

Agronomie

environnement & sociétés



La revue de l'association française d'agronomie

Défi alimentaire et Agronomie

Enjeux alimentaires : quels défis pour l'agronomie ?

Rendements et qualité sont-ils conciliables ?

Nouvelles structurations et fonctionnement des bassins de production alimentaire.

Quelle utilisation de l'espace en zone rurale et périurbaine ?

Défi alimentaire, politiques agricoles, environnement.



Conception et conduite de systèmes de culture céréalières conciliant quantité et qualité

Design and management of cereal-based cropping systems to reconcile quantitative and qualitative performances

Chantal Loyce^{*a}, Marie Hélène Jeuffroy^b

^aAgroParisTech, UMR 211 Agronomie, F-78850 Thiverval-Grignon

^bINRA, UMR 211 Agronomie, F-78850 Thiverval-Grignon

*auteur correspondant. Loyce Chantal, maître de conférences en agronomie, AgroParisTech, Chantal.Loyce@grignon.inra.fr

Résumé

On assiste actuellement à une demande accrue de produits agricoles végétaux tandis que les exigences de qualité deviennent de plus en plus précises et diversifiées. Comment adapter les systèmes de culture céréalières à cette nouvelle donne ? Quels sont les leviers mobilisables pour concilier quantité et qualité ? Leur mise en œuvre est-elle compatible avec une évolution des systèmes de culture vers des modes de production à haute valeur environnementale ?

Cet article vise à faire le point sur les travaux menés en agronomie sur la conception de systèmes de culture céréalières conciliant quantité et qualité. Nous présenterons les processus impliqués dans l'élaboration des quantités et des qualités produites. Nous analyserons ensuite les effets conjoints de l'environnement et des systèmes de culture sur la quantité et la qualité à partir de données sur les pratiques agricoles. Enfin, nous présenterons des exemples de travaux menés sur la conception de systèmes de culture en vue de concilier quantité et qualité.

Mots-clés : Qualité ; rendement ; céréales ; agronomie.

Summary

While there is a higher demand for agricultural products, the quality requirements are more and more precise and diverse. How cropping systems should adapt to these new requirements? What are the possible technical leverage points to reach both sufficient quantity and good quality? Are these cropping systems compatible with other goals such as a high environmental value?

This article aims at summing up the findings of agronomic studies on the design of cropping systems reconciling quantity and quality.

First, the processes involved in building-up the volume and the quality of agricultural products are recalled. Then we analyse the effects of environmental conditions and cropping systems on the quantity and quality of products based on agricultural practices data. Finally, we provide some examples of studies aiming at designing cropping systems targeting both sufficient quantity and required quality.

Keywords : Quality product ; quantity product ; cereals ; agronomy.

Introduction

Dans un contexte de demande accrue en produits agricoles végétaux pour des débouchés variés (alimentation animale, humaine, biomasse pour la production d'énergie, composés pour la chimie verte), on assiste à une recrudescence des enjeux portant sur les quantités produites. Par ailleurs, les exigences de qualité deviennent de plus en plus précises, nombreuses et diversifiées. Comment adapter les systèmes de culture céréalières à ce double objectif : accroître les quantités produites tout en garantissant un ensemble d'exigences sur la qualité des produits récoltés pour chaque débouché visé ?

Classiquement, en production céréalière, la production quantitative est principalement exprimée par le rendement. Or, d'autres indicateurs pourraient être davantage mobilisés, comme l'efficacité d'utilisation des intrants et des ressources (eau, éléments minéraux, énergie, etc.), critère plus adapté au contexte de raréfaction des ressources, car exprimé par unité d'intrant disponible (Keating *et al.*, 2010). La qualité des produits céréalières, quant à elle, a longtemps été exprimée essentiellement par la teneur en protéines des grains, qui traduit la qualité technologique des produits récoltés. Pourtant, la qualité des produits recouvre différentes composantes : technologique, mais aussi sanitaire (par exemple, la teneur en mycotoxines des céréales) ou nutritionnelle (ex : teneurs en minéraux - magnésium, fer, zinc, etc. - pour le blé panifiable). La pertinence, la hiérarchisation et la définition des critères utilisés pour décrire la qualité des produits dépendent en grande partie des débouchés concernés (alimentation humaine, animale, non alimentaire). Enfin, la traduction de la qualité du produit fini en caractéristiques

téristiques des produits récoltés, ayant un lien avec les processus biologiques des systèmes de culture, n'est pas aisée. À titre d'exemple, les caractéristiques de l'alvéographe de Chopin (W, G notamment), qui expriment l'aptitude à la panification d'une farine, ne s'avèrent que partiellement reliées à la teneur en protéines des grains de blé. Elles s'expliquent davantage par les proportions relatives des types de protéines de réserve que sont les gliadines et les gluténines (Godon, 1981).

Alors que la teneur en protéines à l'échelle de la benne livrée par un agriculteur a constitué, jusque récemment, pour certains organismes de collecte, un élément contribuant à l'élaboration du prix du blé payé au producteur (bonus ou malus appliqué par rapport à une teneur de référence), la variabilité ou la stabilité de ce critère entre parcelles à l'échelle d'un bassin de collecte joue directement sur la logistique de ces organismes. Une plus grande régularité de la teneur en protéines entre parcelles est ainsi recherchée par une entreprise de collecte-stockage en orge de printemps pour une valorisation brassicole (Le Bail, 1997). Certaines techniques (comme, par exemple, les associations céréales/légumineuses) permettent d'accroître la stabilité de la teneur en protéines des grains par rapport à un blé cultivé seul (Bedoussac et Justes, 2010).

On parle généralement « d'antagonisme » entre quantité et qualité. Qu'en est-il exactement ? Quels sont les leviers techniques potentiellement mobilisables pour concilier quantité et qualité ? La mise en œuvre de ces leviers est-elle compatible avec une évolution des systèmes de culture vers des modes de production à haute valeur environnementale ?

Cet article vise à faire le point sur les travaux menés par les agronomes sur la conception et le pilotage de systèmes de culture céréalières conciliant quantité et qualité.

Dans un premier temps, nous présenterons les processus écophysologiques impliqués dans l'élaboration des quantités et des qualités produites. Une analyse des effets conjoints de l'environnement et des systèmes de culture sur la quantité et la qualité sera ensuite menée à partir de données recueillies sur les pratiques agricoles. Enfin, nous présenterons des exemples de travaux menés sur la conception et le pilotage des sys-

tèmes de culture en vue de concilier quantité et qualité.

Quels sont les processus écophysologiques impliqués dans l'élaboration des quantités et qualités produites ?

Un certain nombre de travaux ont porté sur la compréhension des processus qui régissent l'élaboration des quantités et qualités produites par les cultures. Ainsi, dans le cas du blé tendre, l'élaboration du rendement et de la teneur en protéines dépend des métabolismes carbonés et azotés au sein de la culture. Dans les modèles de culture, comme présenté sur la figure 1, ils sont le plus souvent représentés par une confrontation entre une offre et une demande en éléments carbonés et azotés (Jeuffroy et Recous, 1999 ; Jeuffroy *et al.*, 2000a ; Brisson *et al.*, 2003) et pour certains modèles, une simulation des fractions protéiques des grains, notamment les contenus en gliadines et gluténines (Martre *et al.*, 2006). À l'échelle de la culture, pour l'élaboration du rendement, l'offre dépend notamment de la photosynthèse (pour l'offre en carbone) et de l'absorption d'éléments azotés en provenance du sol (incluant ceux fournis par des engrais minéraux ou organique), tandis que la demande est régie par la croissance potentielle du peuplement. L'élaboration de la teneur en protéines mobilise également le processus de remobilisation de ces assimilats pendant la phase de remplissage des grains. En effet, l'azote contenu dans les grains à la récolte provient principalement (pour 75% en moyenne) de l'azote stocké avant floraison dans les organes végétatifs. Cependant, l'absorption d'azote post-floraison par la culture est un processus essentiel permettant de modifier la teneur en protéines : c'est pourquoi des apports tardifs d'azote (peu avant floraison), s'ils sont bien valorisés par la culture (notamment grâce à une disponibilité hydrique suffisante dans le sol) peuvent permettre d'accroître cette teneur.

La teneur en protéines des grains est proportionnelle au rapport entre la quantité d'azote et la matière sèche stockées dans les grains à la récolte : elle résulte ainsi des métabolismes carbonés et azotés du peuplement et elle est étroitement liée aux quantités de grains récoltées. D'un point de vue strictement mathématique, à même

quantité d'azote accumulée, quand le rendement augmente, la teneur en protéines des grains diminue.

A partir du modèle Azodyn (Jeuffroy *et al.*, 1999 ; Jeuffroy *et al.*, 2000a) qui simule le fonctionnement d'une culture de blé en conditions de nutrition azotée variées, l'importance de la période préfloraison dans le déterminisme de la teneur en protéines à la récolte a été mise en évidence. En effet, alors que l'accumulation d'azote et de matière sèche dans les grains se déroule uniquement après floraison, l'état du peuplement à ce stade, caractérisé par son stock d'azote dans les organes végétatifs et par le nombre de grains formés, a une grande influence sur la demande en carbone et en azote des grains et l'absorption d'azote post-floraison, processus déterminants de la teneur en protéines. Pour atteindre un objectif de teneur en protéines donné, il est donc nécessaire de raisonner la conduite culturale, et en particulier la fertilisation azotée, sur l'ensemble du cycle de culture.

Un résultat proche a été observé par Le Bail et Meynard (2003) sur l'orge de brasserie : les facteurs limitant le rendement en première phase du cycle (notamment la compaction du sol qui limite l'absorption d'azote par la culture) sont également apparus comme limitant la teneur en protéines. Les analyses de sensibilité qui ont été menées avec le modèle Azodyn indiquent également que la teneur en protéines est très sensible au climat post floraison (variation de deux points de protéines entre scénarios climatiques d'un même lieu pour un état azoté donné au stade floraison (Jeuffroy *et al.*, 2000a), en particulier pendant la première moitié de la période de remplissage. Enfin, les expérimentations menées par Barbottin *et al.* (2005) ont montré que les variétés résistantes aux maladies auraient une meilleure capacité à maintenir une bonne efficacité de remobilisation de l'azote en conditions de forte pression de maladies foliaires. Ces résultats demanderaient à être confirmés en mobilisant une plus large gamme de variétés, en particulier celles qui se trouvent être bien adaptées à des faibles apports en azote, comme illustré dans les travaux de Le Gouis *et al.* (2000).

Au-delà du blé, Munier-Jolain et Salon (2005) ont mené une étude sur 18 espèces cultivées pour étudier l'impact d'une modification de la composi-

tion des graines récoltées sur la production. Cette réflexion se fonde sur des calculs théoriques de coûts énergétiques de production des graines et de données de rendement. Une relation négative a été mise en évidence entre la composition des grains et le rendement : les céréales (ex : blé, maïs, riz, orge), dont les grains sont riches en amidon, présentent les rendements les plus élevés, les oléagineux (ex : tournesol, colza, soja) ont les rendements les plus faibles et les protéagineux (ex : lupin, pois), dont le contenu des graines est riche en protéines, ont des rendements intermédiaires. Ces résultats suggèrent des voies de progrès possibles (au plan génétique notamment) pour que les espèces appartenant à la même catégorie (céréales, oléagineux, protéagineux) se positionnent sur les mêmes lignes d'isoproduction¹ (IP) présentées sur la figure 2, qui constituent en quelque sorte une « limite » éco-physiologique potentiellement accessible.

Pour des critères de qualité des céréales autres que la teneur en protéines pour le blé ou l'orge, ou les composés volatiles pour les riz aromatiques (Gay *et al.*, 2010 ; Nagarajan *et al.*, 2010 ; Mathure *et al.*, 2011), le corpus de connaissances disponibles apparaît plus lacunaire. C'est le cas par exemple de la teneur en mycotoxines des céréales, qui est apparu comme un critère important de qualité sanitaire dans les années 2000 : l'épidémiologie de la fusariose de l'épi du blé et l'effet des pratiques culturales sur le développement de la fusariose et la production associée des toxines fusariennes ont bénéficié de peu de travaux de recherche en agronomie, comme l'indique la synthèse réalisée par Champeil *et al.* (2004). L'absence de relation simple entre la note de maladie à un stade donné et la teneur en mycotoxines analysée dans les grains, montre la difficulté à prévoir ce dernier critère, pourtant pertinent pour discuter de l'usage des grains.

En conclusion, on voit que les processus qui régissent l'élaboration conjointe des quantités et qualités produites par les céréales sont plus ou moins bien élucidés et qu'ils sont sous la dépendance d'un ensemble de facteurs : (i) la génétique (en particulier la variété, l'espèce), (ii) la conduite des cultures (en particulier la fertilisation azotée), (iii)

¹ Une courbe d'isoproduction donnée exprime une valeur identique prise par le produit entre (i) le coût en carbone de la production d'un gramme de graines et (ii) le rendement.

le milieu (climat, sol, mais aussi les bioagresseurs présents), (iv) et leurs interactions. Ce constat a suscité un ensemble de réflexions relatives à

l'analyse des interactions Génotype x Environnement x Conduite (Cooper et Hammer, 1996 ; Hammer et Jordan, 2007).

Figure 1. Représentation simplifiée du module post-floraison du modèle Azodyn : accumulation de biomasse et d'azote dans les grains de blé (Jeuffroy *et al.*, 2000b)

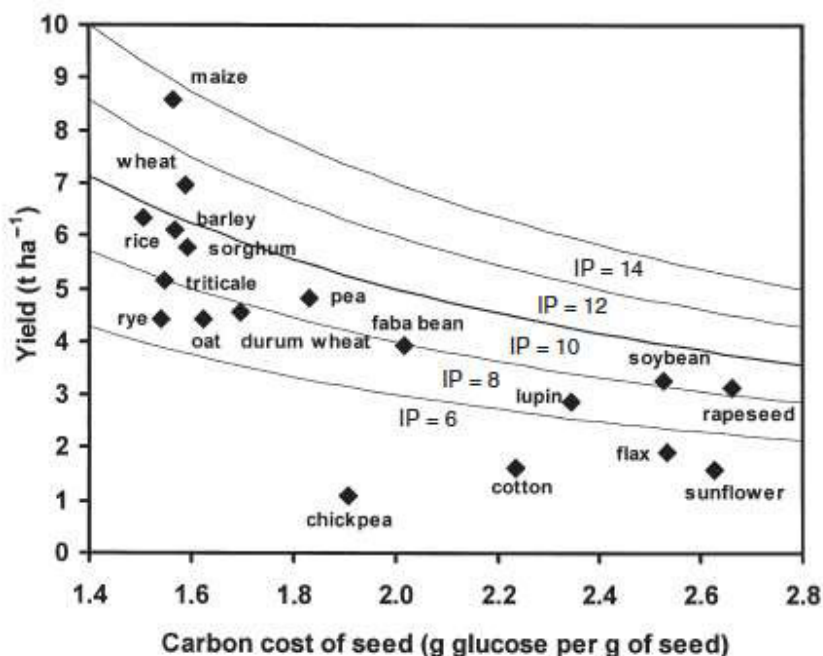
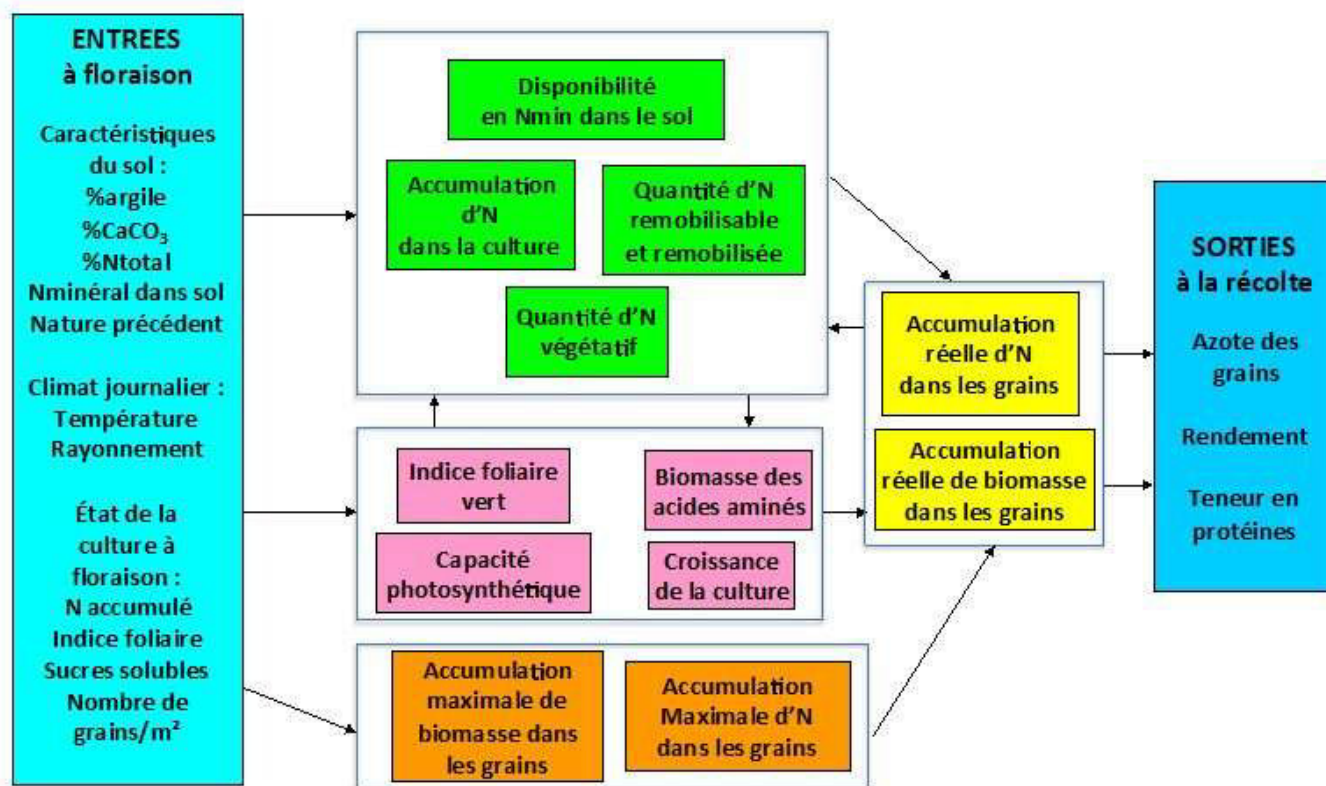


Figure 2. Relation entre le coût en carbone de la production de graines (Carbon cost of seed) pour un ensemble d'espèces et leur rendement (yield) (Munier-Jolain et Salon, 2005).

Maize : maïs ; wheat : blé ; barley : orge ; rice : riz ; sorghum : sorgho ; triticale : triticale ; rye : seigle ; oat : avoine ; durum wheat : blé dur ; pea : pois ; faba bean : féverole ; chickpea : pois chiche ; lupin : lupin ; soybean : soja ; flax : lin ; rapeseed : colza ; sunflower : tournesol

Analyse des effets conjoints du milieu et des systèmes de culture sur la quantité et la qualité des grains produits

Cette analyse s'appuie sur des travaux menés sur des bases de données et des données expérimentales pour (a) caractériser l'évolution temporelle des quantités et qualités produites et (b) sur des diagnostics agronomiques menés à l'échelle d'un réseau de parcelles agricoles dans des petites régions agricoles.

Fan *et al.* (2008) ont mis en évidence une décroissance de la teneur en éléments minéraux (Zn, Cu, Mg, Fe) des grains de blé au cours du temps à partir d'un essai de longue durée (1840-2005) mené au centre de recherches de Rothamsted (Grande-Bretagne). Cette décroissance fait suite à une période de teneur stable en éléments minéraux et débute au milieu des années 60, au moment de l'adoption des variétés à haut potentiel de rendement issues de la révolution verte. Une hypothèse avancée par les auteurs serait que ces variétés favoriseraient la remobilisation des produits de la photosynthèse, au détriment des éléments minéraux. Cette tendance à la décroissance des teneurs en éléments minéraux a également été observée aux Etats-Unis (Garvin *et al.*, 2006 ; Murphy *et al.*, 2008).

Trottet et Doussinault (2002) ont caractérisé l'évolution conjointe des rendements et des teneurs en protéines au cours du temps, sur une période allant de 1945 à 1995, à partir des résultats des essais « variétés » du Comité Technique Permanent de la Sélection (CTPS). Sur le pas de temps retenu pour cette étude, les auteurs ont montré que l'augmentation des rendements s'est accompagnée d'une diminution de la teneur en protéines, en moyenne pour le panel de variétés considérées. Notons toutefois que la teneur en protéines, initialement, n'était pas retenue comme critère d'inscription des variétés au catalogue variétal. Ainsi, alors que l'aptitude à la panification a été considérée, depuis longtemps, comme un objectif de sélection, et un critère d'inscription, important dans les années 1970-1990, la teneur en protéines des blés a, dans la même période, chuté dans les nouvelles variétés inscrites, faute de prise en compte de ce critère lors de l'inscription.

Depuis cette étude, quels sont les éléments nouveaux dont on dispose sur le sujet ? Brisson *et al.* (2010) ont mis en évidence une augmentation des rendements moyens français du blé puis une stagnation à partir du milieu des années 1990 (Figure 3). Les auteurs attribuent cette stagnation au changement climatique, qui occasionne notamment des températures élevées en fin de cycle pénalisant le remplissage des grains en biomasse, et donc le rendement. Toutefois, ils n'écartent pas l'hypothèse d'un effet des pratiques culturales, en particulier le développement de successions de cultures céréalières qui incluent moins de légumineuses et davantage de colza et de blés sur blés, à partir du début des années 2000 (Marcuola *et al.*, 2010). Cet effet du climat est plutôt favorable à la teneur en protéines des grains, d'une part parce que le métabolisme azoté est moins perturbé par des températures élevées que le métabolisme carboné, et d'autre part pour des raisons de concentration de l'azote accumulé dans les grains dans une plus faible quantité de C accumulé dans les grains. Il serait intéressant de conduire une étude similaire relative à l'évolution des teneurs en protéines des grains au cours du temps.

Comme signalé par Newton *et al.* (2011) dans leur synthèse bibliographique, les études relatives aux effets du changement climatique sur la qualité sont plus rares que celles menées sur le rendement. Une méta-analyse de l'effet de l'augmentation de CO₂ sur la qualité des produits récoltés de différentes cultures (à partir de données expérimentales) a été réalisée par Taub *et al.* (2008). La teneur en protéines des grains récoltés diminue quand les plantes sont cultivées à des concentrations de CO₂ élevées, qui correspondent aux projections du GIEC pour 2100 (540–958 $\mu\text{mol mol}^{-1}$), par comparaison aux valeurs ambiantes (315–400 $\mu\text{mol mol}^{-1}$). Dans le cas des céréales (blé, orge et riz), la diminution de la teneur en protéines est de 10–15%. Cette baisse serait due à une diminution de l'azote contenu dans les feuilles (remobilisé ensuite dans les grains), qui résulterait d'une réduction des concentrations de Rubisco, enzyme clé permettant la fixation du CO₂.

Par ailleurs, Kettlewell *et al.* (1999) ont montré comment les variations climatiques, exprimées en terme d'oscillation Nord-Atlantique ont contribué à diminuer l'indice de chute de Hadberg du blé (critère de qualité du blé pour la panification) en

Grande-Bretagne entre 1972 et 1996. Ces mauvais résultats qualitatifs ont entraîné une augmentation des importations de blé pour la meunerie

(passage de 25% à 45% du volume de blé importé d'une année favorable à une année défavorable).

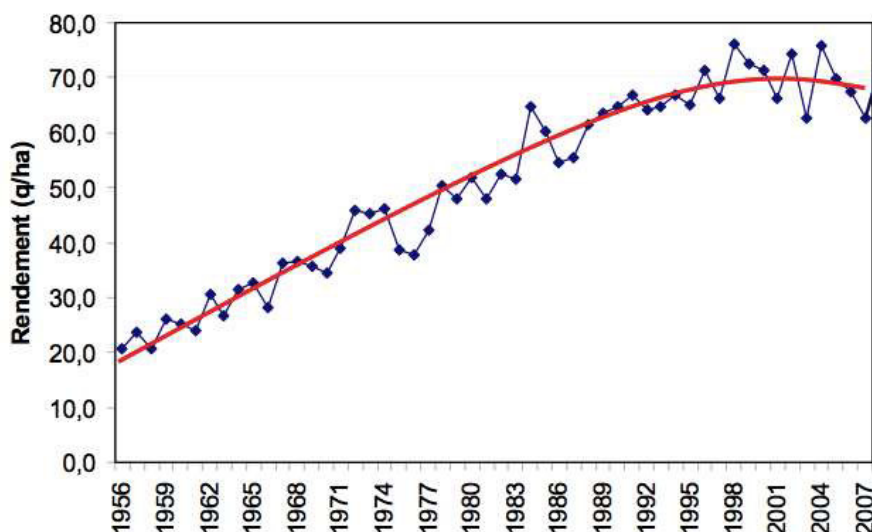


Figure 3. Evolution temporelle du rendement moyen du blé en France (Brisson et al., 2010)

Diagnostic régional de la variabilité des rendements et de la qualité

Cas de la production d'orge de brasserie à l'échelle d'un bassin d'approvisionnement

Dans le cas de l'orge de brasserie, l'objectif visé est une teneur en protéines relativement basse, inférieure à 11,5%, avec un optimum situé autour de 10%. Un diagnostic agronomique, réalisé en Picardie sur une soixantaine de parcelles agricoles pendant trois ans (Le Bail et Meynard, 2003), a montré une grande variabilité, sans tendance notable entre elles, du rendement (25 à 90 q/ha) et de la teneur en protéines des grains (7.7 à 12.6%). Trois composantes expliquent ces variations : l'azote absorbé par la culture, l'efficacité de l'azote pour le nombre de grains et le poids de mille grains. Ces trois composantes ont été particulièrement perturbées par la compaction du sol dans un nombre non négligeable de parcelles, par une fertilisation azotée pas toujours adaptée aux besoins de la culture et par une infestation de piétin échaudage, perturbant également la nutrition hydrique de la culture. En conclusion, ces auteurs ont émis des recommandations techniques permettant de maximiser les chances d'obtenir un rendement élevé et une teneur en protéines dans la gamme requise par les utilisateurs : choix de parcelles dont la réserve utile n'est pas trop faible,

choix de modalité de travail du sol et de date de semis évitant un tassement du sol, raisonnement plus adapté de la fertilisation azotée.

Cas du blé cultivé en agriculture biologique en région Rhône-Alpes

Un diagnostic agronomique en parcelles d'agriculteurs a permis de montrer que (a) ces situations sont marquées par des facteurs limitants fréquents et variés (principalement la compétition des adventices, les carences azotées, et le stress hydrique), qui empêchent la bonne valorisation des engrais azotés épandus, et que (b) l'azote est l'un des facteurs limitant les plus fréquents de la production (David et al., 2005a). De plus, les systèmes biologiques céréaliers sans élevage, qui sont en expansion en France (David et al., 2004) sont confrontés à une disponibilité réduite en azote sur l'exploitation et au coût élevé des engrais organiques. Ils sont souvent peu fertilisés, ce qui accroît le risque de carences azotées dans ces parcelles. Dans ces systèmes, l'utilisation du modèle Azodyn-Org a été testée pour proposer des stratégies de fertilisation azotée permettant d'accroître la teneur en protéines des grains (souvent trop basse en conditions biologiques) et d'optimiser la rentabilité économique des engrais apportés (David et al., 2005b). En particulier, sur la base de la mise en évidence d'une minéralisation rapide des engrais organiques fréquemment ap-

portés, les auteurs ont montré l'intérêt d'apports tardifs d'azote, jusqu'à présent peu recommandés par la filière.

Un second diagnostic a été mis en œuvre sur un réseau de parcelles agricoles de blé biologique dans la même région pour expliquer l'origine des variations observées de la teneur en protéines (7.8 – 15.9%) (Casagrande *et al.*, 2009). Les mêmes facteurs limitants sont apparus significatifs : nutrition azotée et compétition des adventices, ainsi que la variété et les facteurs climatiques post-floraison. La mise en relation de ces facteurs avec les pratiques culturales a amené ces auteurs à recommander un choix variétal tenant davantage compte de la capacité à accumuler des protéines, le choix d'un précédent cultural libérant davantage d'azote (légumineuse) ou l'insertion d'une légumineuse fourragère comme plante de service accompagnant la céréale pendant une partie de son cycle, l'évitement de dates de semis tardives induisant des conditions défavorables de remplissage des grains.

Cas du blé cultivé en agriculture biologique dans la région Ile de France

Champeil (2004) a mené un diagnostic agronomique régional sur un réseau de 27 parcelles de blé biologique pour tenter d'identifier les éléments des systèmes de culture à l'origine des différences de contamination en toxines fusariennes. Ce diagnostic n'a que partiellement permis d'aboutir au résultat escompté. Si le manque de connaissances *a priori* sur le système étudié (évoqué en partie 1) s'est révélé être un handicap, cette expérience a mis en évidence la dépendance de l'efficacité de la démarche vis-à-vis de la distribution de la variable que l'on cherche à expliquer. La variable étudiée (taux de mycotoxines dans les grains de blé) suit en effet une loi de type log-normale décroissante avec un niveau seuil, au-delà duquel le blé est difficilement commercialisable. Dans le diagnostic réalisé, le nombre de parcelles comprenant des teneurs élevées en mycotoxines était très restreint, ce qui génère un accroissement très important des risques de confusion d'effet, et ce d'autant plus que le dispositif mis en place était uniquement fondé sur les parcelles d'enquêtes en exploitations agricoles. Faire un diagnostic régional revient ici à identifier les effets principaux des pratiques agricoles responsables

des teneurs dépassant le seuil de commercialisation (Doré *et al.*, 2007).

Quels enseignements tirer de cette analyse, au-delà des exemples présentés, pour lesquels des recommandations ont été formulées ? Comment mobiliser les connaissances en écophysiologie pour faire évoluer les systèmes de culture en vue de concilier quantité et qualité ? La troisième partie aborde des exemples de travaux allant dans ce sens.

Exemples de travaux menés pour faire évoluer les systèmes de culture afin de concilier quantité et qualité

Choix variétal et gestion de la fertilisation azotée : des leviers souvent mobilisés

Le choix variétal est un levier généralement déjà mis en œuvre par les agriculteurs pour atteindre les objectifs de qualité visés. Par exemple, pour des débouchés alimentaires, les blés classés Blés Panifiables Supérieurs (BPS) ou Blés Améliorants ou de Force (BAF) sont privilégiés. Dans une analyse de la variabilité génétique du couple rendement-teneur en protéines, Oury *et al.* (2003) ont montré qu'il existait une relation négative entre ces deux variables, pour un panel de variétés donné, et que certaines variétés présentaient des caractéristiques de qualité remarquables, caractérisées par un écart positif à la régression (c'est-à-dire une teneur en protéines plus élevée que la moyenne des autres variétés, pour un même niveau de rendement). Sur la base de cette relation, les écarts à la régression "rendement - teneur en protéines" sont pris en compte, depuis 2006, à l'inscription pour attribuer des bonus aux lignées qui, à rendement égal, obtiennent une teneur en protéines significativement plus élevée. Récemment, l'analyse de cette relation en fonction de la variabilité des dates du dernier apport d'azote (variable en termes de stade, selon les variétés, au sein d'un essai variété) a montré que l'écart à la régression était un indicateur suffisamment robuste pour ne pas être perturbé par des décalages de stade d'apport d'azote entre variétés (Jeuffroy *et al.*, 2011) (Figure 4).

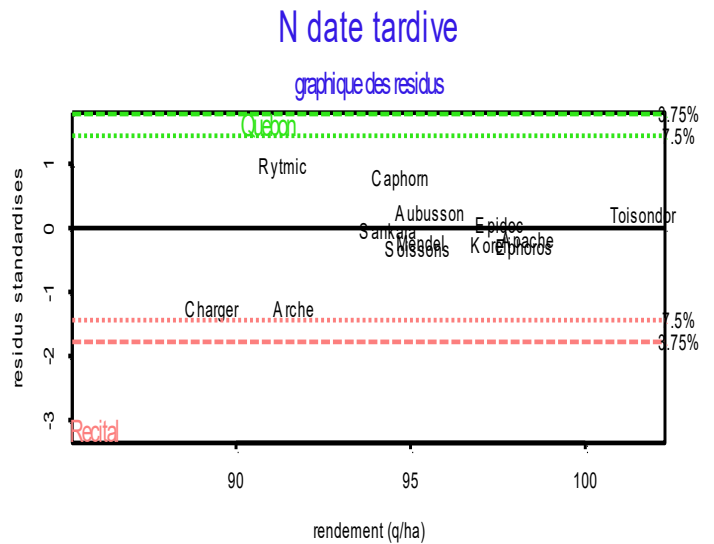
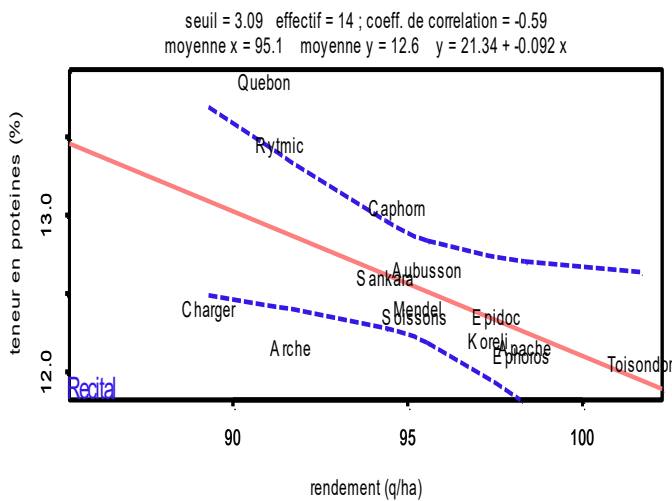
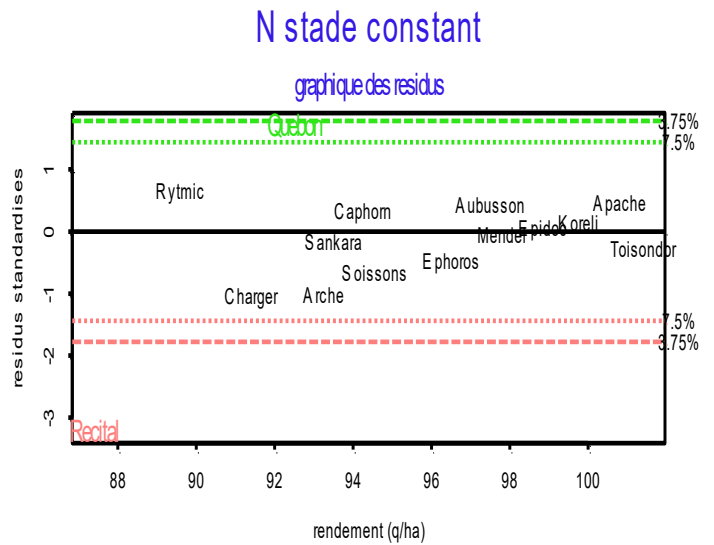
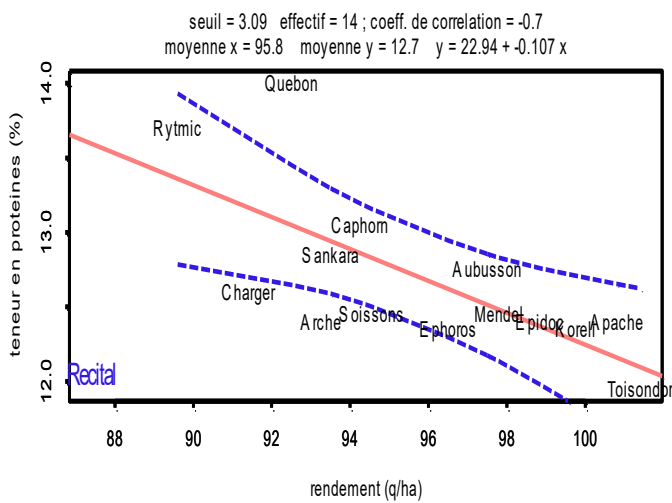
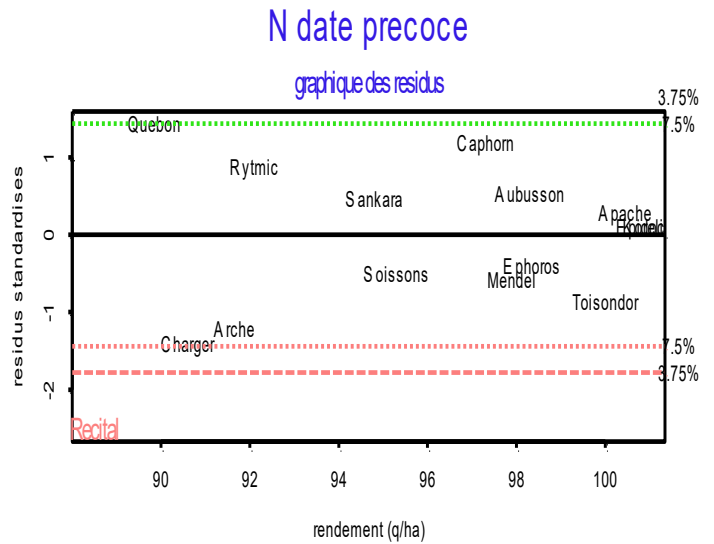
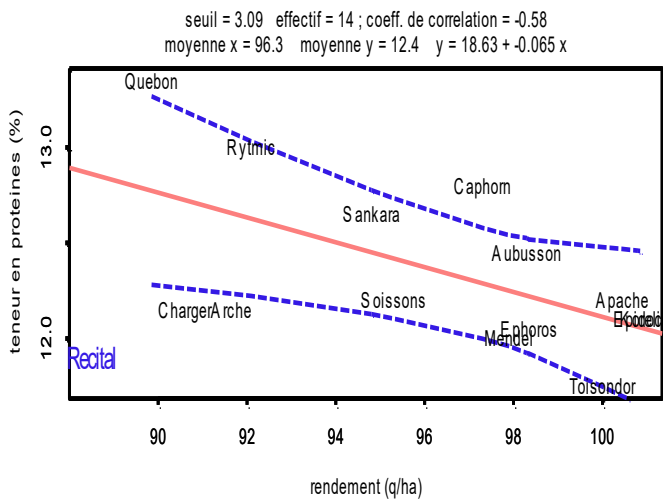


Figure 4. Relation entre le rendement et la teneur en protéines des grains de différentes variétés pour différentes stratégies de dates de troisième apport d'engrais N (figures de gauche) et écarts à la régression calculés sur les moyennes de 8 essais menés en 2007 et 2008 (figures de droite) (Jeuffroy et al., 2011)

Mais, même pour des variétés à haute teneur en protéines, il est souvent nécessaire de bien adapter la fertilisation azotée pour atteindre un objectif de qualité élevé. Ainsi, le troisième apport d'engrais azoté sur blé, réalisé autour du stade gonflement pour être principalement absorbé après floraison et enrichir les grains en azote, est de plus en plus fréquemment appliqué (Rabaud, 2005 ; Agreste, 2011). Cependant, les conditions climatiques à cette période ne sont pas toujours favorables à une bonne valorisation de cet engrais, induisant parfois de forts reliquats d'azote minéral à la récolte. Comme nous l'avons vu précédemment, la teneur en protéines ne se gère pas seulement par des pratiques adaptées autour de la floraison, mais par un raisonnement global de la fertilisation azotée, tout au long du cycle. En utilisant le modèle Azodyn, des stratégies de fertilisation azotée nouvelles, basées sur la maximisation de l'efficacité d'utilisation de l'azote grâce à des apports réalisés à des périodes de besoins en azote importants de la culture et de croissance rapide, ont été testées et montrent que l'on peut obtenir un rendement et une teneur en protéines élevées, tout en minimisant les pertes vers l'environnement (Meynard *et al.*, 2002). Ces stratégies reposent, selon les conditions parcellaires, sur la suppression du 1^{er} apport, le décalage du 2nd et du 3^{ème} apport vers des dates plus tardives, la modification de l'équilibre des doses entre 2nd et 3^{ème} apports.

Une technique efficace pour accroître la teneur en protéines des grains de céréales, en réduisant le recours à la fertilisation azotée, est la culture d'associations céréales-légumineuses. De nombreuses études montrent que, pour des apports d'engrais azoté faibles (voire nuls) sur cette association de cultures, la teneur en protéines du blé peut être accrue de 1 à 2 points (Jensen, 1996). Cette association de cultures permet donc d'atteindre des niveaux de quantité et de qualité satisfaisants, tout en réduisant les pertes vers l'environnement et en réduisant les coûts économiques. Cette technique est d'ores et déjà mobilisée en Agriculture Biologique.

Enfin, au plan nutritionnel, une forte variabilité des teneurs en éléments minéraux dans les grains a été observée en Chine sur 260 génotypes de blé cultivés (Zhang *et al.*, 2010), ouvrant ainsi la voie à une sélection de variétés de blé présentant de

fortes teneurs en éléments minéraux. Des travaux sont également menés pour caractériser la variabilité génétique en matière de présence d'arabinoxylanes, composés présents dans les parois cellulaires de l'endosperme des grains de blé (Charmet *et al.*, 2009) et qui ont des effets bénéfiques sur la santé humaine (diminution du mauvais cholestérol, effet favorable sur la flore du colon).

Conception et évaluation d'itinéraires techniques et de systèmes de culture

A terme, et pour répondre aux exigences du développement durable, les environnements explorés par les cultures de céréales pourraient être moins artificialisés par les intrants, compte tenu des évolutions réglementaires (en particulier, le plan EcoPhyto 2018, qui prévoit une réduction de 50% de l'utilisation des produits phytosanitaires), de l'augmentation du coût des engrais azotés, de la raréfaction prévisible de l'énergie fossile, largement mobilisée pour la fabrication des engrais azotés, et des exigences de réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES), liés pour une large part à la fertilisation azotée appliquée. Dans ces situations, le raisonnement de la fertilisation azotée et du choix variétal devra tenir compte des objectifs de qualité visés, sous peine de mettre en cause les débouchés prévus.

Dans ce sens, des itinéraires techniques à bas niveau d'intrants (semences, fertilisation azotée, fongicides et régulateurs de croissance) ont été mis au point, et testés sur un large réseau de parcelles agricoles, attestant de la possibilité de mettre en œuvre ces techniques innovantes sans remettre en cause l'atteinte des objectifs conjoints de quantité et de qualité, au bénéfice de l'environnement (Loyce *et al.*, 2012). Une adaptation précise de la fertilisation azotée a cependant dû être réalisée, pour garantir l'atteinte de teneurs en protéines satisfaisantes pour les utilisateurs.

Testés sur une longue période (12 ans), des systèmes de culture alternatifs (bas niveau d'intrants ou sans travail du sol) n'ont pas présenté de variabilité accrue du rendement par rapport au système de culture conventionnel, excepté pour le système en agriculture biologique sans apport d'azote organique exogène (Smith *et al.*, 2007).

Par ailleurs, les associations variétales apparaissent comme une technique intéressante pour ac-

croître et stabiliser la teneur en protéines des grains de blé, tout en maintenant un niveau de rendement élevé (Belhadj Fraj, 2003). En effet, en conduite de culture intégrée, grâce à leur efficacité pour résister contre les maladies aériennes, et à la complémentarité des systèmes racinaires des variétés qui composent le mélange, ces associations valorisent davantage l'azote apporté et permettent d'atteindre des teneurs en protéines plus élevées, de 0.54 points en moyenne sur le réseau de parcelles agricoles testé dans ce travail (Figure 5).

Parmi les techniques alternatives d'intérêt, notamment en Agriculture Biologique, l'implantation d'une légumineuse culture de service en relais

dans un blé déjà bien développé semble une alternative intéressante pour apporter de l'azote dans le système et pour favoriser la maîtrise des mauvaises herbes, notamment pendant l'interculture. Cependant, les premiers résultats sur de tels systèmes testés en France montrent que, si le rendement du blé est très rarement affecté par la compétition exercée par la légumineuse, la teneur en protéines est plus souvent réduite (Amossé et al., communication personnelle sur travaux en cours). Des travaux supplémentaires sont donc nécessaires pour identifier les conditions favorables à l'expression des services rendus par la légumineuse et à l'atteinte d'un rendement et d'une teneur en protéines élevés pour le blé.

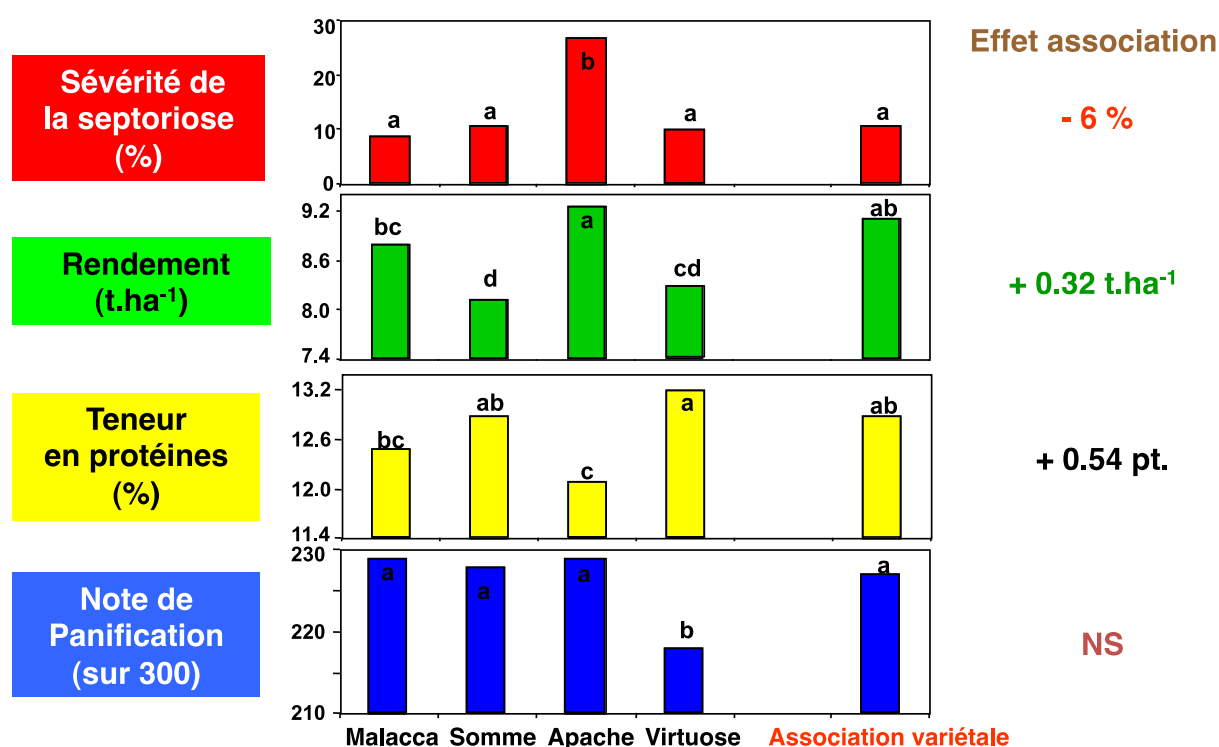


Figure 5. Effet des variétés de blé cultivées en peuplement purs et en associations sous conduite à bas niveaux d'intrants sur la sévérité de la septoriose, le rendement, la teneur en protéines et la note de panification. Résultats issus de deux années sur 19 parcelles et 190 ha (Belhadj Fraj, 2003).

Conclusion

Beaucoup de travaux de recherche ont été réalisés en agronomie sur le blé tendre d'hiver et sur la relation entre le rendement et la teneur en protéines des grains, en réponse à une demande forte des différents débouchés en matière de protéines (pour la panification, mais aussi l'amidonnerie et l'alimentation animale). Les résultats de ces études indiquent que le rendement et la qualité ne sont pas toujours antagonistes et que des

différences variétales peuvent être valorisées. Un ensemble de leviers techniques a également été identifié pour concilier rendement et teneur en protéines. Actuellement, ces résultats se sont traduits par des modifications sensibles des pratiques agricoles en France, comme l'augmentation des stratégies de fertilisation azotée fondées sur le fractionnement en trois apports. Plus récemment les pratiques d'inscription des variétés en France ont également évolué, avec l'octroi d'un bonus pour les variétés qui s'écartent de la rela-

tion antagonique entre le rendement et la teneur en protéines.

Pour les cultures oléagineuses en grandes cultures (colza, tournesol), les relations entre production quantitative et qualitative sont différentes (Champolivier *et al.*, 2011). D'une part, il est possible de concilier rendement et teneur en huile car ces critères évoluent dans le même sens. D'autre part, une fertilisation azotée excessive peut pénaliser la teneur en huile du colza ou du tournesol sans entraîner d'augmentation du rendement.

A terme, il serait intéressant de développer des travaux de recherche en agronomie sur la conception de conduites de blés à haute valeur nutritionnelle (à la fois riches en protéines, minéraux et micro-nutriments), en complément des travaux initiés sur le sujet en génétique et en sciences des procédés (sur l'itinéraire technologique des industries céréalières). De même, les relations entre quantités et qualités produites par les céréales pour des valorisations non alimentaires (chimie verte, biomasse pour la production d'énergie) posent de nouvelles questions. Ces valorisations peuvent en effet concerner la plante entière ou les pailles : peu de références sont aujourd'hui disponibles sur les quantités produites tandis que les critères de qualité sont en cours de construction pour certaines filières émergentes ou encore peu étudiés (comme le contenu en lignine des pailles par exemple).

Enfin, deux mouvements sont actuellement à l'œuvre : des marchés céréaliers caractérisés par des demandes croissantes en quantité et qualité, et les évolutions pressenties vers des modes de production tournés vers l'agroécologie, avec notamment le souhait d'incorporer la diversité végétale, du spatial au temporel (associations, mosaïques, cultures relais, rotations). Quelle dialectique créer entre ces deux mouvements ? Seront-ils redevables de deux segments de valorisation des céréales distincts ou complémentaires, comme évoqué par Abecassis et Bergez (2009), avec d'un côté, des marchés plus centrés sur les volumes (par exemple à l'export), et de l'autre des filières plus locales avec des demandes de qualité spécifique et des modes de production respectueux de l'environnement ?

Bibliographie

Abecassis, J., Bergez, J.E, Aizac, B., Charcosset, A., Dedryver, C.A., Grefeuille, V., Jacquet, F., Jez, C., Lessire, M., Rastouin, J.L., Rousset, M., 2011. *Les filières céréalières. Organisation et nouveaux défis*. INRA. Editions QUAE, 165 p.

Agreste, 2011. Enquêtes pratiques culturales 2006. Superficies en blé tendre selon le nombre d'apports d'azote minéral. www.agreste.agriculture.gouv.fr (consulté le 12/09/11).

Barbottin, A., Lecomte, C., Bouchard, C., Jeuffroy, M.H., 2005. Nitrogen remobilization during grain filling in wheat: genotypic and environmental effects. *Crop science*, 45, 1141-1150.

Bedoussac, L., Justes, E., 2010. The efficiency of a durum wheat-winter pea intercrop to improve yield and wheat grain protein concentration depends on N availability during early growth. *Plant and Soil*, doi 10.1007/s11104-009-0082-2.

Belhadj Fraj, M., 2003. *Évaluation de la stabilité et la faisabilité des associations variétales de blé tendre d'hiver à destination meunière en conditions agricoles*. Thèse de doctorat, ENSAR, Rennes 120 p.

Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussièrre, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillère J.P., Hénault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model STICS. *European journal of agronomy*, 18, 309-332.

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

Casagrande, M., David, C., Valantin-Morison, M., Jeuffroy, M.H., 2009. Factors limiting the grain protein content of organic winter wheat in Southeastern France: a mixed-model approach. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 565-574.

Champeil, A., 2004. *Contribution à la compréhension des effets des systèmes de culture sur l'infection des cultures de blé tendre d'hiver par la fusariose et la contamination des grains par les mycotoxines associées*. Thèse, INA P-G, 132 p + annexes.

Champeil, A., Doré, T., Fourbet, J.F., 2004. *Fusarium head blight: epidemiological origin of the effects of cultural practices on head blight attacks and the production of mycotoxins by Fusarium in wheat grains*. *Plant Science*, 166, 1389-1415.

Champolivier, L., Debaeke, P., Thibierge, J., Dejoux, J.-F., Ledoux, S., Ludot, M., Berger, F., Casadebaig, P., Jouffret, P., Vogrincic, C., Lecomte, V., Merrien, A., Mestries, E., Thiard, J., Noël, M., Caumes, E., Edeline, T., Provot, M., 2011. Construire des stratégies de production adaptées aux débouchés à l'échelle du bassin de collecte. *Innovations Agronomiques*, 14, 39-57.

Charmet, G., Massood-Quaraishi, U., Ravel, C., Romeuf, I., Balfourier, F., Perretant, M.R., Joseph, J.L., Rakszegi, M.,

- Guillon, F., Sado, P.E., Bedo, Z., Saulnier, L., 2009. Genetics of dietary fibre in bread wheat. *Euphytica*, 170, 155-168.
- Cooper M., Hammer G.L., 1996. Synthesis of strategies for crop improvement. In: Cooper, M., Hammer, G.L. (Eds.), *Plant Adaptation and Crop Improvement*. CAB International, ICRISAT and IRRI, 591-623.
- David, C., Viaux, P., Meynard, J.M., 2004. Les enjeux de la production de blé tendre biologique en France. *Le Courrier de l'Environnement*, 51, 43-53.
- David, C., Jeuffroy, M.H., Henning, J., Meynard, J.M., 2005a. Yield variation in organic winter wheat: a diagnostic study in the Southeast of France. *Agronomy for Sustainable Development*, 25, 213-223.
- David, C., Jeuffroy, M.H., Laurent, F., Mangin, M., Meynard, J.M., 2005b. The assessment of a decision-making tool for managing nitrogen fertilization of organic winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 23, 225-242.
- Doré, T., Clermont-Dauphin, C., Crozat, Y., David, C., Jeuffroy, M.H., Loyce, C., Makowski, D., Malézieux, E., Meynard, J.M., Valantin-Morison, M., 2008. Methodological progress in regional agronomic diagnosis. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 28, 151-161.
- Fan, M.S., Zhao, F.J., Fairweather-Tait, S.J., Poulton, P.R., Dunham, S.J., McGrath, S.P., 2008. Evidence of decreasing mineral density in wheat grain over the last 160 years. *Journal of trace elements in medicine and biology*, 22, 315-324.
- Gay, F., Maraval, I., Roques, S., Gunata, Z., Boulanger, R., Audebert, A., Mestres, C., 2010. Effect of salinity on yield and 2-acetyl-1-pyrroline content in the grains of three fragrant rice cultivars (*Oryza sativa* L.) in Camargue (France). *Field crops research*, 117, 145-160.
- Garvin, D.F., Welch, R.M., Finley, J.W., 2006. Historical shifts in the seed mineral content micronutrient concentration of US hard red winter wheat germplasm. *J. Sci. Food. Agric*, 86, 2213-2220.
- Godon, J.J., 1981. Le pain. *Pour la science*, 50.
- Hammer G.L, Jordan D, 2007. Modelling for innovation in design and construction of crop production systems. In: Farming Systems Design 2007, *Int. Symposium on Methodologies on Integrated Analysis on Farm Production Systems*, M. Donatelli, J. Hatfield, A. Rizzoli Eds., Catania (Italy), 10-12 September 2007, book 1 - Farm-regional scale design and improvement, 10-11.
- Jensen, E.S., 1996. Grain yield, symbiotic N₂ fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops. *Plant Soil*, 182, 25-38.
- Jeuffroy, M.H., Recous, S., 1999. Azodyn: a simple model simulating the date of Nitrogen deficiency. *European Journal of Agronomy*, 10, 129-144.
- Jeuffroy, M.H., Barré, C., Bouchard, C., Demotes-Mainard, S., Devienne-Barret, F., Girard, M.L., Recous, S., 2000a. Fonctionnement d'un peuplement de blé en conditions de nutrition azotée sub-optimale. In: *Fonctionnement des peuplements végétaux sous contraintes environnementales*, R. Bonhomme and P. Maillard (Eds), INRA, Paris, Les Colloques n°93, 289-304.
- Jeuffroy, M.H., Girard, M.L., Barré, C., 2000b. Qualité du blé tendre : comprendre et prévoir la teneur en protéines des grains. *Perspectives agricoles*, 261, 24-31.
- Jeuffroy, M.H., Burger, P., Gauffreteau, A., Lecomte, C., Oury, F.X., Beaufumé, J.F., Philippe Lonnet, P., Margalé, E., Sénellart, P., Olivier, A., 2011. Méthodes pour sélectionner des variétés de blé tendre adaptées aux situations de disponibilité en azote limitante. In: *Synthèse des programmes de recherche FSOV*, Actes de la rencontre scientifique, sous presse.
- Keating, B.A., Carberry, P.S., Bindraban, P.S., Asseng, S., Meinke, H., Dixon, J., 2010. Eco-efficient agriculture: concepts, challenges, and opportunities. *Crop Science*, 50, 109-119.
- Kettlewell, P.S., Sothorn, R.B., Koukkari, W.L., 1999. UK wheat quality and economic value are dependent in the North Atlantic oscillation. *Journal of Cereal Science*, 29, 205-209.
- Le Gouis, J., D. Beghin, E. Heumez, and P. Pluchard. 2000. Genetic differences for nitrogen uptake and nitrogen use efficiency in winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 12, 163-173.
- Le Bail, M., 1997. *Maîtrise de la qualité des céréales à l'échelle du bassin d'approvisionnement d'une entreprise de collecte-stockage. Approche agronomique*. Thèse, INA P-G, 236 p + annexes.
- Le Bail, M., Meynard, J.M., 2003. Yield and protein concentration of spring malting barley: the effects of cropping systems in the Paris Basin. *Agronomie*, 23, 13-27.
- 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., Dous-sinault, 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, 162-178. doi:10.1016/j.fcr.2011.08.007.
- Marcuola, F., Mignolet, C., Schott, C., Mari, J.F., 2010. *Organisation spatiale des successions culturales en France entre 1992 et 2009*. Projet ANR POPY. Livrable. 20 pages + annexes.
- Martre, P., Jamieson, P.D., Semenov, M.A., Zyskowski, R.F., Porter, J.R., Triboi, E., 2006. Modelling protein content and composition in relation to crop nitrogen dynamics for wheat. *European Journal of Agronomy*, 25, 138-154.
- Mathure, S., Shaikh, A., Renuka, N., Wakte, K., Jawali, N., Thengane, R., Nadaf, A., 2011. Characterisation of aromatic rice (*Oryza sativa* L.) germplasm and correlation between their agronomic and quality traits. *Euphytica*, 179, 237-246.
- Meynard, J.M., Cerf, M., Guichard, L., Jeuffroy, M.H., Makowski, D., 2002. Nitrogen, Decision Support and Environmental Management. *Agronomie*, 22, 817-829.

- Munier-Jolain N, Salon C, 2005. Are the carbon costs of seed production related to the quantitative and qualitative performances? An appraisal for legumes and other crops. *Plant, cell and environment*, 28, 1388-1395.
- Murphy, K.M., Reeves, P.G., Jones, S.S., 2008. Relationship between yield and mineral nutrient concentrations in historical and modern spring wheat cultivars. *Euphytica*, 163, 381-390.
- Nagarajan, S., Jagadish, S.V.K., Prasad, A.S.H., Thomar, A.K., Anand, A., Pal, M., Agarwal, P.K., 2010. Local climate affects growth, yield and grain quality of aromatic and non-aromatic rice in northwestern India. *Agriculture, ecosystems and environment*, 138, 274-281.
- Newton, A.C., Johnson, S.N., Gregory, P.J., 2011. Implications of climate change for diseases, crop yields and food security. *Euphytica*, 179, 3-18.
- Oury, FX., 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 multi-annual data from a French breeding program. *Journal of Genetic and Breeding*, 57, 59-68.
- Rabaud, V., 2005. *L'ajustement de la fertilisation azotée en pointe dans les grandes exploitations. Gestion de l'azote sur le blé : une affaire de spécialistes*. Agreste primeur, 159, 4 p.
- Smith, R.G., Menalled, F.D., Robertson, G.P., 2007. Temporal yield variability under conventional and alternative management systems. *Agronomy Journal*, 99, 1629-1634.
- Taub, D.R., Miller, B., Allen, H., 2008. Effects of elevated CO₂ on the protein concentrations of food crops: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 14, 565-575.
- Trottet, M., Doussinault, G., 2002. Analyse du progrès génétique chez le blé tendre au cours du XX^e siècle. *Le Sélectionneur Français*, 53.
- Zhang, Y., Song, Q., Yan, J., Tang, J., Zhao, R., Zhang, Y., He, Z., Zou, C., Ortiz-Monasterio, I., 2010. Mineral nutrient concentrations in grains of Chinese wheat cultivars. *Euphytica*, 174, 303-313.