus diversifiés, dont « agro-écologiques », compatibles avec le « produire plus et mieux »).

Par ailleurs, le recours à plus de diversification d'espèces et à des plantes de service, doit également interroger la recherche, à un moment où l'amélioration génétique se reconcentre sur les espèces d'intérêt économique majeur.

Cet objectif requiert indubitablement une approche transdisciplinaire (écophysiologie, génétique, pathologie et agronomie) avec une capacité à agencer et à intégrer les briques de connaissance dans le but de maximiser les effets de synergie et de durabilité, en investiguant les différents niveaux d'échelle.

Elle exige donc une attitude de complémentarité qui va au-delà des disciplines : par exemple ne pas opposer pyramidage des gènes et bouquets variétaux, ni efficacité génétique azotée avec le recours à des plantes de service (pois, luzerne...). La valorisation de la génétique mobilisera à la fois les innovations technologiques et celles du domaine de l'agronomie et de l'agro-écologie.

D'un point de vue méthodologique, on identifie bien des couches d'informations complémentaires à prendre en compte comparativement aux approches d'interactions génétique-environnement que nous utilisons classiquement. L'environnement doit être complètement explicité avec ses différents composants et déterminants : le milieu (contraintes et atouts pédoclimatiques, occurrence des stress biotiques et abiotiques) et les pratiques culturales que l'on doit envisager au-delà de l'itinéraire technique de la parcelle. La priorité est maintenant d'identifier les interactions positives entre les traits génétiques d'intérêt et l'ensemble de ces composants pour proposer par situation, les meilleures solutions techniques. Cette approche pourrait également déboucher sur la détermination de traits spécifiques nouveaux pour les sélectionneurs, à condition de faire évoluer les dispositifs d'évaluation des variétés dans le cadre des réseaux. La proposition de schémas d'organisation à l'échelle territoriale va également nécessiter la mise au point d'outils capables de mobiliser des couches d'information géographiques spatialisées sur le climat, le sol, les pratiques culturales...

La valorisation de la génétique imposera plus qu'hier de concilier et de combiner les approches analytiques et systémiques et d'organiser la recherche vers plus de partenariats transdisciplinaires et multi-acteurs.

Pour être opérationnelle, cette organisation de la recherche doit embrasser avec les mêmes efforts chacune des étapes clés de la réussite de l'amélioration des plantes : la création variétale, la préconisation et l'utilisation par le producteur.