



## **Comment articuler modes d'évaluation des variétés, conduite des cultures et processus d'amélioration génétique?**

Marie-Helene Jeuffroy, Antoine Messean

### **► To cite this version:**

Marie-Helene Jeuffroy, Antoine Messean. Comment articuler modes d'évaluation des variétés, conduite des cultures et processus d'amélioration génétique?. *Innovations Agronomiques*, 2009, 7, pp.1-13. <10.17180/vcbs-de51>. <hal-01173220>

**HAL Id: hal-01173220**

**<https://hal.science/hal-01173220v1>**

Submitted on 30 May 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.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License

## **Comment articuler modes d'évaluation des variétés, conduite des cultures et processus d'amélioration génétique?**

M.H. Jeuffroy<sup>1</sup>, A. Messéan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> INRA, UMR211 Agronomie, EGER, 78 850 Thiverval-Gignon

<sup>2</sup> INRA, Eco-Innov, EGER, 78 850 Thiverval-Gignon

Correspondance: Marie-Helene.Jeuffroy@grignon.inra.fr

### **Résumé**

Le développement conjoint et cohérent, au cours des dernières décennies, d'une sélection variétale axée sur l'amélioration de la productivité et d'innovations techniques permettant de lever les facteurs limitants de la production a permis une amélioration significative et régulière de la production agricole. Face aux changements globaux, aux enjeux liés au développement durable et à la diversification des attentes des marchés et de la société, une évolution des systèmes de production est nécessaire. Compte-tenu de la cohérence des systèmes de production, et du lien entre sélection variétale et conduite de cultures, non seulement l'évaluation des variétés doit prendre en compte la diversité accrue des environnements de production et des critères d'appréciation qui en découle, mais la conception des variétés doit elle-même intégrer cette diversité et cette dynamique des systèmes socio-techniques. C'est à un véritable changement de paradigme que nous sommes invités. Si les modalités de mise en œuvre restent encore largement à mettre en place, de nombreux outils, en particulier la modélisation, sont d'ores et déjà disponibles et doivent permettre de compléter de manière efficiente les réseaux actuels de sélection et d'évaluation variétale.

**Mots-clés :** variétés, conduite culturale, modèle, interaction génotype-environnement, systèmes de culture,

### **Abstract: How to design and assess cultivars adapted to sustainable cropping systems?**

The joint and consistent development, during the last decades, of cultivar breeding programmes aiming at improving grain yield and of innovative techniques lifting limiting factors in the fields led to a significant and regular increase of the national crop production, in many species. In front of the global changes, stakes linked to sustainable development, and diversification of requirements from market and society, it is necessary to change farming systems. Given the coherence of farming systems, and given the strong link between cultivar breeding and crop management, cultivar evaluation should take into account the higher diversity of growing conditions and, consequently, of the criteria used for evaluation. In addition, the breeding process should also integrate this diversity and the time-course change of the socio-technical systems. We are therefore invited to a real paradigm change! If the overall framework for such a global evolution is still to be implemented, numerous tools, particularly modelling, are already available and could efficiently complement the current experimental networks for breeding and cultivar evaluation.

**Keywords:** cultivar, crop management, model, genotype by environment interaction, cropping systems

## Introduction

Le rôle et la place de l'agriculture dans notre société ont considérablement évolué depuis une cinquantaine d'années. Après avoir été prioritairement orientée vers la production de denrées alimentaires pour nourrir la France d'après-guerre, puis également pour exporter ses productions vers des pays solvables, l'agriculture est aujourd'hui confrontée à de multiples défis :

- un contexte en évolution rapide, sous l'effet de divers facteurs : le changement de contexte réglementaire lié à l'OMC et aux réformes de la politique agricole commune, le changement climatique qui devrait modifier sensiblement le contexte de production agronomique, la pression du consommateur et du citoyen avec des attentes parfois contradictoires en termes de qualité et de sécurité alimentaire et environnementale, l'évolution des prix de l'énergie et ses impacts sur les coûts de production ;
- la diversification de ses fonctions : on n'attend plus seulement d'elle la production de denrées alimentaires, mais également la fourniture de biens environnementaux (services écologiques), de biens non-alimentaires (bio-énergie, chimie verte) et de services (éco-tourisme, éducation) ;
- sa contribution potentielle à la gestion de l'espace rural où, alors que cet espace n'est plus occupé, ni géré, par les seuls agriculteurs, l'agriculture demeure une activité économique essentielle ;
- de profonds changements sociaux qui peuvent faciliter ou limiter la capacité d'évolution : l'effondrement du nombre d'agriculteurs, la place des conjointes qui aujourd'hui travaillent pour la plupart à l'extérieur de la ferme, et l'augmentation rapide du niveau de formation initiale ;
- la contestation croissante des modèles de production technique et des innovations associées, hérités de la phase de modernisation agricole, du fait de leurs impacts sur l'environnement et la santé, dont on commence seulement à caractériser la nature précise et à mesurer les conséquences, mais également en raison de l'inégalité des rapports économiques qu'ils engendrent au sein des filières agro-alimentaires.

Pour l'agriculture, ses acteurs et la recherche agronomique, cette mutation et ces contestations génèrent un large éventail de remises en cause et d'interrogations qui vont bien au-delà de la simple prise en compte de nouvelles finalités environnementales et sanitaires.

De plus, cette mutation s'est récemment traduite par des politiques publiques plus incitatives, fondées le plus souvent sur un engagement de résultats (Directive européenne sur l'utilisation durable des pesticides, nombreuses actions consécutives au Grenelle de l'environnement) et une invitation à faire évoluer les pratiques de recherche vers un développement de l'agro-écologie et des recherches participatives (International Assessment of Agriculture Knowledge, Science and Technology for Development, 2008).

Cette réorientation de l'agriculture est néanmoins difficile car il existe une cohérence forte du système socio-technique actuel. Non seulement les systèmes de culture ont été conçus de façon à satisfaire les objectifs de production qui ont été les nôtres par le passé, mais les marchés, les filières, le système de Recherche-Développement et les politiques publiques se sont peu à peu organisés de manière à renforcer cette cohérence. Aujourd'hui, le nécessaire changement de systèmes de production ne peut se faire sans une évolution profonde des stratégies des différents acteurs impliqués dans l'agriculture. C'est en fait un véritable changement de paradigme que nous sommes invités à opérer.

La sélection variétale est directement concernée par ce changement de paradigme. En effet, elle a répondu de manière très efficace aux objectifs fixés pour la production agricole. Ce faisant, elle a largement contribué à accompagner les pratiques culturales et les choix des systèmes de production de ces 50 dernières années. La production et la diffusion d'innovations variétales mobilisent en effet de nombreux acteurs : depuis les chercheurs en génomique jusqu'aux conseillers chargés d'évaluer les

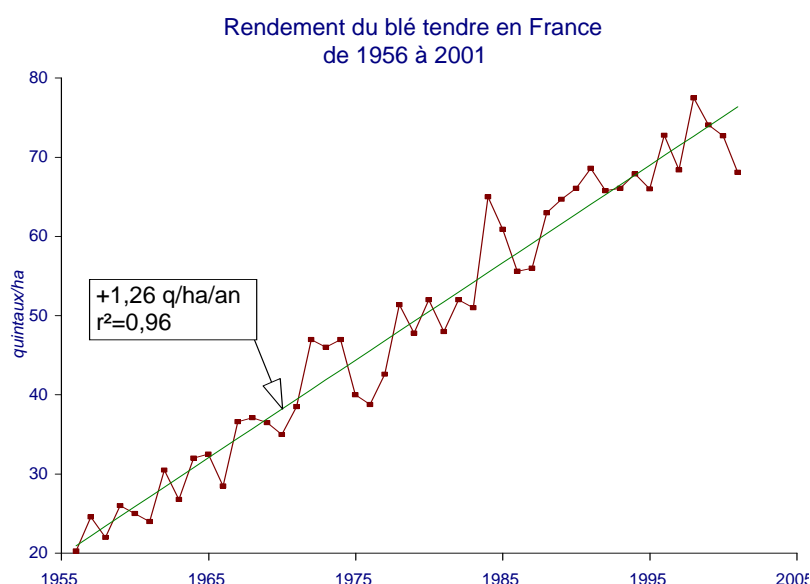
variétés nouvelles dans leurs conditions de production pour conseiller les agriculteurs sur les choix variétaux, en incluant l'ensemble du système de sélection proprement dit et d'inscription des variétés aux catalogues nationaux. Tout cet ensemble est parfaitement organisé pour construire, produire et diffuser des génotypes qui répondent aux besoins des filières. Mais les besoins de génotypes doivent largement évoluer avec l'apparition de contraintes fortes sur les ressources et l'émergence de nouvelles attentes en termes de modes de production durables. Quelles conséquences une diversification des systèmes de production et de leurs objectifs a-t-elle pour la sélection ? Comment concevoir des idéotypes variétaux adaptés à des systèmes diversifiés ? Comment co-construire variétés et systèmes de production ?

Ce sont les questions auxquelles nous allons tenter de répondre. Tout d'abord, nous reviendrons sur la situation actuelle, en illustrant ce que nous appelons la cohérence du système socio-technique et en montrant la nécessité d'un changement de paradigme. Ensuite, nous aborderons la question de l'adaptation locale des variétés. Enfin, on illustrera les avancées récentes en termes de méthodes et d'outils pour répondre à ces nouveaux défis.

## 1. Retour sur le passé et la cohérence du système socio-technique

*Les pratiques de culture ont évolué vers un objectif d'élimination progressive des facteurs limitants du rendement.*

Dans le passé, l'objectif prioritaire d'accroître la quantité de biens alimentaires produits, et le rapport de prix favorable entre les produits agricoles récoltés et les intrants ont permis une progression constante et importante des rendements des principales grandes cultures (Figure 1 pour l'exemple du blé). La sélection variétale a largement contribué à cette progression. Elle a connu des développements importants dans la deuxième moitié du 20<sup>ème</sup> siècle, en se situant dans l'hypothèse d'un environnement de production optimal : ainsi, le rendement des principales cultures a progressé de manière importante et constante (entre 1955 et 1989, +1.26 q/ha/an chez le blé tendre ; +1.34 q/ha/an chez le maïs ; +0.93 t/ha/an chez la Betterave Sucrière et +0.46 q/ha/an chez le colza).



**Figure 1 :** Evolution des rendements nationaux du blé de 1955 à 2001 avec ajustement par régression linéaire (Trottet et Doussinault, 2002).

Meynard et Girardin (1991) ont démontré comment s'était mise en place, au plan technique, dans le cas du blé, une logique d'intensification, logique qui « repose sur la disponibilité d'une panoplie d'intrants (produits phytosanitaires, engrais, régulateurs de croissance, voire irrigation) et de leurs modes

d'emploi, qui permettent potentiellement de maîtriser les principaux facteurs limitants de la production et d'atteindre des rendements proches des potentialités de la culture dans le milieu considéré » (Meynard et Savini, 2003). Ainsi, l'apparition des régulateurs de croissance (fin des années 1960) a permis de réduire les risques de verse ; l'apparition des insecticides de synthèse (début des années 1960), des herbicides de pré-levée (1970-1971), des fongicides de contact (1970-71), puis des fongicides systémiques (1976-77), a permis de lutter de manière efficace contre les différents types de bio-agresseurs. Le recours croissant à l'irrigation et l'augmentation des doses d'engrais azoté ont également favorisé la satisfaction de la nutrition hydrique et azotée des cultures. L'avancement des dates de semis et le fractionnement de l'apport d'azote ont également permis respectivement de maximiser la quantité de rayonnement intercepté par la culture et d'accroître l'efficacité d'utilisation de l'engrais.

Cette évolution des techniques de production, en permettant de s'affranchir des contraintes environnementales et en levant les facteurs limitants, a permis à la sélection des espèces cultivées d'améliorer la productivité, d'augmenter la quantité de matière végétale exportable et de réguler ses fluctuations. Elle a également longtemps accompagné cette logique d'intensification. Par exemple, la volonté d'éviter toute période de carence azotée le long du cycle, associée à la difficulté de prévoir le rythme de disponibilité en azote minéral dans le milieu et l'efficacité d'utilisation de l'engrais azoté appliqué, conduisent à des fertilisations azotées souvent excessives (Ballot, 2009). Si cette pratique était autrefois sanctionnée par le risque élevé de verse, avec des conséquences préjudiciables pour l'agriculteur, elle est maintenant tolérée grâce à la disponibilité de régulateurs de croissance, ainsi qu'à l'introduction, dans une large majorité de variétés de blé diffusées aujourd'hui, de gènes de résistance à la verse.

Ce faisant, le rendement moyen du blé cultivé en France s'est progressivement rapproché du rendement moyen observé dans les essais variétés du CTPS (lors de la phase d'inscription) : si le premier a progressé d'environ 1.26 q/ha/an entre 1956 et 1999, le second a seulement évolué d'environ 0.49 q/ha/an pendant la même période (Brancourt-Hulmel *et al.*, 2003).

Cette cohérence entre les composantes de la conduite de culture s'étend à l'ensemble du système socio-technique (Lamine, 2008). Les acteurs des filières, ainsi que leurs procédures, se sont peu à peu adaptés à des systèmes intensifs. Les transformateurs ont ainsi renforcé par exemple les cahiers des charges en termes d'impuretés ou de normes de qualité, en cohérence avec l'évolution des propriétés des systèmes intensifs. Les règles d'inscription des variétés ont globalement favorisé le rendement. Même si la qualité technologique ou, plus récemment, la résistance aux maladies, ont pris de l'importance dans les critères d'inscription, l'évolution est lente et les variétés disponibles restent principalement adaptées à des milieux non limitants et à une conduite sans facteur limitant (Hochereau, 2008).

Malgré une interaction généralement observée entre les caractéristiques variétales et environnementales, le jugement des variétés, notamment lors de la phase de l'inscription, se fait essentiellement sur la base d'une moyenne de leurs performances dans un ensemble de milieux *a priori* choisis pour représenter la diversité des conditions de culture françaises. Or, ce choix est parfois biaisé, en raison de l'hétérogénéité induite par certaines conditions : par exemple, les essais blé CTPS ne sont jamais implantés derrière un précédent blé, à cause de la présence possible de piétin-échaudage qui se développe en foyers et donc crée une variabilité importante des performances intra-essai, conduisant à un rejet systématique de l'essai lors de la synthèse des résultats, alors que cette pratique agricole est de plus en plus fréquente en France. Aujourd'hui, l'information disponible sur la diversité du comportement des variétés selon les milieux et/ou les conduites de culture n'est pas diffusée de manière coordonnée, même si on trouve, ici ou là, quelques informations de ce type. Toutes les communications sur le progrès génétique sont, pour la quasi-totalité des espèces de grande culture, toujours basées sur l'étude de l'évolution du rendement (Austin *et al.*, 1980 ; Austin, 1999 ; Brancourt-Hulmel *et al.*, 2003). Les résultats des essais variétés des organismes de développement, sur lesquels

sont largement basés les conseils de choix variétal diffusés aux producteurs, sont en général présentés selon un classement variétal par ordre de rendement moyen décroissant, dans des conduites de culture recommandées localement.

### ***Conséquences pour la sélection : un changement de paradigme est nécessaire***

Face aux changements globaux et aux nouveaux objectifs assignés à l'agriculture (réduire de 50% l'utilisation des pesticides, réduire l'utilisation de ressources qui se raréfient, réduire les émissions de gaz à effet de serre, augmenter - ou au moins arrêter de réduire- la biodiversité, développer l'agriculture biologique, etc), de nouveaux systèmes de production doivent être conçus et de nouvelles pratiques agricoles mises en place. Compte-tenu de la pression sur l'usage des intrants et des ressources naturelles, il importe que ces nouvelles pratiques conduisent à ce que les milieux soient moins artificialisés et puissent participer à des régulations naturelles. Les pratiques concernent les itinéraires techniques et l'organisation spatio-temporelle des cultures (associations d'espèces et variétés cultivées, organisation des espaces semi-naturels), à l'échelle des parcelles et des paysages. Ceux-ci doivent en particulier être repensés pour favoriser les régulations biologiques, nécessaires à l'obtention d'une production à haute valeur économique et environnementale. Si l'on veut réduire l'usage des intrants (par exemple des pesticides dans la protection intégrée des cultures), il est souvent nécessaire de combiner différentes solutions à effet partiel. La disponibilité d'une unique méthode alternative à la lutte chimique n'est, par ailleurs, pas nécessairement souhaitable en terme de durabilité, car elle est souvent peu stable (cf. les variétés à résistance totale rapidement contournée).

D'une part, il est clair que les modes de conduites attendus pour demain requièrent un matériel végétal spécifique adapté. Les essais en grande culture menés dans le domaine INRA d'Epoisses sur de nombreuses années ont permis de montrer comment la diversification des rotations permet une maîtrise durable des adventices. Une première analyse comparative coûts/bénéfices a été réalisée sur les différentes solutions expérimentées et a montré qu'une rotation longue techniquement intéressante apparaît pénalisée économiquement essentiellement par le faible rendement d'une culture de printemps (moutarde) utilisée pour la diversification. Le résultat aurait pu être inversé si on avait disposé d'une variété améliorée.

De façon analogue, les travaux menés dans le projet ADD « Impacts » pointent l'intérêt de cultures intermédiaires (en l'occurrence une moutarde) jouant notamment un rôle assainissant à l'égard de pathogènes telluriques, tels que l'agent du piétin-échaudage, entre deux cultures de blé d'hiver (de Cara *et al.*, 2009). Ces travaux suggèrent l'intérêt d'une amélioration génétique dirigée vers la fonction allélopathique de cette espèce.

En ce qui concerne la sélection variétale, ces nouveaux enjeux ne se limitent pas à une évolution des critères d'évaluation qui accorderaient plus de place à la résistance aux bio-agresseurs ou à une moindre consommation des ressources naturelles (eau par exemple). En effet, la logique de substitution, remplacer par exemple des moyens de lutte chimique par la lutte génétique, n'est pas toujours simple à mettre en œuvre, peut ne pas être souhaitable ou être tout simplement inefficace. Ainsi, les résistances au phoma du colza introduites dans les années 90 ont été d'autant plus vite contournées qu'elles étaient efficaces et donc massivement adoptées (Rouxel *et al.*, 2003).

Les travaux d'étude de la combinaison de différents modes de raisonnement de la lutte chimique (biologique, raisonné selon les règles de l'OILB ou conventionnel) sur des vergers de pommiers plantés de variétés différant par leur résistance à la tavelure mettent en évidence qu'une résistance partielle apporte peu de bénéfice en termes de réduction des traitements fongicides dans un mode de conduite conventionnel par rapport à une variété sensible. Réciproquement, l'utilisation de conduites raisonnées et de règles de décision plus exigeantes qu'en conventionnel ne permet pas de réduire sensiblement le

nombre d'applications sur une variété sensible, alors que l'effet de ces pratiques raisonnées est très important sur une variété partiellement résistante (Ricci *et al.*, 2008).

De la même façon, dans le cas des blés rustiques, leur usage est particulièrement performant dans un mode de conduite moins intensif (Meynard *et al.*, ce colloque). Ce n'est donc pas la variété en elle-même qui représente l'innovation mais son utilisation dans un itinéraire technique adapté : les variétés rustiques autorisent ces itinéraires et ceux-ci sont nécessaires pour valoriser les caractéristiques particulières des blés rustiques. Ainsi, mode de raisonnement de la lutte chimique et caractéristiques variétales se valorisent mutuellement.

Deux réflexions peuvent se dégager de ces résultats. La première est que, dans tous ces exemples, le progrès vers des modes de conduite plus économes en intrants est aujourd'hui freiné par la faible disponibilité de géotypes adaptés. Si les blés rustiques sont aujourd'hui inscrits au catalogue et diffusés, ils n'ont pas toujours été accessibles pour les agriculteurs en fonction de la politique suivie par leurs fournisseurs d'intrants. Les variétés nécessaires pour des systèmes innovants à faible usage d'herbicides en grandes cultures doivent être à la fois compétitives vis-à-vis des adventices, si possible résistantes aux principales maladies, et conformes aux standards de qualité du grain pour des usages en panification.

Alors que le programme Ecophyto R&D, mis en place à la demande des Ministères de l'Agriculture et du Développement Durable, s'efforce d'évaluer les marges de manoeuvre pour réduire l'utilisation des pesticides dans les différentes filières, les résultats du programme ANR GéDuPIC (Ricci *et al.*, 2008) contribuent à souligner à quel point ces marges dépendent de l'assortiment variétal disponible. Or, les objectifs prioritaires des améliorateurs et les critères d'inscription au catalogue font partie des éléments du système qui - dans la logique de cohérence analysée plus haut - se sont calés sur le paradigme d'un libre recours à la lutte chimique. Cette analyse conduit à encourager la recherche à se pencher à nouveau sur l'optimisation de l'interaction géotype / environnement / pratiques dans un contexte de re-conception des stratégies de protection et à reconsidérer les critères qui définissent les idéotypes de variétés pour des systèmes moins dépendants des intrants.

Il est donc essentiel de co-concevoir les variétés avec les systèmes de production dans lesquels les variétés sont susceptibles d'être cultivées. Comme le souligne James Brown, « It is particularly important that the environment in a breeding programme predicts the conditions on farm – in fact conditions a few years in the future, when varieties will be grown » (Brown, 2008). Si l'on considère que les systèmes doivent changer de manière assez radicale, qu'ils doivent également être diversifiés en fonction des conditions locales et évoluer pour tenir compte des changements globaux (marchés, climat, etc), le challenge est particulièrement important pour la sélection variétale.

Cela suppose de repenser sensiblement le cadre et les modalités de sélection variétale : il ne s'agit plus seulement d'adapter les systèmes et pratiques au matériel génétique essentiellement orienté vers l'amélioration de la productivité mais aussi de mettre au point un matériel génétique qui valorise au mieux des environnements, des systèmes de production et des pratiques agricoles déterminés par un ensemble de contraintes élargies.

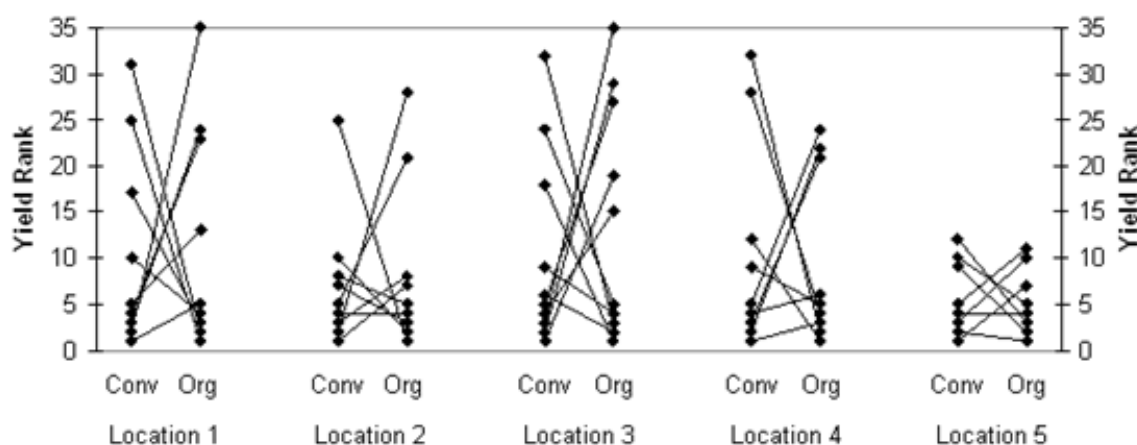
## **2. La nécessaire recherche de variétés adaptées au contexte local, au système de production et à leur évolution**

Pour la quasi-totalité des espèces, le mode d'évaluation actuel des variétés pour l'inscription base la cotation des variétés sur une moyenne des performances observées dans l'ensemble des sites d'essais de la région de culture appropriée (région Nord ou région Sud dans le cas du blé tendre). De ce fait, ce mode de calcul tend à privilégier les variétés qui ont un bon comportement partout, et peut éliminer certaines variétés qui auraient un comportement particulièrement bien adapté à certaines conditions de culture, mais moins bien adaptées à d'autres. Même si les nombreux dispositifs d'évaluation post-

inscription, réalisés par les différents organismes de développement et de conseil, tendent à réduire cet effet pour chercher à mieux identifier les variétés adaptées au contexte local, le choix de la variété « passe-partout » est encore privilégié actuellement. Néanmoins, une modification importante faisant émerger l'évaluation de l'adaptation des variétés devrait entrer en vigueur en 2011 dans le cas des gazons : une analyse sera réalisée selon 4 grandes zones climatiques européennes, la variété pour être inscrite devant être bonne dans une zone et acceptable dans les 3 autres.

Or, la réponse des variétés à des conditions variées de culture (qu'elles soient liées à une variabilité des conditions pédo-climatiques ou de la conduite de culture) varie fortement selon les caractéristiques variétales. Ainsi, Barbottin (2004) a montré que le classement d'un groupe de variétés cultivées dans différents lieux avec des conduites de culture comparables était variable. De même, Zhang (2005) et Loyce *et al.* (2008) ont mis en évidence une variabilité de réponse des variétés de blé à des itinéraires techniques variés : la réduction de l'utilisation des intrants, rendue indispensable par le besoin de réduire les impacts environnementaux négatifs de la production, ainsi que les rapports de prix nettement moins favorables entre produits récoltés et intrants, imposent de changer de type variétal.

Enfin, Murphy *et al.* (2007) ont montré qu'il existe un effet des conditions de sélection de variétés de blé sur leurs performances ultérieures dans des conditions de culture contrastées. Les meilleures variétés sélectionnées en conditions de culture conventionnelles se révèlent moins performantes en conditions d'agriculture biologique et réciproquement (Figure 1).



**Figure 1** : Effet des conditions de sélection sur le classement relatif de variétés de blé dans différents lieux pour des conditions de culture conventionnelles ou biologiques (Murphy *et al.*, 2007). Les cinq variétés les plus performantes en conditions conventionnelles (Conv) ont été testées en conditions biologiques (Org) et leur classement relatif est fortement dégradé dans 4 situations sur 5. Réciproquement, les cinq meilleures variétés en conditions biologiques se révèlent moins performantes en conditions conventionnelles.

Les interactions Génotype-Environnement-Conduite (IGEC), révélées par ces différentes études, représentent généralement de l'ordre de 10 à 25% de la variation totale du rendement analysé dans différents environnements. Elles ont été largement étudiées par les généticiens et les statisticiens pour comprendre leur origine. Cependant, les modèles mathématiques développés et utilisés pour analyser et décomposer les IGE ne permettent pas de prédire le comportement d'une variété dans un milieu donné, et sont donc de peu d'aide pour orienter le choix variétal. Pourtant, si l'on compare le rendement d'un groupe de variétés expérimentées dans différents sites, le choix de cultiver la meilleure variété dans chaque site par rapport à cultiver la même variété partout peut induire un gain de produit brut de l'ordre de 10% (d'après Barbottin, 2004). Si l'on cherche à réduire l'artificialisation des milieux, qui ne permet généralement d'ailleurs pas de supprimer tous les facteurs limitants en production (Lecomte,



2005), et qu'on cherche à valoriser cette variabilité de conditions, il devient alors nécessaire de rechercher la variété bien adaptée aux caractéristiques de ce site ou de cette conduite. Par exemple, en conditions d'agriculture biologique, il est nécessaire de disposer de variétés tolérantes aux carences azotées et compétitives vis-à-vis des adventices. Etant donné la fréquence des pressions de maladies du blé dans les différentes régions de France (Zhang *et al.*, 2006), il apparaît impératif de choisir une variété très résistante à la rouille jaune en Normandie, tandis qu'une telle caractéristique est superflue dans la région Nord-Est de la France.

Face à ces nouveaux objectifs de choix variétal, la diversité génétique est-elle suffisante ? On peut constater que ce n'est pas toujours le cas. Ainsi, par exemple, pour réduire les risques de piétin-verse, sans avoir à appliquer un fongicide spécifique contre cette maladie, on peut combiner l'utilisation de variétés résistantes et le retard des semis, très efficace, (donc l'utilisation de variétés précoces à maturité). Cependant, dans le catalogue variétal disponible aujourd'hui, moins de 3% des variétés combinent ces deux critères. Si, par ailleurs, on veut cultiver une variété ayant certaines caractéristiques technologiques (pour répondre au mieux aux besoins des filières), le choix se trouve immédiatement considérablement réduit, voire même inexistant ! La recherche de variétés adaptées à des conditions de culture spécifiques nécessite de revoir les objectifs de sélection, sur la base d'une analyse prospective sur la manière dont la variété sera utilisée au sein des systèmes de culture, car beaucoup d'impacts environnementaux sont très contingents de la manière dont la variété sera utilisée. Ainsi, par exemple, un colza semé tôt sur une parcelle riche en azote permet non seulement d'absorber l'azote disponible, et donc de réduire les risques de lixiviation des nitrates pendant l'automne, mais également d'étouffer les mauvaises herbes, et donc de réduire l'utilisation d'herbicides (Dejoux, 1999). Cependant, le développement important de ces colzas les rend plus sensibles à la verse et au phoma. Une variété de colza adaptée à cette double fonction de piégeage de nitrates et « d'étouffement » de mauvaises herbes devra donc être résistante à la fois à la verse et au phoma.

Pour réaliser ces analyses, il devient indispensable de mobiliser des outils spécifiques, simulant les conséquences de l'utilisation de variétés ayant des caractéristiques variées dans les systèmes de culture du futur.

### 3. Quels approches, méthodes, outils sont nécessaires et disponibles ?

#### *L'intérêt de la modélisation pour réaliser des prospectives sur les variétés à construire*

La réalisation de telles prospectives ne peut plus s'appuyer seulement sur une très bonne expertise : les systèmes se complexifient, des interactions plus nombreuses et inhabituelles dans les systèmes antérieurs sont à considérer, les échelles auxquelles les impacts doivent être anticipés se sont élargies (effets à long terme, effets sur de larges espaces). Il devient donc de plus en plus nécessaire de recourir à la simulation des impacts de nouvelles combinaisons génétiques, dans des itinéraires techniques prévisibles ou dans des organisations spatiales différenciées des systèmes de culture. Ce moyen ne vise pas à donner la solution à suivre pour les sélectionneurs, mais permet une réflexion plus générale sur les critères de sélection à privilégier, et sur les différentes voies à privilégier ou à abandonner.

Ainsi, par exemple, les modèles de culture actuels ont atteint un niveau de maturité tel qu'on peut les adapter à la diversité variétale existante pour analyser et surtout prévoir le comportement différencié des variétés dans différents milieux pédo-climatiques, mais aussi pour différents types de conduite culturale. Ainsi, Barbottin (2004) a adapté le modèle Azodyn-blé à une diversité de variétés. Ce modèle simule le fonctionnement d'une culture de blé dans des conditions de nutrition azotée variées. L'identification des paramètres variant entre variétés et ayant une influence sur les sorties du modèle a permis de définir ceux qu'il était nécessaire d'estimer avec précision pour attendre du modèle qu'il

simule un comportement différencié des variétés. L'exploration, à l'aide du modèle, de types variétaux non disponibles au catalogue, mais susceptibles d'être construits en sélection, a permis de montrer, par exemple, que les variétés qui se comportaient bien face à des situations de carence azotée, étaient plutôt des variétés à fort poids de mille grains et des variétés tardives, ce qui a été confirmé par des études expérimentales de comportement d'une gamme de génotypes en situation de carence azotée (Le Gouis, 2007).

### ***La nécessité de recourir à des modèles de nature spécifique selon les objectifs attendus***

La prévision du comportement de variétés dans des itinéraires techniques variés, c'est-à-dire quand l'ensemble des techniques appliquées à une culture varie de manière cohérente, suppose de disposer de modèles simulant les effets de ces techniques. Or, si les modèles de culture classiques rendent bien compte de l'effet du climat, et de la disponibilité en azote et en eau, ils sont rarement construits pour rendre compte de l'effet des applications de pesticides (et donc de l'effet des bio-agresseurs correspondants). Dans ce but, un modèle spécifique a été construit pour simuler le comportement du blé à des itinéraires techniques variés, Betha (Loyce *et al.*, 2002). Ce modèle a ensuite été adapté aux variétés en simulant leur comportement grâce, notamment, à leurs résistances variétales et à leur précocité. Ainsi, le modèle permet de simuler le comportement de types variétaux différents dans des itinéraires techniques variés, et donc à la fois d'identifier les variétés les mieux adaptées à des conduites culturales données (Jeuffroy *et al.*, 2009) et d'identifier les itinéraires techniques les mieux adaptés à certains types de variétés (Zhang, 2005).

Si le modèle seul, comme de nombreux modèles d'ailleurs, réalise des erreurs dans la prédiction du comportement des variétés dans des conduites variées, une solution améliorant nettement sa capacité prédictive est de l'utiliser en combinaison avec des résultats observés de comportements variétaux dans des conduites classiques (ce qui est réalisé dans la grande majorité des essais variétaux actuels). De ce fait, le modèle pourrait constituer un outil complémentaire des essais variétés actuels pour obtenir une information supplémentaire sur les performances des variétés dans des conduites moins intensives, sans avoir à multiplier les dispositifs expérimentaux par le nombre de conduites culturales à tester.

### ***Les contraintes à l'échelle de l'exploitation agricole influencent également les performances des variétés : comment le prendre en compte ?***

Les performances des variétés sont parfois très dépendantes des caractéristiques des systèmes de production de l'exploitation agricole dans laquelle elles sont insérées. Ainsi, une étude sur l'évaluation *ex ante* de différents types variétaux de pois d'hiver a montré que les performances variaient non seulement en fonction des conditions pédo-climatiques de culture, mais également en fonction des conditions de semis, elles-mêmes fonction de l'assolement et des ressources en matériel et en hommes de l'exploitation (Vocanson, 2006). En couplant un modèle de simulation de l'organisation du travail dans une exploitation agricole (OTELO), avec un modèle de simulation de l'évolution de la structure du sol en fonction des conditions d'humidité du sol au moment des chantiers de semis et de récolte des cultures de la rotation (SISOL), avec un modèle de simulation du fonctionnement d'une culture de pois (AFISOL), on a montré que l'évaluation des variétés était sensiblement différente dans des conditions d'essais de type sélectionneur (c'est-à-dire en optimisant les conditions de semis) et dans des conditions de culture au sein d'une exploitation, dont la date de semis était imposée par les contraintes de calendrier de travail au sein de l'exploitation (Tableau 1).

**Tableau 1.** Coefficients de variation simulés du rendement en fonction du type de pois et des conditions de culture. (D'après Vocanson, 2006)

	Date de semis optimisée	Date de semis imposée par les contraintes de l'exploitation agricole
		Sans risque de gel
Pois de printemps	10%	19%
Pois d'hiver hr	8%	12%
Pois d'hiver Hr	7%	8%

***L'échelle du système de culture pour évaluer les variétés à construire est parfois indispensable***

La recherche de variétés innovantes de colza pour réduire les risques de flux de gènes intraspécifiques entre parcelles (qui peuvent affecter la qualité des productions) nécessite d'appréhender les effets à des échelles supra-parcellaires. Alors que les généticiens disposent d'innovations génétiques originales, l'étude de leur impact sur les flux de gènes ne peut pas être réalisée à partir d'expérimentations, le moyen de travail classiquement mobilisé pour étudier les impacts d'une nouvelle variété. De ce fait, ils se sont tournés vers les agronomes pour utiliser un modèle simulant l'effet des systèmes de culture (Fargue, 2002). Le modèle mobilisé, GeneSys-colza (Colbach *et al.*, 2001) simule l'effet de la répartition géographique des parcelles de colza dans une région, des successions de cultures, des itinéraires techniques appliqués sur chaque parcelle et des caractéristiques variétales utilisées dans chaque parcelle. Les innovations variétales consistaient en des variétés naines, mâle-stériles, cléistogames ou à très faible productivité. Le modèle a été renseigné avec les paramètres des lignées considérées. Puis des simulations, dans différents paysages agricoles ont été réalisées pour quantifier les effets sur le taux d'impuretés des récoltes liés aux flux intraspécifiques de gènes.

Le Tableau 2 résume les taux d'impuretés simulés pour chaque innovation variétale en pourcentage des taux d'impuretés simulés pour le témoin. Les simulations montrent que les associations variétales (comportant 80% de mâles stériles) sont sensibles à la pollinisation croisée venant des colzas voisins, comme les colzas à très faible rendement. Le caractère de cléistogamie (forte autogamie et faible émission de pollen) stable n'apporte par contre qu'un faible avantage en terme de protection contre la contamination. Le nain cléistogame est, quant à lui, très sensible à ces flux et présente des taux d'impuretés élevés. En revanche, tous ces colzas contribuent eux-mêmes beaucoup moins aux flux intraspécifiques que des colzas conventionnels. En particulier, le colza nain cléistogame et le colza à faible rendement ne présentent que de très faibles risques d'échappée des gènes.

**Tableau 2 :** Résultats de simulations avec le modèle GeneSys-colza, sur les risques de flux intraspécifiques de différentes innovations variétales en colza (d'après Fargue, 2002).

Innovation variétale	Taux d'impuretés de la récolte	
	Pour l'innovation variétale	Contribution de l'innovation variétale aux flux intraspécifiques
Témoin	100	100
Association variétale (80% de mâles stériles)	159	52
Cléistogame	94	79
Nain cléistogame	278	9
Pharmaceutique (variété à très faible rendement)	145	14

### ***La modélisation à l'échelle du paysage : un outil indispensable pour raisonner la durabilité des résistances variétales***

Enfin, certains impacts de l'utilisation de variétés dans les systèmes de culture ne sont visibles qu'à une échelle spatiale plus large que la parcelle et plus longue que le cycle cultural. C'est typiquement le cas pour la question de la durabilité des résistances variétales. En effet, l'utilisation des variétés dans l'espace agricole, combinée à la localisation des pratiques agricoles, influence considérablement l'évolution de la structure génétique des pathogènes, et donc l'évolution des résistances variétales. Pour proposer des outils d'aide au raisonnement de la gestion spatiale des combinaisons variétés-pratiques, des modèles spatialement explicites ont déjà été développés. Ainsi, sur le colza, le contournement des résistances variétales au phoma a été observé depuis déjà plusieurs années (Rouxel *et al.*, 2003), en lien avec l'utilisation massive de certains gènes de résistance présents dans les variétés les plus cultivées. Or, le travail du sol (favorisant ou non l'enfouissement des résidus, Schneider *et al.*, 2006), la date de semis (positionnant plus ou moins favorablement les stades sensibles de la plante vis-à-vis du phoma au moment des pics d'émission de spores du champignon), la taille des parcelles et la localisation spatiale des variétés (favorisant les flux de spores entre parcelles et l'arrivée de spores sur des parcelles contenant du colza), la densité de semis et la fourniture d'azote dans les premières phases de croissance (favorisant le développement des feuilles, et augmentant ainsi la surface de feuilles réceptrice de spores, Aubertot *et al.*, 2004) sont des pratiques culturales qui peuvent significativement influencer le développement de la maladie dans les parcelles de colza au sein d'une petite région. Un modèle spatialement explicite, SIPPOM-colza a donc été construit, prenant en compte tous les éléments techniques, dans le but d'imaginer les organisations spatiales des systèmes de culture (dont le choix variétal) favorisant la durabilité des résistances variétales (Lô-Pelzer, 2008). L'utilisation de ce modèle a montré l'impact, sur la durabilité des résistances, de localisations raisonnées des variétés, selon leurs gènes de résistance, et selon les modes de conduite culturale qui leur sont appliqués.

### **Conclusion**

Afin de définir des stratégies de production qui soient à la fois plus durables et économiquement viables, on doit donc envisager un autre paradigme, basé sur l'optimisation de l'interaction entre le génotype, l'environnement et les pratiques agricoles. L'environnement est ici défini au sens écologique, comme l'ensemble des composantes qui déterminent le fonctionnement de l'écosystème agricole : les plantes cultivées dépendant des conditions climatiques et de leurs variations, des ressources fournies par l'écosystème local (eau, minéraux, matière organique), des communautés régulatrices présentes dans le sol mais aussi des interfaces entre des communautés d'espèces compétitrices au sein du même étage trophique (mauvaises herbes, autres espèces cultivées) ou des communautés d'autres étages trophiques comme les bioagresseurs et les auxiliaires. Récemment, de nombreux outils et méthodes ont été développés pour quantifier les impacts sur des critères nouveaux, ou appréhendables à long terme ou sur des espaces supérieurs à la parcelle, ce qui est difficilement réalisable par les moyens expérimentaux classiques. Les connaissances nouvelles produites par ces outils, pour adapter la sélection et l'évaluation des variétés aux nouveaux systèmes de production attendus pour le futur, devraient permettre de revisiter les objectifs de sélection et les moyens mis en œuvre pour l'évaluation des variétés. Il reste cependant une étape importante à franchir, qui réside dans l'appropriation de ces outils par les acteurs, qui sera d'autant plus facile qu'ils auront été construits avec eux, en cohérence avec les contraintes et l'évolution nécessaire de leurs propres activités (Prost, 2008).

## Références bibliographiques

- Aubertot J.N., Pinochet X., Doré T., 2004. The effects of sowing date and nitrogen availability during vegetative stages on *Leptosphaeria maculans* development on winter oilseed rape. *Crop Protection* 23, 635-645.
- Austin R.B., 1999. Yield of wheat in the United Kingdom: Recent advances and prospects. *Crop Sci.* 39, 1604–1610.
- Austin R.B., Bingham J., Blackwell R.D., Evans L.T., Ford M.A., Morgan C.L., Taylor M., 1980. Genetic improvements in winter wheat yields since 1900 and associated physiological changes. *J. Agric. Sci. (Cambridge)* 94, 675–689.
- Ballot, R., 2009. Prise en compte dans les indicateurs de rentabilité de facteurs agronomiques intervenant entre cultures se succédant. Mémoire de fin d'études, ESA, 132p.
- Barbottin A., 2004. Utilisation d'un modèle de culture pour évaluer le comportement des génotypes: pertinence de l'utilisation d'Azodyn pour analyser la variabilité du rendement et de la teneur en protéines du blé tendre. Thèse de Doctorat, INA P-G, 178p. + annexes.
- 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 Sci.* 43, 37-45.
- Brown J.K.M., 2008. Breeding for disease resistance as an integral component of crop protection. *Proceedings, ENDURE International Conference: Diversifying crop protection, 12-15 October 2008 La Grande-Motte, France: O.02*  
[\[http://www.endure-network.eu/international\\_conference\\_2008/proceedings/monday\\_october\\_13\]](http://www.endure-network.eu/international_conference_2008/proceedings/monday_october_13)
- Colbach N., Clermont-Dauphin C., Meynard J.M., 2001. GENESYS-COLZA: a model of the influence of cropping system on gene escape from herbicide tolerant rapeseed crops to rape volunteers. II. Genetic exchanges among volunteer and cropped populations in a small region. *Agric. Ecosyst. Environ.* 83, 255–270.
- De Cara S., Jacquet F., Reynaud A., Goulevant G., Jeuffroy M.H., Lucas P., Montfort F., 2009. Economic analysis of summer fallow management to reduce take-all disease and N-leaching in a wheat crop rotation, *Environmental Modelling and Assessment*, sous presse.
- Dejoux J.F., 1999, Evaluation agronomique environnementale et économique d'itinéraires techniques du colza d'hiver en semis très précoces, *Thèse de Doctorat INA P-G*
- Fargue A., 2002. Maîtrise des flux de gènes chez le colza: étude ex ante de l'impact de différentes innovations variétales, Thèse INA P-G, Paris, 168 p.
- Hochereau F., 2008. Du Productivisme à l'Agriculture Durable. Les vicissitudes de la prise en compte des résistances variétales dans la sélection du blé. In : C. Bonneuil, G. Denis et J.-L. Mayaud (Eds.), *Les chercheurs et l'agriculture. Science et agriculture en France depuis la fin du 19e siècle*, Paris, L'Harmattan-Quae,
- International Assessment of Agriculture knowledge, Science and Technology for Development, 2008. *Agriculture at a crossroads. Global report*, 606 p.
- Jeuffroy M.H., Bouchard C., Cerf M., Gauffreteau A., Lecomte C., Loyce C., Prost L., Bernicot M.H., Beaufumé J.B., Cuvelier S., Demarquet T., Dobroc D., Du Cheyron P., Laroche A., Leblanc O., Lonnet P., Margalé E., Meausoone M., Monnier J.P., Roussillot C., Sennelard P., Stagnaro G., Van Suyt J., Verger D., Olivier A., 2009. Méthodologies de caractérisation des variétés et proposition de conduites culturales adaptées à une agriculture durable. In *Actes du colloque du 1<sup>er</sup> appel d'offres FSOV*, janvier 2009, Paris, pp 39-45.
- Lamine C., Ricci P., Meynard J.M., Barzman M., Bui S., Messéan A., 2008. The intensification of winter wheat: a path-dependency analysis. *Proceedings, ENDURE International Conference: Diversifying crop protection, 12-15 October 2008 La Grande-Motte, France: O.02*  
[\[http://www.endure-network.eu/international\\_conference\\_2008/proceedings/monday\\_october\\_13\]](http://www.endure-network.eu/international_conference_2008/proceedings/monday_october_13)
- Le Gouis J., 2007. Une Déterminisme génétique de l'adaptation à une alimentation azotée sub-optimale. HDR de l'Université de Lille, 59p.

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. UR LEG INRA. Paris, AgroParisTech. Thèse de doctorat: 262p.

Linhart Y.B., Grant M.C., 1996. Evolutionary significance of local genetic differentiation in plants. *Annual Review of Ecology and Systematics* 27, 237-277.

Lô-Pelzer E., 2008. Modélisation des effets des systèmes de culture et de leur répartition spatiale sur le phoma du colza et l'adaptation des populations pathogènes responsables de la maladie (*Leptosphaeria maculans*) aux résistances variétales. Thèse de docteur de l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro Paris Tech).

Loyce C., Rellier J.P., Meynard J.M., 2002. Management planning for winter wheat with multiple objectives (2): ethanol-wheat production. *Agric. Syst.* 72, 33-57.

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 P., Méausoone M., Doussinault G., 2008. Interaction between cultivar and crop management effects on winter wheat diseases, lodging, and yield. *Crop Prot.* 27, 1131-1142.

Meynard J.M., Girardin P., 1991. Produire autrement. *Le Courrier de la Cellule environnement de l'INRA*, 15, 1-19.

Meynard J.-M., Savini I., 2003. La désintensification. Point de vue d'un agronome. Dossier de l'environnement n°24.

Morand-Prieur M.-E., 2003. Evolution et maintien d'un système de reproduction polymorphe. Approche génétique et écologique de la polygamie chez le frêne commun, *Fraxinus excelsior* L. Thèse de Doctorat, ENGREF, Paris, France, 155 p.

Prost L., 2008. Modéliser en agronomie et concevoir des outils en interaction avec de futurs utilisateurs : le cas de la modélisation des interactions génotype-environnement et de l'outil DIAGVAR. Thèse de Docteur de l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro Paris Tech).

Ricci P., Lamine C., Barzman M., 2008. La protection intégrée des cultures : construire et favoriser une gestion écologique de la santé des plantes. Rapport scientifique à mi-parcours du programme GEDUPIC (ANR-06-PADD-59000122), 35p.

Rouxel T., Penaud A., Pinochet X., Brun H., Gout L., Delourme R., Schmit J., Balesdent M.H., 2003. A 10-year survey of populations of *Leptosphaeria maculans* in France indicates a rapid adaptation towards the Rlm1 resistance gene of oilseed rape. *European Journal of Plant Pathology* 109, 871-881.

Sauvant D., Dijkstra J., Meryens D., 1995. Optimisation of ruminal digestion : a modelling approach. In : M. Journet, E. Grenet, M.-H. Farce, M. Theriez, C. Demarquilly (Eds.), *Recent developments in the Nutrition of Herbivores. Proceedings of IVth International Symposium on the Nutrition of herbivores*, INRA Editions, Paris, pp 143-165

Schneider O., Roger-Estrade J., Aubertot J.N., Doré T., 2006. Effect of seeders and tillage equipment on the vertical distribution of oilseedrape stubble. *Soil and Tillage Research* 85, 115-122.

Trottet M., Doussinault G., 2002. Analyse du progrès génétique chez le blé tendre au cours du XXème siècle. *Le Sélectionneur Français* 53, 3-18.

Vocanson A., 2006. Evaluation ex ante d'innovations variétales en pois d'hiver (*Pisum sativum* L.) : approche par modélisation au niveau de la parcelle et de l'exploitation agricole. Thèse de Doctorat, INAPG, Paris, 250p. +annexes.

Zhang X.Y., 2005. Modélisation de la réponse des variétés de blé au niveau d'intensification. Influence de la pression de maladies foliaires, Thèse de Doctorat INA P-G, 98p.

Zhang X.Y., Loyce C., Meynard J.M., Savary S., 2006. Characterization of multiple disease systems and cultivar susceptibilities for the analysis of yield losses in winter wheat. *Crop Protection*, 25, 1013-1023