

Variétés et systèmes de culture : quelle co-évolution ? Quelles implications pour l'agronomie et la génétique ?

Arnaud Gauffreteau, Gilles Charmet, Marie-Helene M.-H. Jeuffroy, Jacques Le Gouis, Jean-Marc Meynard, Bernard Rolland

▶ **To cite this version:**

Arnaud Gauffreteau, Gilles Charmet, Marie-Helene M.-H. Jeuffroy, Jacques Le Gouis, Jean-Marc Meynard, et al.. Variétés et systèmes de culture : quelle co-évolution ? Quelles implications pour l'agronomie et la génétique ?. Scéance Thématique de l'Association Français d'Agronomie, Mar 2013, Paris, France. hal-02739156

HAL Id: hal-02739156
https://hal.inrae.fr/hal-02739156

Submitted on 2 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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 ?

Association Française Agronomie

Agronomie, Environnement & Sociétés

Revue éditée par l'Association française d'agronomie (Afa)

Siège : 16 rue Claude Bernard, 75231 Paris Cedex 05.
Secrétariat : 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2.
Contact : douhairi@supagro.inra.fr, T : (00-33)4 99 61 26 42, F : (00-33)4 99 61 29 45
Site Internet : http://www.agronomie.asso.fr

Objectif
AE&S est une revue en ligne à comité de lecture et en accès libre destinée à alimenter les débats sur des thèmes clefs pour l'agriculture et l'agronomie, qui publie différents types d'articles (scientifiques sur des états des connaissances, des lieux, des études de cas, etc.) mais aussi des contributions plus en prise avec un contexte immédiat (débats, entretiens, témoignages, points de vue, controverses) ainsi que des actualités sur la discipline agronomique.

ISSN 1775-4240

Contenu sous licence *Creative commons*

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.

Directeur de la publication
Marc BENOÎT, président de l'Afa, Directeur de recherches, Inra

Rédacteur en chef
Olivier RÉCHAUCHÈRE, chargé d'études Direction de l'Expertise, Prospective & Etudes, Inra

Membres du bureau éditorial
Pierre-Yves LE GAL, chercheur Cirad
Hervé SAINT MACARY, directeur adjoint du département Persyst, Cirad
Philippe PRÉVOST, directeur Agreenium Université en ligne
Danielle LANQUETUIT, consultante Triog et webmaster Afa

Comité de rédaction
- Marc BENOÎT, directeur de recherches Inra
- Valentin BEAUVAL, agriculteur
- Jacques CANEILL, directeur de recherches Inra
- Joël COTTART, agriculteur
- Thierry DORÉ, professeur d'agronomie AgroParisTech
- Sarah FEUILLETTE, cheffe du Service Prévision Evaluation et Prospective Agence de l'Eau Seine-Normandie
- Yves FRANCOIS, agriculteur
- Jean-Jacques GAILLETON, inspecteur d'agronomie de l'enseignement technique agricole
- François KOCKMANN, chef du service agriculture-environnement Chambre d'agriculture 71
- Marie-Hélène JEUFFROY, directrice de recherche Inra et agricultrice
- Aude JOMIER, enseignante d'agronomie au lycée agricole de Montpellier
- Jean-Marie LARCHER, responsable du service Agronomie du groupe Axéréal
- François LAURENT, chef du service Conduites et Systèmes de Culture à Arvalis-Institut du végétal
- Francis MACARY, ingénieur de recherches Irstea
- Jean-Robert MORONVAL, enseignant d'agronomie au lycée agricole de Chambray, EPLEFPA de l'Eure
- Christine LECLERCQ, professeure d'agronomie Institut Lassalle-Beauvais
- Adeline MICHEL, Ingénieure du service agronomie du Centre d'économie rurale de la Manche
- Philippe POINTEREAU, directeur du pôle agro-environnement à Solagro
- Philippe PRÉVOST, directeur Agreenium Université en Ligne
- Hervé SAINT MACARY, directeur adjoint du Département Persyst, Cirad

Secrétaire de rédaction
Philippe PREVOST

Assistantes éditoriales
Sophie DOUHAIRIE et Danielle LANQUETUIT

Conditions d'abonnement
Les numéros d'AE&S sont principalement diffusés en ligne. La diffusion papier n'est réalisée qu'en direction des adhérents de l'Afa ayant acquitté un supplément
(voir conditions à http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/)

Périodicité
Semestrielle, numéros paraissant en juin et décembre

Archivage
Tous les numéros sont accessibles à l'adresse http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/

Soutien à la revue

- En adhérant à l'Afa via le site Internet de l'association (http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/). Les adhérents peuvent être invités pour la relecture d'articles.
- En informant votre entourage au sujet de la revue AE&S, en disséminant son URL auprès de vos collègues et étudiants.
- En contactant la bibliothèque de votre institution pour vous assurer que la revue AE&S y est connue.
- Si vous avez produit un texte intéressant traitant de l'agronomie, en le soumettant à la revue. En pensant aussi à la revue AE&S pour la publication d'un numéro spécial suite à une conférence agronomique dans laquelle vous êtes impliqué.

Instructions aux auteurs
Si vous êtes intéressé(e) par la soumission d'un manuscrit à la revue AE&S, les recommandations aux auteurs sont disponibles à l'adresse suivante :
http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/pour-les-auteurs/

À propos de l'Afa

L'Afa a été créée pour faire en sorte que se constitue en France une véritable communauté scientifique et technique autour de cette discipline, par-delà la diversité des métiers et appartenances professionnelles des agronomes ou personnes s'intéressant à l'agronomie. Pour l'Afa, le terme agronomie désigne une discipline scientifique et technologique dont le champ est bien délimité, comme l'illustre cette définition courante : « *Etude scientifique des relations entre les plantes cultivées, le milieu* [*envisagé sous ses aspects physiques, chimiques et biologiques*] *et les techniques agricoles* ». Ainsi considérée, l'agronomie est l'une des disciplines concourant à l'étude des questions en rapport avec l'agriculture (dont l'ensemble correspond à l'agronomie au sens large). Plus qu'une société savante, l'Afa veut être avant tout un carrefour interprofessionnel, lieu d'échanges et de débats. Elle se donne deux finalités principales : (i) développer le recours aux concepts, méthodes et techniques de l'agronomie pour appréhender et résoudre les problèmes d'alimentation, d'environnement et de développement durable, aux différentes échelles où ils se posent, de la parcelle à la planète ; (ii) contribuer à ce que l'agronomie évolue en prenant en compte les nouveaux enjeux sociétaux, en intégrant les acquis scientifiques et technologiques, et en s'adaptant à l'évolution des métiers d'agronomes.

Lisez et faites lire AE&S !

Sommaire

P7// **Avant-propos**
O. RÉCHAUCHÈRE (Rédacteur en chef) et M. BENOÎT (Président de l'Afa)

P9// **Édito**
M.H. JEUFFROY, D. BAZILE, V. BEAUVAL, X. PINOCHET et T. DORÉ (coordonnateurs du numéro)

P11// **Objectifs de production et variétés**
P13- Variétés et itinéraires techniques du blé : une évolution vers la diversification
A. GAUFFRETEAU (Inra), G. CHARMET (Inra), M.H JEUFFROY (Inra), J. LE GOUIS (Inra), J.M. MEYNARD (Inra), B. ROLLAND (Inra)
P23- Variétés et systèmes de culture de tomate : les apports conjoints de la génétique et de l'agronomie
F. LECOMPTE (Inra) et M. CAUSSE (Inra)
P35- Réflexions sur l'évolution des cépages et des modes de conduite de la vigne dans le saumurois
A. HILLAIRE (Vigneron)
P37- L'inscription au catalogue officiel : un outil évolutif au service d'une agriculture durable
F. MASSON (GEVES), C. LECLERC (GEVES)
P47- Etude préliminaire à la caractérisation du comportement des variétés de colza oléagineux d'hiver dans des itinéraires techniques particuliers sur la base du réseau CTPS existant
(Article dont la première publication a été faite dans la revue en ligne Innovations agronomiques, volume 35 / Mai 2014)
P. BAGOT (GEVES), F. SALVI (CETIOM), J. GOMBERT (GEVES)
P55- Quelle place de la génétique dans le futur avec la perspective d'augmenter la production et d'apporter une contribution positive à l'environnement : exemple des céréales
P. GATE (ARVALIS Institut du végétal)

P63// **Explorer la relation Génotype x Environnement**
P65- Conception d'idéotypes variétaux en réponse aux nouveaux contextes agricoles et environnementaux
P. DEBAEKE (Inra), A. GAUFFRETEAU (Inra), C.E. DUREL (Inra), M.H. JEUFFROY (Inra)
P75- De l'interaction G x E aux interactions G x Y x L x C x R x D x S x A : une approche participative et pluridisciplinaire
D. DESCLAUX (Inra), Y. CHIFFOLEAU (Inra), J.M. NOLOT (Inra)
P85- Effets de la latitude sur l'expression du photopériodisme du mil et du sorgho : validation des cartes d'adaptation variétale au Mali
A. FOUNÉ (Icrisat, Mali), M. SAKO (Cirad), M. VAKSMANN (Université Paris 8), M. KOURESSY (IER, Mali)

P95// **Quelles perspectives offre la prise en compte des aspects spatio-temporels de la diversité génétique ?**
P97- Variétés et systèmes de culture : élargissement des échelles spatiales, quelques exemples pour les espèces oléagineuses
X. PINOCHET (CETIOM)
P103- Associer des variétés pour la production et maîtriser les maladies
T. VIDAL (Inra), C. GIGOT(AgroParisTech), M. BELHAJ FRAJ (ICBA, Dubaï), M. LECONTE (Inra), L. HUBER (Inra), S. SAINT-JEAN(AgroParisTech), C. DE VLLAVIEILLE-POPE (Inra)
P113- Le mélange de variétés en blé : une pratique devenant plus fréquente
E. DENIS (CIVAM Sarthe)
P115- Impact de la diffusion d'une variété améliorée de sorgho au Mali : interaction avec les variétés locales
M. KOURESSY, S. SISSOKO, N. TÉMÉ, M. DEU, M. VAKSMANN, Y. CAMARA D. BAZILE, A. F.M. SAKO, A. SIDIBÉ

P125// **Quel potentiel de modèles alternatifs d'amélioration des plantes ?**
P127- Questions induites par la diffusion des variétés de tournesol tolérantes à des herbicides de la famille des inhibiteurs de l'ALS
V. BEAUVAL (Agriculteur)
P135- Les variétés de soja tolérantes aux herbicides, moteur de la spécialisation agricole dans la région pampéenne argentine
C. SALEMBIER (Inra), S. GROSSO (UNL, Argentine), J.M. MEYNARD (Inra)
P143- Inscription d'une variété de sorgho obtenue par sélection participative au Mali dans des projets multi-acteurs
T. LEROY (Cirad), O. COUMARE (AOPP – Mali), M. KOURESSY (IER – Mali), G. TROUCHE (Cirad), A. SIDIBE (IER – Mali), S. SISSOKO (IER – Mali), A. TOURÉ (IER – Mali), T. GUINDO (COAP – Mali), B. SOGOBA (AMEDD – Mali), F. DEMBELÉ (GRAADECOM – Mali), B. DAKOUO (UACT – Mali), M. VAKSMANN (Cirad), H. COULIBALY (IER – Mali), D. BAZILE (Cirad), D. DESSAUW (Cirad)
P153- Mise en œuvre de nouvelles stratégies de sélection du sorgho pour les régions marginales et à forte contrainte climatique du Mali
A. BOUBACAR (IER – Mali), A. DAOU (Icrisat – Mali), E. WELTZIEN (Icrisat – Mali), B. DAKOUO (UACT – Mali), B. SOGOBA (AMEDD –

Mali), O. NIANGALY (IPR/IFRA – Mali), S.B. COULIBALY (IER – Mali), H. Moussa MAIGA (USTT – Mali), B. KONÉ (UACT– Mali), H. MAIGA (AMEDD – Mali), G. TROUCHE (Cirad), K. VOM BROCKE (Cirad)
P165- Mobiliser la diversité génétique pour un choix variétal plus large ; blocages et opportunités en agronomie et en génétique
C. BILLOT (Cirad), C. LECLERC (Cirad), S. LOUAFI (Cirad), A. BARNAUD (Ird), X. PERRIER (Cirad)

P169// **Annexe**
P171- Appel à contribution du numéro

P173// **Note de lecture**
P175- La palme des controverses – Palmier à huile et enjeux de développement (A. Rival et P. Lelang, Editions QUAE, 2013)
T. DORÉ (AgroParisTech)

P177// **Texte hors thématique du numéro**
P179- Les « carnets de plaine » des agriculteurs : une source d'information sur l'usage des pesticides à l'échelle de bassins versants
C. SCHOTT (Inra), F. BARATAUD (inra), C. MIGNOLET (Inra)

Agronomie Environnement & Sociétés //volume 4 numéro 2 - décembre 2014

Variétés et itinéraires techniques du blé : une évolution vers la diversification

Arnaud GAUFFRETEAU[1] - Gilles CHARMET[2]
Marie-Hélène JEUFFROY[1]
Jacques LE GOUIS[2] - Jean-Marc MEYNARD[3]
Bernard ROLLAND[4]

[1]INRA - UMR Agronomie - INRA/AgroParisTech - Bâtiment EGER - 78850 - Thiverval-Grignon - E-mail : gauffret@grignon.inra.fr - jeuffroy@grignon.inra.fr
[2]INRA - UMR GDEC - 5 chemin de Beaulieu - 63039 Clermont-Ferrand Cedex 2 - E-mail : gilles.charmet@clermont.inra - jlegouis@clermont.inra.fr
[3]INRA - UMR SADAPT - Bâtiment EGER - 78850 Thiverval-Grignon E-mail : meynard@grignon.inra.fr
[4]INRA - UMR IGEPP - Domaine de la Motte - B.P. 35327 - 35653 - Le Rheu Cedex - E-mail : bernard.rolland@rennes.inra.fr

Résumé
Le blé tendre d'hiver est aujourd'hui la céréale la plus cultivée en France. Ce constat n'est pas sans lien avec les progrès importants qui ont eu lieu dans les soixante dernières années, aussi bien en ce qui concerne les techniques culturales que le progrès génétique. Concernant les premiers, après une période propice à l'intensification, dans la seconde moitié du XXème siècle, dans le but d'accroître la production de la culture, de nouveaux enjeux sont apparus. Ils visent à réduire les impacts environnementaux de la culture, à améliorer la qualité technologique (qui s'était dégradée du fait de la primauté du rendement maximum), et à utiliser les intrants de manière parcimonieuse, ainsi que les ressources fossiles qui se raréfient.
La sélection a été partie prenante des évolutions depuis l'après-guerre. Dans la seconde moitié du XXème siècle, on a d'abord observé un progrès très important dans les rendements. Puis, face à une dégradation de la qualité globale de la récolte française, notamment la concentration en protéines des grains, et face aux nouveaux enjeux de la production (rappelés ci-dessus), de nouveaux critères ont été davantage pris en compte, comme la résistance aux maladies d'abord, puis la qualité, avec des résultats sensibles sur les caractéristiques des variétés inscrites. Ces nouvelles caractéristiques ne sont toutefois pas toujours très bien valorisées au niveau de la production. Par ailleurs, les travaux sur la sélection de variétés économes en azote n'en sont qu'à leurs débuts et on peut s'attendre à des progrès significatifs dans les années qui viennent. Enfin, on a vu apparaître ces dix dernières années, des propositions intéressantes de variétés spécifiquement adaptées aux conditions d'agriculture biologique, en particulier panifiables même pour des grains à basses teneurs en protéines.
En vue d'optimiser l'efficience d'utilisation des ressources, il apparaît de plus en plus nécessaire de mieux adapter le choix des variétés cultivées, et donc leur sélection, à la diversité des situations de production, valorisant ainsi les interactions Génotype-Environnement-Conduite, souvent fortes dans les essais. Dans cet objectif, il apparaît nécessaire de compléter la caractérisation des variétés, en particulier sur leur aptitude à réagir face à des facteurs limitants attendus dans les systèmes moins artificialisés par un usage plus économe des intrants. Cette caractérisation variétale doit s'appuyer sur une caractérisation environnementale précise et rigoureuse des milieux de sélection et d'évaluation variétale. Elle peut également bénéficier de l'usage de modèles dynamiques de culture, qui permettent d'alléger les suivis sur le terrain, sans toutefois les remplacer totalement.
En revanche, malgré une demande croissante, mais imprécise, concernant la qualité nutritionnelle (taux de gluten moindre, richesse et équilibre entre acides aminés des grains notamment), ce critère n'a été que rarement pris en compte en sélection, jusqu'ici.
En perspective, face au développement attendu de systèmes de culture plus agroécologiques, moins consommateurs en intrants, on s'interrogera sur les types variétaux à sélectionner pour ces systèmes et les méthodes de conception qui peuvent aider à les définir.

Mots clés
Variétés, systèmes de culture, interaction Génotype x Environnement.

Abstract
Winter wheat is currently the most widely cultivated cereal in France. This finding is due to the significant progress that has occurred in the last 60 years in both the cropping techniques and the genetic. After a dramatic intensification of agriculture in the second half of the twentieth century aiming at increasing crop production, new challenges have emerged. They consist in reducing the environmental impacts of crops, improving their quality and using more sparingly the inputs and fossil resources.
Plant breeding has contributed to those postwar evolutions of agriculture. Therefore, selection has first led to a very significant increase of the varietal yield in the second half of the twentieth century. Then, face to a deterioration of the overall quality of the French harvest, including grain protein content, and face to new challenges of production (mentioned above), new criteria were taken into account in selection, such as disease resistance and quality with significant impacts on the characteristics of the registered varieties. However, these new features of varieties are not always used at the production level. In addition, studies for selecting varieties consuming less nitrogen are just beginning and we can expect significant progress in the coming years. Finally, over the past decade, some interesting varieties have emerged specifically adapted to the conditions of organic farming and able to make bread at low protein content.
In order to optimize the efficiency of resource use, it is becoming increasingly necessary to better adapt the choice of varieties, and therefore their selection, to the diversity of production conditions. For this purpose, it is necessary to complete the characterization of varieties, especially their tolerance to limiting factors expected in cropping systems using less input. It entails to analyze the Genotype x Environment x Management practices interactions often important in the cultivar trials and to describe precisely the cropping environments by using measurements and crop models.
Finally, as the agroecological systems using less input are expected to develop in the coming year, the varietal ideotypes adapted to those systems and the method to design them will be discussed.

Keywords
Variety, cropping system, genotype by environment interaction.

Évolution des itinéraires techniques du blé

Après la 2nde guerre mondiale, l'objectif de l'agriculture française était prioritairement l'accroissement de la production afin de garantir l'autonomie alimentaire du pays. Celui-ci a largement été atteint grâce à la mise au point et à l'utilisation massive d'intrants. C'est ainsi que, dans les années 1960-70, on a vu croître très rapidement le nombre d'homologations de produits phytosanitaires, permettant progressivement

une maîtrise de plus en plus grande des facteurs limitant la production (régulateurs de croissance, insecticides, fongicides, herbicides de pré et post-levée). À cette période, ces produits sont devenus un nouveau moyen de maîtrise de la production, rapidement adopté par les agriculteurs largement accompagnés par l'ensemble du dispositif de R&D. Sont alors apparues des stratégies d'application systématique à vocation sécuritaire, permettant de réduire la vigilance sur les résistances aux maladies et à la verse. De même, bien que l'amélioration du raisonnement de la fertilisation azotée (fractionnement - Coïc, 1956 ; méthode des bilans - Hébert, 1969) permette de maîtriser l'alimentation azotée des cultures, les excès d'azote n'étant plus pénalisés, grâce aux progrès dans la prévention de la verse (variétés courtes, régulateur de croissance), la fertilisation a explicitement visé une alimentation azotée non limitante souvent excédentaire, et la sélection n'a pas cherché à favoriser des variétés plus tolérantes à des nutritions azotées sub-optimales, ce qui s'est traduit par un progrès génétique plus lent à faible niveau d'azote (Le Gouis, 2011).

Vers la fin des années 1970, on a assisté à une intensification de la production et à une spécialisation des systèmes agricoles, permis par ces progrès techniques. Le rendement visé est alors le potentiel permis par le sol et le climat local : on cherche à maximiser l'interception de l'énergie lumineuse par des semis précoces, des densités élevées, une alimentation azotée non limitante pendant tout le cycle cultural. Ces trois caractéristiques de la conduite favorisent les maladies cryptogamiques, les adventices et les pucerons, et exigent une protection phytosanitaire soutenue et préventive. Elles augmentent également le risque de verse, systématisant le recours aux régulateurs de croissance, malgré l'utilisation de variétés sélectionnées courtes[1]. Les produits systémiques et les stratégies de protection préventive se développent rapidement, conduisant à une expansion massive des stratégies d'application systématique. Les traitements phytosanitaires deviennent la clé de voûte des systèmes de culture dominants, permettant de choisir des variétés avant tout sur des critères de productivité en grains (Meynard et Girardin, 1991).

Ces évolutions dans les facteurs de maîtrise de la production, en parallèle de progrès importants dans la sélection (voir partie II), se traduisent par une augmentation spectaculaire du rendement du blé en France : on passe de 25 q/ha en moyenne en 1960 à 65 q/ha en 1990, avec un gain moyen de plus de 1.26 q/ha/an (Brancourt-Hulmel et *al*., 2003). Depuis le milieu des années 1990, en revanche, cette progression du rendement moyen national est fortement ralentie (Brisson et *al*., 2010).

La maîtrise croissante de l'usage des produits phytosanitaires par les agriculteurs leur permet également de simplifier leurs successions de cultures (Mignolet et *al.*, 2012) : le raccourcissement des rotations accroit les populations d'adventices liées aux cultures dominantes de la rotation (ex. vulpin) et le risque de développement de maladies cryptogamiques (piétin-échaudage, piétin-verse) qui se conservent dans le sol ; l'homogénéisation des mosaïques paysagères favorise l'accroissement des populations de parasites aériens, et donc l'usage des pesticides (Schott et *al.*, 2010) et, combinée à une réduction des éléments semi-naturels des paysages (haies, bosquets) et à une augmentation de la taille des parcelles, tend à réduire les populations d'auxiliaires.

À partir des années 1990, la prise de conscience des impacts environnementaux négatifs de la production intensive se généralise : pollution des nappes phréatiques par les nitrates et les pesticides, pollution de l'air par les pesticides et les gaz à effet de serre, réduction de la biodiversité, attestant de la responsabilité de l'agriculture dans ces effets (MEA 2005). Se développent alors des outils d'aide à la décision, permettant de mieux raisonner les applications d'engrais et de pesticides, pour les rendre moins systématiques et les adapter à la situation agricole, ce qui aurait pu faire baisser les consommations. Mais, dans le même temps, le processus de spécialisation des systèmes agricoles s'est poursuivi. Par exemple en 2009, 17% des blés français sont cultivés derrière un blé et 8% des surfaces assolées sont en monoculture (Fuzeau et *al*., 2012), ce qui accroît la dépendance aux engrais azotés (réduction massive des surfaces de légumineuses à graines et fourragères) et aux produits phytosanitaires (raccourcissement des rotations). Ceci compensant cela, l'usage des produits phytosanitaires et des engrais azotés tend à se stabiliser, mais ne diminue pas.

Dans ces années 1990, des modes de production alternatifs sont étudiés et se développent chez des agriculteurs pionniers : variétés résistantes, associations variétales (de Vallavieille-Pope et al., 2004), associations d'espèces (Hauggaard-Nielsen & Jensen, 2001), successions diversifiées, itinéraires techniques à bas niveau d'intrants (Meynard, 1991, Loyce et *al*., 2012), aménagements paysagers pour la lutte biologique par conservation,... Cependant, ces alternatives techniques font l'objet d'une faible diffusion vers les agriculteurs (Meynard et *al*., 2010), beaucoup moins importante que les outils d'aide à la décision visant à améliorer le raisonnement des traitements phytosanitaires (Figure 1). Une des raisons est la difficile compatibilité de ces pratiques alternatives avec les exigences des filières qui se sont construites autour du paradigme des cultures 'intensives' : face au risque d'associations variétales composées de variétés non adaptées aux débouchés, les associations variétales de blé sont boudées par les meuniers qui préfèrent travailler des lots de variétés pures ou de mélanges constitués par les collecteurs de variétés qu'ils ont eux-mêmes choisies, et par les collecteurs, qui répercutent les exigences des meuniers ; les conduites à bas niveau d'intrants buttent sur une réticence des collecteurs qui craignent une réduction des volumes de collecte affectant leur compétitivité économique (Meynard et *al*, 2010); l'allongement des rotations se heurte à une absence de débouchés des espèces de diversification (Meynard *et al*., 2013).

Entre les années 1985 et 2000, la baisse tendancielle de la teneur en protéines moyenne de la récolte de blés français, avec la valeur la plus faible jamais obtenue en France (autour de 10,7%) en 1998 (Jeuffroy et Oury, 2012), a conduit la filière à réagir, en agissant simultanément au niveau de la sélection et au niveau de la conduite de la culture. Concernant cette dernière, on observe un accroissement de la fréquences des apports d'engrais azoté « tardifs », favorable à l'augmentation de la teneur des grains en protéines : la proportion des parcelles dont la fertilisation azotée est frac-

[1] (entre 1980 et 2000, la proportion des variétés françaises inscrites contenant des gènes de nanisme est passée de 0 à 90% ; Trottet et Doussinault, 2002)

tionnée en 3 apports est passée de 26% en 1994 à 70% en 2001 puis 65% en 2011 (résultats issus des enquêtes « Pratiques culturales » 1994, 2001 et 2011 du Service de la Statistique et de la Prospective du Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche, de la ruralité et de l'aménagement du territoire). Mais on ne connaît pas les conséquences de cette évolution sur la qualité nutritionnelle des grains. Aujourd'hui, des stratégies de fertilisation azotée innovantes (suppression du 1er apport sortie hiver, modification des doses entre les 2ème et 3ème apports) ont montré expérimentalement la possibilité de favoriser la teneur en protéines des grains, sans affecter le rendement et en réduisant les pertes vers l'environnement (Jeuffroy et Oury, 2012 ; Jeuffroy et *al*., 2013). De même, des innovations techniques de rupture (associations variétales, associations d'espèces) favorisent ce critère de qualité.

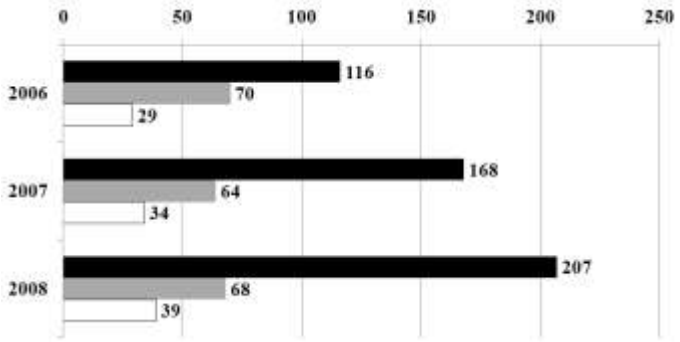


Figure 1 : Fréquence des articles de la presse agricole visant à promouvoir la réduction des pesticides par des outils d'aide au positionnement des traitements en noir ; par la substitution d'autres intrants (semences, énergie…), en gris ; ou par la reconception des systèmes de culture, en blanc (d'après Meynard et al., 2010)

Une évolution des cibles en amélioration variétale

La sélection variétale a, elle-aussi, été marquée par des évolutions spécifiques depuis l'après-guerre. Dans la seconde moitié du XXème siècle, les rendements ont augmenté en moyenne en France de 1.26 q ha^{-1} an^{-1}. Classiquement, on estime qu'environ la moitié de cette augmentation est due à l'amélioration variétale et l'autre moitié à l'amélioration des techniques culturales. En effet, sur la période (1946-1992), Brancourt-Hulmel et al. (2003) ont estimé le progrès génétique moyen à 0.49 q ha^{-1} an^{-1}. Comme nous l'avons signalé dans la première partie, cette augmentation de rendement s'est traduite par une diminution de la concentration en protéines du grain avec des répercussions possibles sur la qualité d'utilisation et les possibilités d'exportation. Par exemple, la force boulangère, qui avait fortement progressé depuis les années 1970 grâce à la sélection (voir ci-dessous), tend de nouveau à régresser avec la baisse de la teneur en protéines.

Face à cette variabilité de la qualité boulangère de la récolte française, et face aux nouveaux enjeux de la production, de nouveaux critères d'inscription, et donc de sélection, ont été davantage pris en compte. Dans les années 1980, le règlement technique a aussi évolué pour permettre une segmentation plus marquée de la qualité et les classes : blés panifiables supérieurs (BPS), blés panifiables courant (BPC) et blés pour d'autres usages (BAU) ont été introduites. On a assisté à une forte orientation de la sélection et de la production vers les BPS, qui représentaient moins de la moitié des surfaces à la fin des années 1990, pour atteindre 80% en 2008 et se stabiliser autour de 70% maintenant (FranceAgrimer, 2013). Pour renverser la baisse de la concentration en protéines, il a été proposé d'introduire un nouveau critère en 2006 (Oury et Godin, 2007). Celui-ci est issu de l'observation, depuis très longtemps, d'une corrélation négative entre le rendement en grains et la concentration en protéines, quand différentes variétés sont comparées dans les mêmes conditions. En moyenne, une augmentation de rendement de 10 q ha^{-1} se traduit par une baisse de la concentration en protéines de 1 point. Il a été proposé d'utiliser l'écart à cette relation négative (aussi nommé GPD pour « Grain Protein Deviation ») pour identifier les variétés plus riches en protéines, pour un niveau de rendement donné. Ainsi les variétés s'écartant positivement de cette relation obtiennent un bonus simple ou double à l'inscription, selon le niveau de leur écart à la régression moyenne. Depuis l'application de cette règle, une vingtaine de variétés ont profité de cette bonification. Enfin, plus récemment, deux variétés ont été inscrites en 2011 après une expérimentation VAT spéciale en conditions d'agriculture biologique. Ces deux variétés BPS se caractérisent par un maintien de la qualité en panification dans les situations d'agriculture biologique qui sont souvent caractérisées par des carences en azote durant une partie du cycle. Les lignées dont sont issues les variétés n'ont pas été spécifiquement sélectionnées dès le départ dans des conditions d'agriculture biologique mais elles proviennent du schéma de sélection INRA à bas niveau d'intrants dans lequel la densité de semis est réduite, les traitements fongicides et raccourcisseurs sont supprimés, et la quantité d'engrais azoté appliqué est significativement réduite.

La résistance aux principales maladies fongiques a été, depuis très longtemps, considérée comme un critère important de sélection. Lors de l'inscription, les essais servant à l'estimation du rendement sont conduits selon deux modalités, traitées et non traitées avec des fongicides, depuis le milieu des années 1980. Des bonifications et pénalités selon l'écart entre les rendements mesurés aux deux modalités ont été instaurées en 1990 et renforcés en 1994 (Boulineau et Leclerc, 2013). Cela s'est traduit par des résultats sensibles sur l'accroissement du niveau de résistance des variétés inscrites.

Ces nouvelles caractéristiques, particulièrement les résistances aux maladies, ne sont toutefois pas toujours très bien valorisées au niveau des conseils aux agriculteurs qui privilégient encore trop souvent une stratégie d'assurance par une couverture fongicide totale. La diffusion des variétés « rustiques » (Figure 2), multirésistantes aux maladies et à la verse et productives, est très dépendante du prix du blé et du verrouillage lié au conseil technique dominant (Butault et *al.*, 2010).

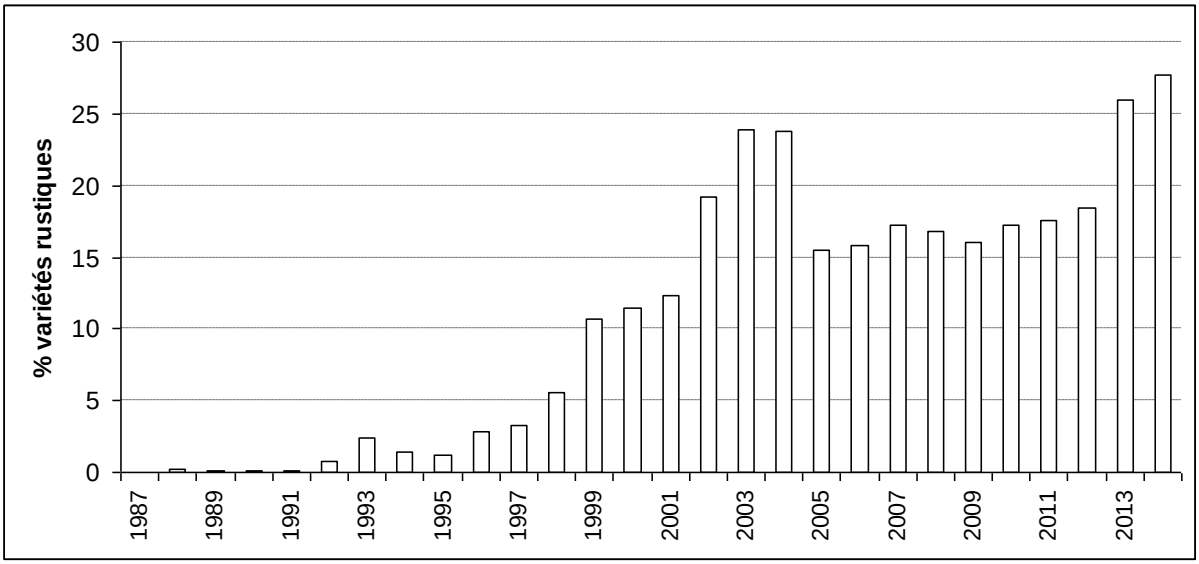


Figure 2 : Part estimée des variétés « rustiques » dans la multiplication de semences certifiées de blé tendre d'hiver en France

Les travaux sur la sélection de variétés économes en azote n'en sont qu'à leurs débuts. La fertilisation azotée est très consommatrice d'énergie (pour la production, le transport et l'application des engrais azotés). Elle est aussi à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre. Enfin le prix de cet intrant a tendance, sur le moyen terme, à fortement augmenter en suivant les cours du gaz naturel. Il est donc nécessaire d'augmenter l'efficacité d'utilisation de l'azote qui est d'environ 25 kg de grain produits par ha et par kg d'azote disponible (Le Gouis, 2012). Des études ont montré l'existence d'une variabilité génétique pour l'efficacité d'absorption de l'azote et pour l'efficacité de sa conversion en grains. Mais cette variabilité a, jusqu'à présent, été peu exploitée du fait de la difficulté à bien quantifier ces différences et au coût élevé des expérimentations nécessaires pour les estimer. En effet, l'idéal est de pouvoir comparer les variétés à leur optimum de rendement, ce qui nécessite de tester plusieurs niveaux de fertilisation azotée pour avoir une gamme allant de situations limitantes en azote à des situations non limitantes. Néanmoins, le Comité Technique Permanent de la Sélection (CTPS) a lancé en 2013 une première série d'expérimentations destinées à tester les lignées en cours d'inscription à trois niveaux de fertilisation afin de juger de leur efficacité d'utilisation de l'azote. Les premiers résultats, qui seront complétés par une deuxième année d'expérimentation, sont en cours d'analyse pour valider la méthode et commencer à identifier des paramètres pertinents pour classer les variétés. Si un critère déterminant est identifié, celui-ci pourra être pris en compte dans les programmes de sélection, au moins dans la caractérisation des générations avancées et on pourra s'attendre à des progrès significatifs dans les années suivantes.

Les deux premières variétés, inscrites au catalogue officiel des variétés en 2012 après une expérimentation spéciale en agriculture biologique, se caractérisent par un rendement amélioré et par un fort GPD positif. À rendement supérieur de 10% au témoin Renan en AB, elles maintiennent ainsi un taux de protéines et une qualité boulangère satisfaisants, caractéristiques importantes car les systèmes de culture en AB sont très souvent fortement limitants en azote (Rolland et al. 2012). Dans les cinq prochaines années seront proposées à l'inscription des lignées spécifiquement adaptées aux conditions d'agriculture biologique, en particulier compétitives vis-à-vis des adventices.

Parallèlement à des approches fondées sur la sélection au sein de la variabilité naturelle, des solutions de rupture à plus long terme sont explorées. C'est par exemple le cas d'une éventuelle possibilité de transférer chez le blé la capacité à fixer l'azote de l'air (Cullimore et *al.*, 2013) comme chez certaines légumineuses. Dans ce système, la fixation de l'azote serait réalisée par une bactérie de type rhizobium qui est abritée dans un nodule racinaire et qui utilise une partie des sucres produits par la plante. Ces approches ont été relancées, car il a été montré que la symbiose chez les protéagineux repose sur la reconnaissance d'un signal bactérien (facteur Nod) qui est similaire au signal des symbioses micorhiziennes (facteur Myc) présentes chez les céréales. L'interaction entre céréales et bactéries fixatrices d'N serait donc envisageable même si de nombreuses et difficiles étapes restent à franchir et si on peut attendre une diminution de rendement due à un surcoût énergétique pour la plante. Ces approches génétiques devront être développées en synergie avec des approches agronomiques complémentaires, pour limiter les pertes d'azote du sol (plantes de couverture hivernale, gestion du travail du sol…) et enrichir le sol en azote (augmentation des protéagineux dans les rotations, association pois-blé…). Car à elle seule, l'approche génétique qui vise à favoriser la fixation d'N atmosphérique par le blé tendre aurait sans nul doute pour conséquence d'accroitre les surfaces cultivées en blé par rapport à d'autres cultures, et donc d'accroître les impacts environnementaux négatifs des systèmes de monoculture !

Analyse et valorisation des interactions Génotype x Environnement x Conduite (IGEC)

L'évolution des conditions climatiques et la diversification des modalités de la production agricole, et notamment le raccourcissement des successions d'une part, et la réduction des intrants d'autre part, génèrent des conditions de cultures de plus en plus hétérogènes. Ce nouveau cadre de production implique de disposer de variétés qui soient (i)

diversifiées et adaptées au large éventail des conditions biotiques et pédoclimatiques rencontrées en France, (ii) suffisamment caractérisées pour permettre à l'agriculteur d'opérer un choix optimal parmi le matériel disponible, au regard de ses objectifs et de ses contraintes techniques et environnementales. Les variétés de blé tendre sont actuellement caractérisées par leur rendement, leur qualité technologique, leur précocité, leur résistance aux maladies, à la verse et au gel. Cette caractérisation est partielle, elle devrait notamment être complétée par des résistances aux stress hydriques et azotés plus fréquents dans des conduites moins consommatrices en azote et en eau.

La sélection des variétés et leur caractérisation repose sur des réseaux d'essais variétaux (réseaux des obtenteurs, réseau d'inscription géré par le GEVES, réseaux de post-inscription gérés par les instituts techniques, les coopératives, les Chambres d'agriculture…). Ces réseaux cherchent à évaluer la valeur agronomique des variétés dans une gamme d'environnements cibles. Ils sont constitués par plusieurs campagnes, plusieurs sites d'expérimentation et plusieurs conduites culturales. Chaque année, des centaines d'essais variétaux sont conduits, ce qui représente un investissement considérable. Nous ferons dans cette partie un inventaire non exhaustif des analyses possibles pour valoriser les données issues de ces réseaux d'essais, certaines étant déjà largement pratiquées, d'autres beaucoup moins. Nous nous attacherons à décrire les informations nécessaires à la réalisation de ces analyses et la façon dont ces analyses peuvent orienter la sélection et enrichir le conseil.

Nous illustrerons notre propos sur un jeu de données INRA présentant les rendements de 9 variétés testées dans 27 environnements, combinaisons de 2 années (2001 et 2002), 7 sites (CL : Clermont-Ferrand – 63, DI : Dijon – 21, LI : Lille – 59, LM : Le Moulon – 91, MO : Estrées-Mons – 80, RE : Rennes – 35 et TO : Toulouse – 31) et 3 conduites culturales (in = intensive, nr = fertilisation azotée réduite et nt = non traité aux fongicides).

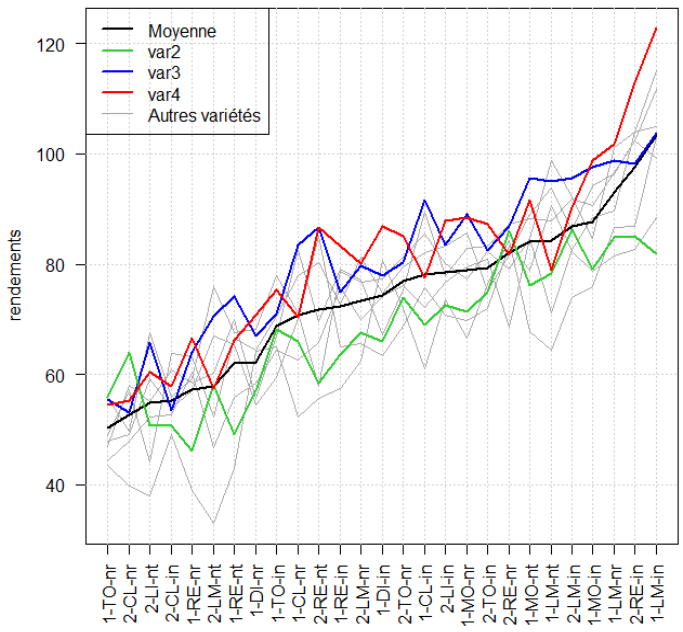


Figure 3 : Rendements observés sur 9 variétés et 27 environnements

Les variétés testées dans les réseaux d'essais sont évaluées en premier lieu sur leur performance moyenne. Cette information est à la base de l'évaluation traditionnelle des variétés et de leur inscription au catalogue national. Résumer la valeur agronomique des variétés par leurs performances moyennes revient à penser que la réponse des variétés aux différents environnements d'un réseau d'essais est identique. Or ces réponses diffèrent d'une variété à l'autre et peuvent conduire à des inversions de classements variétaux entre environnements visibles sur la figure 3. Lorsque ces inversions sont statistiquement significatives (c'est le cas dans notre exemple), elles révèlent des interactions entre variétés et environnements importantes au sein du réseau d'essais.

Il est commode d'exprimer la performance Y d'une variété i dans un environnement j (combinaison d'une année, d'un site et d'une conduite) et une répétition k de la façon suivante :

$$Yijk = \mu + Vi + Ej + VxEij + \varepsilon ijk \quad [1]$$

où $\mu + Vi$ est la performance moyenne de la variété i, Ej est la réponse moyenne des variétés à l'environnement j et VxEij est l'interaction entre la variété i et l'environnement j. Cette interaction mesure l'écart entre la réponse moyenne des variétés à l'environnement j et la réponse particulière de la variété i à ce même environnement.

Le niveau d'interaction d'une variété peut être mesuré par la somme de ses termes d'interaction élevés au carré, c'est son écovalence (Wricke, 1962). Les variétés de faible écovalence sont peu interactives. Elles sont qualifiées de stables selon le concept de stabilité dynamique (Becker et Léon, 1988) car l'écart entre leur performance et la performance moyenne des variétés testées (Vi + VxEij) varie peu d'un environnement à l'autre dans le réseau d'essais. Les obtenteurs qui cherchent à sélectionner des variétés performantes sur une gamme d'environnements la plus large possible, tendent à privilégier les variétés généralistes à la fois performantes (Vi élevé) et peu interactives. Dans notre exemple, c'est le cas de la variété 3 qui présente la meilleure performance moyenne et la plus faible écovalence (table 1). La performance de cette variété est significativement supérieure à la moyenne dans 20 des 27 environnements étudiés et n'est jamais significativement inférieure à la moyenne. Pour une même performance moyenne, une variété interactive présente un plus grand risque de défaillance dans un environnement particulier qu'une variété peu interactive. Par exemple, la variété 4 qui présente la même performance moyenne que la variété 3 mais une écovalence plus forte (table 1), présente une performance significativement inférieure à la moyenne sur l'environnement 1-LM-nt (figure 3). Ce type de défaillance peut entraver le développement économique d'une variété.

Cependant, ne pas tenir compte des interactions s'exprimant dans les réseaux d'essais variétaux, ou chercher à les minimiser au cours des étapes de sélection et d'inscription, peut conduire à rejeter des variétés bien adaptées à des environnements particuliers, mais présentant des interactions fortes et une performance moyenne qui peut être inférieure à celle des témoins. C'est le cas par exemple de la variété 2 qui, malgré une très faible performance moyenne et une écovalence parmi les plus fortes (table 1),

présente un rendement significativement supérieur à la moyenne dans l'environnement 1-TO-nr et significativement supérieur à celui de toutes les autres variétés dans l'environnement 2-CL-nr, ces deux environnements étant les moins productifs du réseau (figure 3). De manière générale, on peut se demander si la stratégie de sélection actuelle à la recherche de variétés « passe partout » qui avait tout son sens dans le cas d'une agriculture intensive où l'hétérogénéité des conditions de culture était largement régulée par l'utilisation des intrants en préventif est encore valable dans un contexte de réduction des intrants tendant à la diversification des environnements de culture. C'est d'ailleurs en réaction à cette sélection centralisée orientant vers des variétés généralistes qu'est proposée la sélection participative avec l'objectif de disposer de variétés qui seraient mieux adaptées aux situations de production locales et aux attentes particulières de collectifs d'agriculteurs (Desclaux et *al*., 2008). Notons que si la sélection de variétés adaptées à des contextes de productions particuliers apparait nécessaire dans un contexte de diversification des pratiques agricoles, ces variétés doivent être suffisamment stables pour tolérer les variations interannuelles des conditions de culture dues notamment aux aléas climatique et totalement imprédictibles avant semis.

Variétés	Moy	Eco
Var1	77.1	595
Var2	68.2	1092
Var3	80.6	574
Var4	80.6	819
Var5	78.0	1065
Var6	63.5	1591
Var7	69.9	1276
Var8	76.3	584
Var9	70.8	618

Table 1 : Performance moyenne (Moy en q/ha) et écovalences (Eco en q^2/ha^2) des variétés sur le réseau d'essais

Au cours des phases de post-inscription, les acteurs en charge du développement des variétés et du conseil aux utilisateurs cherchent à établir les spécificités adaptatives des variétés pour affiner leur positionnement dans les grandes zones de culture du blé. Par une analyse descriptive de la matrice d'interactions génotype x environnement (IGE) (figure 4), ils établissent les environnements de prédilection de chaque variété. Ils identifient ainsi, en plus des variétés généralistes peu interactives et adaptées à une large gamme d'environnements (variétés présentant des cercles de faibles rayons sur la figure 4), des variétés plus spécialisées adaptées à des environnements particuliers et présentant pour ces environnements des interactions VxEij positives (cercles noirs). Dans le cas de réseaux d'essais présentant un grand nombre d'environnements et de variétés, la matrice d'interactions est difficile à analyser directement. Il peut être utile de résumer son information par une analyse en composante principale préalable, ce que proposent les méthodes AMMI (Gauch, 1992) ou GGE biplot (Yan, 2001).

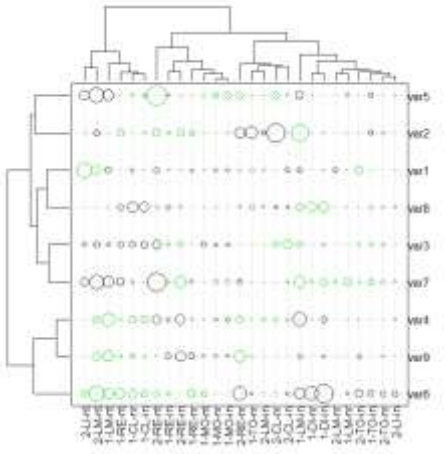


Figure 4 : Matrice d'interactions : les interactions positives sont en noir, les négatives en vert et le rayon du cercle est proportionnel à la valeur absolue de l'interaction. Les variétés et les environnements sont regroupés selon la proximité de leurs profils d'interactions

Les analyses descriptives précédemment décrites sont contingentes des réseaux d'essais sur lesquelles elles sont pratiquées. Elles ne permettent pas d'interpréter biologiquement les réponses variétales aux différents environnements et de prévoir les performances des variétés testées dans des environnements non expérimentés pour définir les contours de leurs potentiels adaptatifs. Pour pallier ce problème, Denis (1980, 1988) propose de décrire les environnements d'essais par des covariables environnementales et d'exprimer la réponse des variétés à chacun des environnements d'essais (Ej + VxEij dans [1]) comme la somme des réponses variétales à chacune des covariables environnementales. Pour des raisons pratiques, nous pouvons décrire la réponse des variétés à une covariable environnementale cov^k comme la somme d'une réponse moyenne à cette covariable sur l'ensemble des variétés α^k et d'un écart à cette réponse moyenne pour chaque variété i β^k_i ($Ej+VxEij = \Sigma_k[(\alpha^k+\beta^k_i).cov^k_j]$). Plus tôt, Finlay et Wilkinson (1963) avaient déjà proposé de décrire chaque environnement d'un réseau d'essais par sa productivité moyenne sur l'ensemble des variétés ($covj = \mu + Ej$) et d'estimer la réponse des variétés à la productivité des environnements d'essais (modèle de régression conjointe). Ce type d'analyse très utilisé en sélection, permet de repérer les variétés valorisant mieux les environnements productifs ($\beta^k_i > 0$) ou au contraire capables de maintenir leur niveau de performance dans des milieux plus stressants ($\beta^k_i < 0$). Cependant, la part de l'interaction VxE expliquée par cette covariable est généralement faible (de l'ordre de 25% selon Brancourt et *al,* 1997). Dans notre exemple, elle n'explique que 11.4% de l'interaction VxE et seules 4 variétés présentent des paramètres β^k significativement différents de 0. Ceci s'explique par le fait que deux milieux de productivité équivalente peuvent présenter des conditions de cultures très différentes et ainsi générer des réponses variétales contrastées. S'appuyant sur des connaissances en agronomie et en écophysiologie, Lecomte (2005) propose de décrire les environnements d'essais par une série d'indicateurs quantifiant les principaux stress environnementaux (stress hydriques, gel, excès d'eau, stress azotés, maladies…) qui peuvent impacter le fonctionnement du blé durant ses principales phases de développement (levée, phase hivernale, tallage, montaison, remplissage). Dans ce cas, les paramètres β^k_i fournissent une esti-

mation de la tolérance des variétés à chacun des stress environnementaux (van Eeuwijk et *al.*, 2004). Cette caractérisation des variétés est particulièrement utile pour le conseiller. Il peut prédire la réponse des variétés à des environnements non expérimentés à partir du niveau des différents stress environnementaux qui s'y expriment et ainsi mieux définir les contours de leurs potentiels adaptatifs. Les profils de résistances des variétés aux principaux stress environnementaux tels que présentés dans la figure 5 peuvent aussi aider le sélectionneur à affiner ses choix de croisements.

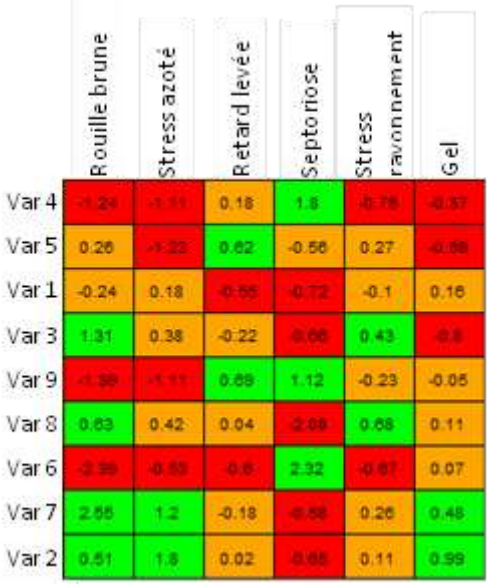


Figure 5 : Réponse différentielle des variétés (β^k_i) aux principaux stress s'exprimant dans le réseau d'essais. Les cases en rouge et en vert identifient les variétés respectivement plus sensibles et plus tolérantes que la moyenne à chaque stress. Les cases en orange identifient des variétés dont la réponse au stress n'est pas différente de la réponse moyenne des variétés.

Parallèlement à la décomposition de l'effet de l'environnement (Ej dans [1]) par une somme de covariables environnementales, une décomposition de l'effet génétique (Vi dans [1]) par des marqueurs génétiques (QTL) permet au généticien d'identifier les QTL ayant un effet sur les performances variétales quel que soit l'environnement (QTL généralistes) et ceux ayant un effet dépendant de l'environnement et expliquant une part d'interaction VxE. L'intégration simultanée, dans les modèles, de covariables environnementales et génétiques permet d'identifier les allèles impliqués dans la réponse adaptative des variétés à un stress donné. Cette information peut être utilisée dans le processus de création variétale au travers de la sélection assistée par marqueurs.

Malgré leur intérêt potentiel, ces approches d'analyse de l'interaction VxE, basées sur une meilleure explicitation des effets environnementaux et variétaux (Ej et Vi dans [1]) grâce à la prise en compte de covariables environnementales, d'effets alléliques révélés par certains marqueurs, et de leurs interactions, reste très peu pratiquées dans les réseaux d'essais variétaux. Ceci peut s'expliquer par le fait que jusqu'à présent, les modèles obtenus de cette façon restent peu prédictifs (Heslot, 2013). Des travaux sont en cours sur le sujet dans le cadre du GIS GC HP2E pour identifier et tester les causes possibles de cette faible qualité prédictive. Le coût supplémentaire qu'implique la caractérisation des essais peut aussi limiter la mise en œuvre de ces approches. Le calcul des covariables environnementales nécessite en effet de réaliser dans les essais des observations visuelles (notes de verse, d'accidents, de maladies…), des mesures (données météorologiques journalières, principales caractéristiques du sol, mesures de stades phénologiques) et bien souvent des prélèvements (par exemple : prélèvement de plantes pour mesurer la teneur en azote à la floraison et déterminer l'indice de nutrition azotée). Ce travail, dont dépend la qualité des modèles établis, peut être fastidieux voire impossible dans le cas de prélèvements destructifs par exemple. Pour limiter le coût de cette description des environnements, des modèles agronomiques peuvent être utilisés pour décrire des facteurs limitants dont le contrôle visuel est très difficile à réaliser (par exemple : établissement du bilan hydrique et azoté d'une culture et identification des périodes de stress). L'utilisation croissante des modèles de culture doit permettre de gagner du temps et d'éviter certains prélèvements. Pour autant, ces modèles sont souvent imprécis (voir par exemple Houlès et *al.* (2004) dans le cas du modèle STICS) du fait notamment de leur paramétrage (Makowski et *al.*, 2006), de l'exigence de qualité sur les variables d'entrée pour garantir des sorties précises, et de leur incomplétude. Il peut donc être intéressant de coupler ces modèles avec des mesures accessibles pour améliorer la qualité de leurs prédictions comme l'ont montré Naud et *al.* (2009) à partir du modèle Azodyn et de mesures SPAD pour la prédiction de l'INN entre la sortie de l'hiver et la floraison.

Perspectives

Le contexte de production du blé en France a beaucoup évolué ces dernières années avec, d'une part une diversification des attentes de la filière et de la société (satisfaction quantitative et qualitative des marchés, compétitivité économique aux différents maillons des filières, préservation de l'environnement, réduction des intrants…), et d'autre part une plus grande instabilité réglementaire, climatique et économique.

En réponse à ces évolutions, les critères de sélection des variétés se sont multipliés. D'abord sélectionnées pour leur productivité, puis sur la qualité de leurs grains (teneur en protéines, aptitude à la panification, poids spécifique…) et leur résistance aux maladies, les variétés sont aujourd'hui aussi sélectionnées sur leur comportement vis-à-vis de l'azote ou leur compétitivité vis-à-vis des adventices. La multiplication de ces critères de sélection n'est pas sans effet sur l'efficacité de la sélection puisqu'à investissement constant, une augmentation du nombre de critères de sélection entraine une réduction du progrès sur chaque critère pris individuellement.

De plus, considérer simultanément tous ces critères de sélection à la recherche de variétés dites « passe-partout » adaptées à des attentes, des conduites culturales et des environnements de culture variés apparait utopique. En effet, certains de ces critères de sélection sont antagonistes. Il existe par exemple une corrélation négative entre rendement et teneur en protéines (Oury et *al.*, 2003). Il est également montré que les résistances des variétés aux maladies peuvent être coûteuses pour la plante et affecter leur rendement (Brown, 2002). Gauffreteau et *al.* (2009) ont quanti-

fié le coût sur le rendement d'une sélection pour la résistance aux maladies. Ils ont montré des différences de 5 q/ha en moyenne entre des variétés sensibles et des variétés multi-résistantes en l'absence de maladies dans les environnements de culture étudiés. Ces antagonismes entre caractéristiques variétales sont à la base des interactions entre variétés, environnement et conduites de cultures observées dans les réseaux d'essais variétaux. Ils conduisent à la nécessaire adaptation de la sélection et de la préconisation des variétés à leur contexte local de production et d'utilisation. Cela passe par une bonne caractérisation de ce contexte : contexte agronomique, environnemental, économique, écologique, social, réglementaire… Cela nécessite également d'éclairer les motivations et contraintes des différents acteurs de la filière de production. Cette première étape doit permettre d'identifier des situations homogènes d'usage des variétés (débouchés, pratiques culturales et conditions environnementales). Elle doit aussi s'attacher à identifier les marges de manœuvre existant tout au long de la filière de production pour pallier les défauts éventuels des variétés (pratiques culturales, procédés de stockage et de transformation des grains…) afin de ne pas faire porter à la seule variété toutes les attentes des différents acteurs de la filière. Ce travail doit permettre d'établir une liste parcimonieuse et hiérarchisée d'objectifs pour la variété dans le contexte de production préalablement défini.

Plutôt que de sélectionner directement sur ces objectifs qui peuvent être multiples et, pour certains, antagonistes, Donald (1968) propose de définir en amont de toute sélection un modèle de plante qualifié d'idéotype qui se focalise sur les caractéristiques clés de la plante lui permettant d'atteindre ces objectifs. Plus précisément, il s'agit de déterminer les caractéristiques morphologiques et physiologiques ou leurs déterminants génétiques qui permettent de répondre à chacun des objectifs et de les combiner au sein d'une plante de façon optimale en limitant les antagonismes entre caractéristiques et en favorisant leurs synergies (Debaeke, 2014). Une fois ces caractéristiques définies, ces idéotypes (combinaisons de caractéristiques) peuvent orienter la sélection et, dans certains cas, améliorer son efficacité, particulièrement durant les phases précoces où certains critères de sélection classiques comme le rendement ne sont pas encore mesurables. Dans le cas du riz, Peng et *al*. (2008) rapportent une augmentation de 8-15 % du rendement avec une sélection fondée sur des caractères morpho-physiologiques par rapport à la sélection classique fondée sur le rendement. Toutefois, cet exemple est assez isolé dans la littérature où les démonstrations concrètes de ce type sont rares. Il faut noter que ce type de démarche est souvent basé sur de la modélisation, qu'elle nécessite de mobiliser des connaissances scientifiques ou expertes dans différents domaines (agronomie, écophysiologie, pathologie, génétique…) et que sa réussite dépend largement de la qualité et de la complétude des connaissances et des modèles disponibles sur l'espèce étudiée. Elle reste cependant une voie très intéressante pour concevoir au travers d'une réflexion conceptuelle, collective et pluridisciplinaire des idéotypes très différents de ceux actuellement sélectionnés et qui pourraient être adaptés à des systèmes de culture en rupture avec ceux pratiqués aujourd'hui.

Parmi les différentes sources de variations des conditions de culture, les sources de variations répétables liées au type de sol au climat moyen ou à la conduite culturale doivent être distinguées des sources de variations interannuelles difficilement prédictibles avant semis comme les conditions météorologiques ou la pression de ravageurs par exemple. Si les variations répétables peuvent faire l'objet d'une sélection et d'un conseil variétal spécifique, les variations interannuelles imposent de disposer de variétés suffisamment stables. Cependant, plutôt que de rechercher des variétés capables de maintenir leur performance sur des années très contrastées en cumulant dans ces variétés des résistances à une diversité de stress environnementaux (froid, stress hydrique, hautes températures, maladies, insectes…), il peut être intéressant de préconiser, à l'échelle d'une exploitation agricole, des variétés aux profils de résistance contrastés. Mélanger des variétés au sein d'une même parcelle et profiter de synergies entre variétés est aussi une option intéressante notamment pour supporter les variations de pressions biotiques dans le milieu (Kiear et *al*., 2009). Dans ces cas aussi, la démarche d'idéotypage est intéressante car elle outille la réflexion sur les profils de variété à associer dans une exploitation ou à mélanger dans une parcelle.

Bibliographie

Becker, H.C., Léon, J., 1988. Stability analysis in plant breeding. Plant Breed 101, 1-23

Boulineau, F., Leclerc, C., 2013. Evolution des variétés au travers du catalogue officiel. Le Sélectionneur Français 64:35-50

Brancourt-Hulmel, M., Biarnès-Dumoulin, V., Denis, J.B., 1997. Points de repère dans l'analyse de la stabilité et de l'interaction génotype - milieu en amélioration des plantes. Agronomie 17, 219-246

Brancourt-Hulmel, M., Doussinault, G., Lecomte, C., Bérard, P., Le Buanec, B., Trottet, M., 2003. Genetic improvement of agronomic traits of winter wheat cultivars released in France from 1946 to 1992. Crop Science 43:37-45

Brisson, N., Gate, P., Gouache, D., Charmet, G., Oury, F.X., Huard, F., 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe? A Comprehensive data analysis for France. Field Crops Research 119, 201-212

Brown, J. KM., 2002. Yield penalties of disease resistance in crops. Plant Biology. 5:339-344

Butault, J.P., Dedryver, C.A., Gary, C., Guichard, L., Jacquet, F., Meynard, J.M., Nicot, P., Pitrat, M., Reau, R., Sauphanor, B., Savini, I, Volay, T., 2010. Ecophyto R&D. Quelles voies pour réduire l'usage des pesticides ? Synthèse du rapport d'étude, INRA Editeur (France), 90 p

Coïc, Y., 1956. Les besoins en azote du blé d'hiver, conséquences agronomiques. Ann. Agron. 7, 115-131

Cullimore, J., et al., 2013. Cereals benefiting from nitrogen fixation: strategies for the French public-private research community ; Position paper endorsed by the strategic committee of the GIS BV, the "Plant Biology and Biotechnologie s" working group (GT4) of the AllEnvi Alliance

Debaeke, P, Quilot-Turion, B., et al., 2014. Conception d'idéotypes de plantes pour une agriculture durable. FormaScience INRA CIRAD

Denis, J.B., 1980. Analyse de régression factorielle. Biom Praxim 20, 1-34

Denis, J.B., 1988. Two way analysis using covariates. Statistics 19, 123-132

Desclaux, D., Nolot, J.M., Chiffoleau, Y., Gozé E., Leclerc, C., 2008. Changes in the concept of genotype × environment interactions to fit agriculture diversification and decentralized participatory plant breeding: pluridisciplinary point of view. Euphytica 163, 533-546

De Vallavieille-Pope, C., Mille, B., Belhaj Fraj, M., Meynard, J.-M., 2004. Intérêt des associations de variétés de blé pour diminuer les fongicides : conséquences sur la filière. Le Sélectionneur Français, 54, 45-56

De Vallavieille-Pope, C., Belhaj Fraj, M., Mille B. , Meynard, J-M., 2006. Les associations de variétés : accroître la biodiversité pour mieux maîtriser les maladies Dossier de l'environnement de l'INRA n° 30 ,101-109

Donald, C.M., 1968. The breeding of crop ideotype. Euphytica 17, 385-403

Finlay, K.W., Wilkinson, G.N., 1963. The analysis of adaptation in a plant-breeding programme. Aust J Agric Res 14, 742-754

Fuzeau V., Dubois G., Thérond O., Allaire G., 2012. Diversification des cultures dans l'agriculture française État des lieux et dispositifs d'accompagnement. CGDD, Etudes et Documents, n°67

Gauch, H.G., 1992. Statistical analysis of regional yield trials: AMMI analysis of factorial designs. Elsevier, Amsterdam, the Netherlands; Chinese edition 2001, Caughina National Rice Research Institute, Hangzhou, China

Gauffreteau, A., Marzouki, R., Jeuffroy, M.H., 2009. Does disease resistance have a cost in potential yield of winter bread wheat varieties? Farming System Design Symposium August 23-26, 2009 - Monterey. CA

Hauggaard-Nielsen, H., Ambus, P. and Jensen, E.S., 2001. Interspecific competition, N use and interference with weeds in pea-barley intercropping. Field Crops Res. 70: 101-109

Hébert J. (1969). La fumure azotée du blé tendre d'hiver. Bull. Tech. Inf. 244, 755-766

Heslot, N., Akdemir, D., Sorrells, M. E., Jannink, J. L., 2013. Integrating environmental covariates and crop modeling into the genomic selection framework to predict genotype by environment interactions. TAG 127, 2, 463-480

Houlès, V., Mary, B., Guérif, M., Makowski, D., Justes, E. 2004. Evaluation of the ability of the crop model STICS to recommend nitrogen fertilisation rates according to agro-environmental criteria. Agronomie 24, 339-349

Jeuffroy, M.H., Gate, P., Machet, J.M., Recous, S., 2013. Gestion de l'azote en grandes cultures : les connaissances et outils disponibles permettent-ils de concilier exigences agronomiques et environnementales ? Cahiers Agricultures 22:249-257

Jeuffroy, M.-H., Oury, F.X., 2012. Impact des nouvelles techniques de production, impliquant de faibles niveaux d'intrants, sur la quantité de protéines. Innovations Agronomiques 19:13-25

Kiær, L. P., Skovgaard, I. M. & Østergård, H., 2009. Grain yield increase in cereal variety mixtures: A meta-analysis of field trials. Field Crops Res. 114, 361-373

Lecomte, C., 2005. L'évaluation expérimentale des innovations variétales. Proposition d'outils d'analyse de l'interaction génotype - milieu adaptés à la diversité des besoins et des contraintes des acteurs de la filière semences. Thèse de Docteur-Ingénieur de l'INAPG, Paris (France), 174p. + annexes

Le Gouis, J., 2011. Genetic improvement of nitrogen efficiency in wheat. In the Molecular and physiological basis of nutrient efficiency in crops. M.J. Hawkesford; Barraclough P [Ed.], Wiley & Sons, Inc., 123-1381

Le Gouis, J., 2012. Quels caractères et quels outils pour améliorer l'efficacité d'utilisation de l'azote par le blé tendre ? Le sélectionneur français 63:37-46

Loyce, C., Meynard, J.M., Bouchard, C., Rolland, B., Lonnet, P., Bataillon, P., Bernicot, M.H., Bonnefoy, M., Charrier, X., Debote, B., Demarquet, T., Duperrier, B., Félix, I., Heddadj, D., Leblanc, O., Leleu, M., Mangin, M., Méausoone, M., Doussinault, G., 2012. Growing winter wheat cultivars under different management intensities in France. A multicriteria assessment based on economic, energetic and environmental indicators. Field Crops Research, 125 (1), 167-178

Makowski, D., Hillier, J., Wallach, D., Andrieu, B., Jeuffroy, M.H., 2006. Parameter estimation for crop models. In : Wallach D., Makowski D., Jones J.W. (Eds) Working with Dynamic Crop Models. Elsevier, Amsterdam, pp. 101-149

Meynard, J.M.,1991. Pesticides et itinéraires techniques. In: P. Bye, C. Descoins and A. Deshayes (Editors), Phytosanitaires, Protection des Plantes, Biopesticides. INRA, Paris, pp. 85-100

Meynard, J.M., Girardin, P., 1991. Produire autrement. Le Courrier de l'Environnement, 15

Meynard, J.M., Barbier, J.M., Bonicel, L., Dubeuf, J.P., Guichard, L., Halska, J., Schmidt, A., 2010. Ecophyto R&D. Tome VII, analyse des jeux d'acteurs. 39p

Mignolet C., Schott C., Benoît M., Meynard J.-M., 2012. Transformations des systèmes de production et des systèmes de culture du bassin de la Seine depuis les années 1970 : une spécialisation des territoires aux conséquences environnementales majeures. Innovations Agronomiques 22, 1-16

Naud, C., Makowski, D., Jeuffroy, M.-H., 2009. Leaf transmittance measurements can improve predictions of the nitrogen status for winter wheat crop. Field Crops Res. 110, 27-34

Oury, F-X., Bérard, P., Brancourt-Hulmel, M., Depatureaux, C., Doussinault, G., Galic, N., Giraud, A., Heumez, E., Lecomte, C., Pluchard, P., Rolland, B., Rousset, M., Trottet,

M., 2003. Yield and grain protein concentration in bread wheat: a review and a study of multiannual data from a French breeding program. J Genet Breed 57:59-68

Oury, F.X., Godin, C., 2007. Yield and protein concentration in bread wheat: how to use the negative relationship between the two characters to identify favourable genotypes. Euphytica

Peng, S., Khush, G.S., Virk, P., Tang, Q., Zou, Y., 2008. Progress in ideotype breeding to increase rice yield potential. Field Crop Res. 108, 32-38

Rolland, B., Le Campion, A., Oury, F.X., 2012. Pourquoi sélectionner de nouvelles variétés de blé tendre adaptées à l'agriculture biologique ? Courrier de l'Environnement de l'INRA 62, 71-85

Schott, C., Mignolet, C., Meynard, J.M.. 2010. Les oléoprotéagineux dans les systèmes de culture : évolution des assolements et des successions culturales depuis les années 1970 dans le bassin de la Seine. OCL Oléagineux Corps Gras Lipides 17 (5), 276-291

Van Eeuwijk, F.A., Malosetti, M., Yin, X., Struik, P.C., Stam, P., 2004. Modelling differential phenotypic expression. In: "New discussions for a diverse planet", Proceedings of the 4th International Crop Science Congress, 26 Sep – 1 Oct 2004, Brisbane, Australia

Von Wricke, G., 1962. Über eine Methode zur Erfassung der ökologischen Streubreite inFeldversuchen. Z Planzenzücht 47, 92-96

Yan, W., 2001. GGEbiplot–A Windows application for graphical analysis of multienvironment trial data and other types of two-way data. Agron. J. 93:1111-1118.