



HAL
open science

Impact des nouvelles techniques de production, impliquant de faibles niveaux d'intrants, sur la quantité de protéines

Marie-Helene M.-H. Jeuffroy, Francois-Xavier F.-X. Oury

► **To cite this version:**

Marie-Helene M.-H. Jeuffroy, Francois-Xavier F.-X. Oury. Impact des nouvelles techniques de production, impliquant de faibles niveaux d'intrants, sur la quantité de protéines. *Innovations Agronomiques*, 2012, 19, pp.13-25. hal-01000353

HAL Id: hal-01000353

<https://hal.science/hal-01000353>

Submitted on 28 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 Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

Impact des nouvelles techniques de production, impliquant de faibles niveaux d'intrants, sur la quantité de protéines

Jeuffroy M.-H.¹, Oury F.-X.²

¹ INRA UMR 211 Agronomie, BP 01, F-78850 Thiverval-Grignon.

² INRA UMR 1095 Génétique Diversité et Ecophysiologie des Céréales, 234 avenue du Brézet, F-63100 Clermont-Ferrand.

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

Résumé

La teneur en protéines est un critère de qualité majeur pris en compte lors de la commercialisation des céréales. Elle résulte d'un équilibre, au sein de la plante, entre la nutrition azotée et la nutrition carbonée, ces deux processus étant étroitement liés via la sénescence des feuilles. La fertilisation azotée tardive, en fournissant de l'azote à la culture à un moment où la demande des grains est fixée, permet en général d'accroître la teneur en protéines des grains. En raison des exigences environnementales nouvelles pour la production agricole française, des pratiques culturales moins dépendantes de l'utilisation d'intrants, et valorisant les régulations biologiques au sein des agrosystèmes, se développent. Ces pratiques ont des effets variés sur la teneur en protéines : baisse dans certains cas, hausse dans d'autres. Dans la majeure partie des situations, on peut raisonner les techniques de manière à maximiser les chances d'atteindre les teneurs seuils requises par l'aval. Le facteur le plus aléatoire reste souvent le climat.

Mots-clés : Blé, fertilisation azotée, itinéraire technique à bas niveau d'intrants, associations variétales, associations d'espèces, taux de protéines, modélisation

Abstract: Effect of innovative crop management, involving low-input levels, on cereal grain protein content.

Grain protein content is a major criterion for assessing the quality of harvested cereal grains during commercial trades. It results from a balance between the plant nitrogen nutrition and the plant carbon nutrition, these two processes being strongly linked through leaf senescence. Late nitrogen fertilizer applications, supplying the crop with nitrogen when the grain demand is already fixed, generally allow an increase in grain protein content. Due to new environmental constraints for agricultural production in France, low-input crop managements are developing. They are based on a more intensive use of biological regulations within the agrosystems. They result in various effects on grain protein content: either increase or decrease. In major cases, crop management can be defined in order to maximize the chances to reach the threshold values for grain protein content required by end-users. The most variable factor is still often the weather.

Keywords: Wheat, nitrogen fertilization, low input crop management, cultivar mixture, intercropping, grain protein content, modeling

Introduction

La teneur en protéines des grains est devenue un critère majeur pour la commercialisation des céréales en France. Ce critère, facile à mesurer, est en effet un bon indicateur de la qualité d'usage des céréales,

aussi bien en panification, pour le blé tendre, qu'en malterie, pour l'orge brassicole. Ce critère est également largement utilisé à l'export : la teneur en protéines seuil pour des blés à l'intervention est de 10,5%. Pour des usages en panification en France, le seuil de 11,5% est plus fréquemment utilisé. Pour l'orge brassicole, en revanche, c'est la valeur plafond de 11,5% qu'il ne faut pas dépasser, avec une valeur optimale située autour de 10%. Des travaux de recherche ont donc été développés, depuis plusieurs années, pour comprendre les effets de différents facteurs et de différentes techniques sur cette variable, dans l'objectif de recommander les techniques favorables à l'atteinte des valeurs seuils requises par les utilisateurs. Ces travaux ont d'abord été centrés sur la compréhension des processus écophysologiques déterminant l'élaboration de la teneur en protéines des grains. Sur cette base de connaissances, l'effet de certaines techniques a pu être analysé et quantifié, conduisant à des conseils, notamment en termes de stratégie de fertilisation azotée. Cependant, le climat a également un fort effet sur ce critère.

Après une longue période de développement de l'agriculture, basée sur l'utilisation croissante des intrants de synthèse, on assiste depuis quelques années à de fortes remises en cause du modèle de production actuel de la part de la société et d'une partie des agriculteurs (Lamine *et al.*, 2011). De plus, la fréquence accrue de réglementations publiques exigeantes vis-à-vis de l'environnement (Loi Cadre sur l'Eau, plan Ecophyto 2018, réglementation sur les Aires d'Alimentation de Captage Grenelle, etc) amène à un besoin de reconception des systèmes de culture, visant à réduire les nuisances environnementales tout en maintenant une production élevée. Les nouveaux systèmes qui se développent sont variés : itinéraires techniques à bas niveau d'intrants, associations de variétés ou d'espèces, agriculture biologique, systèmes avec plante de service compagne de la culture de rente. Alors qu'on pourrait craindre une chute de la qualité des blés dans ces nouveaux modes de production, il apparaît qu'un raisonnement des techniques mises en place, tenant compte d'objectifs élevés de teneur en protéines, permet de limiter les réductions attendues, voire d'accroître la teneur en protéines par rapport aux conduites classiques. Plusieurs exemples illustreront ce résultat. Enfin, la variété étant un levier majeur pour l'atteinte de teneurs en protéines élevées, nous décrivons comment ce critère a été pris en compte récemment lors de l'étape d'inscription.

1- Déterminants de la teneur en protéines des céréales et variabilité de la production actuelle

1.1. Evolution de la teneur en protéines des céréales dans la production française

Une analyse du progrès génétique en France entre 1945 et 1995 a montré que la teneur en protéines moyenne des variétés de blé a beaucoup chuté en fonction de leur année d'inscription : de 12,8% en moyenne en 1945, elle a atteint environ 10,9% en 1993 (Trottet et Doussinault, 2002). Cette évolution a été concomitante d'une forte augmentation du rendement des mêmes variétés, progressant pendant la même période d'environ 45 q/ha à 70 q/ha. Cependant, pendant cette période, la progression du rendement a été plus rapide que la chute de la teneur en protéines, conduisant à une augmentation de l'accumulation de protéines par ha (environ +2 kg/ha/an en moyenne).

L'augmentation des rendements et la diminution des teneurs en protéines se retrouvent au niveau de la production nationale (Figure 1), au moins jusqu'au début des années 2000, date à partir de laquelle les valeurs pour les deux caractères se stabilisent. Ces tendances sont dues à l'existence d'une forte relation négative entre rendement et teneur en protéines, associée au fait que le rendement est le caractère prépondérant dans les programmes de sélection du blé en France. On peut noter que l'année 1998 (année à rendement record, et donc à teneur en protéines très basse), a été celle où la filière a pris conscience de la dégradation de la teneur en protéines due à la sélection pour le rendement. Cela a entraîné la mise en place de la grille ONIGC de classification des lots (en particulier pour l'export), basée essentiellement sur les teneurs en protéines (on distingue ainsi les classes E, 1, 2 et 3,

caractérisées respectivement par des teneurs en protéines supérieures à 12%, comprises entre 11 et 12%, comprises entre 10.5 et 11%, et inférieures à 10.5%).

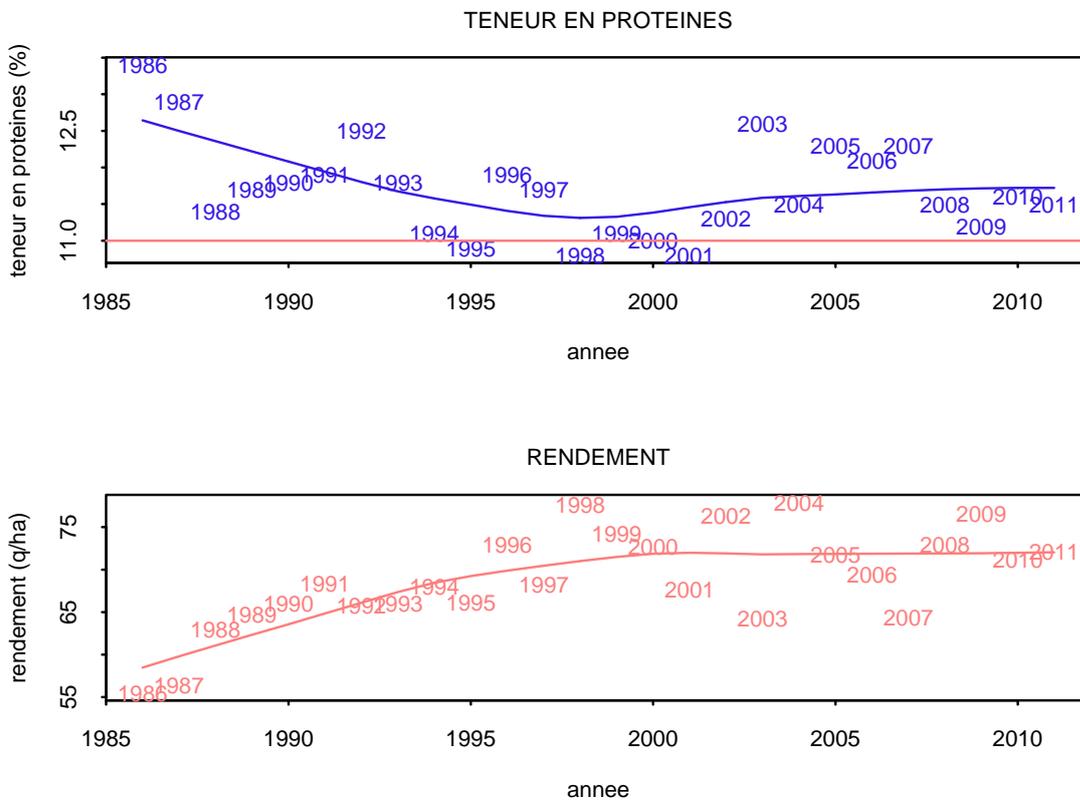


Figure 1 : Evolution de la teneur en protéines et du rendement du blé au niveau national, pour la période 1986-2011 (données ONIGC). La ligne horizontale à 11% de teneur en protéines correspond au seuil en-dessous duquel apparaissent des problèmes de débouchés sur les marchés (notamment à l'export).

1.2. Déterminants de la teneur en protéines des céréales

A l'échelle d'un grain, la teneur en protéines est proportionnelle au ratio entre la quantité d'azote et la quantité de biomasse accumulées dans ce grain. A l'échelle de la culture, elle est proportionnelle au rapport entre la quantité d'azote accumulé dans les grains et le rendement : $\%Pi = a \text{ QNG} / \text{RDT}$.

De nombreux travaux ont visé à élucider les processus écophysologiques déterminant l'élaboration de la teneur en protéines des grains de céréales. Ils ont montré que l'essentiel de l'azote contenu dans les grains à la récolte provenait de remobilisations d'azote stocké dans les organes végétatifs (feuilles et tiges) avant floraison (principalement sous forme de protéines) et transféré vers les grains après floraison, après leur transformation en acides aminés. En moyenne, 75% de l'azote contenu dans les grains à la récolte provient de remobilisations (Simpson *et al.*, 1983). Néanmoins, la plante ne perd pas ses capacités d'absorption d'azote du sol après floraison et, dans les situations de disponibilité suffisante en azote du sol et dans les conditions favorables d'absorption (humidité du sol suffisante, notamment), l'azote absorbé pendant la période de remplissage des grains contribue directement à l'enrichissement en protéines des grains. C'est pourquoi des apports d'engrais azotés tardifs (peu avant floraison), s'ils sont bien valorisés par la culture, peuvent permettre d'augmenter la teneur en protéines des grains. Au contraire, l'essentiel de la biomasse accumulée dans les grains à la récolte provient de la photosynthèse des plantes post-floraison. Cependant, dans des situations particulières, notamment de stress hydrique important, on peut observer une remobilisation de sucres solubles stockés dans les

tiges à floraison, et qui peut contribuer significativement à l'élaboration de la biomasse des grains. Dans les conditions les plus fréquentes, la photosynthèse post-floraison est largement déterminée par l'évolution de la surface foliaire verte des feuilles et l'efficacité de photosynthèse de ces feuilles, en plus des déterminants climatiques, le rayonnement incident et la température aérienne. La remobilisation d'azote des feuilles vers les grains entraînant une perte de protéines nécessaires à la photosynthèse et un jaunissement des feuilles, la capacité de photosynthèse de ces feuilles diminue progressivement au cours de la période post-floraison. Ainsi, on peut dire qu'il existe un certain antagonisme entre le remplissage des grains en azote et en carbone. De fait, la teneur en protéines résulte de l'équilibre qui s'établit entre nutrition carbonée et nutrition azotée du grain, elles-mêmes étant étroitement reliées. L'accumulation de carbone et d'azote dans les grains résulte d'un équilibre entre l'offre de la plante en nutriments carbonés et azotés et la demande des grains. La demande d'un grain est déterminée par le nombre de cellules qu'il possède, et peut être estimée à partir de la taille maximale d'un grain, représentée par le Poids de Mille Grains potentiel de la variété (Barbottin *et al.*, 2006).

Tous ces processus ont été intégrés dans des modèles de simulation du fonctionnement d'une culture de blé (Jeuffroy *et al.*, 2000a ; Brisson *et al.*, 2003). Ceux-ci peuvent ensuite être utilisés pour identifier la hiérarchie des déterminants de la teneur en protéines des blés. Ainsi, par exemple, le modèle Azodyn (Jeuffroy et Recous, 1999 ; Jeuffroy *et al.*, 2000a), développé pour rendre compte du fonctionnement d'une culture de blé en conditions de nutrition azotée variées, a montré l'importance du fonctionnement de la culture avant floraison, dans l'élaboration de la teneur en protéines des grains (Tableau 1). En effet, l'état du peuplement à ce stade est caractérisé par un stock d'azote, qui va limiter les remobilisations vers les grains, et par un nombre de grains, qui va contribuer à déterminer la demande totale des grains de la culture. De plus, l'absorption d'azote post-floraison peut être limitée par l'état du peuplement à ce stade. Ce résultat a également été observé lors d'un diagnostic agronomique en parcelles d'orge de brasserie (Le Bail et Meynard, 2003). Dans cette étude, en effet, les trois déterminants majeurs de la teneur en protéines étaient l'azote absorbé par la culture et l'efficacité de l'azote pour le nombre de grains, deux composantes largement déterminées avant floraison, et le poids de mille grains. L'analyse de sensibilité réalisée sur le modèle Azodyn a également révélé une forte sensibilité de la teneur en protéines finale au climat post-floraison (Tableau 1) : celle-ci peut varier de deux points selon le scénario climatique, pour un même état de la culture à floraison (Jeuffroy *et al.*, 2000b). Ces effets s'expliquent facilement par le rôle important du rayonnement global sur la production de biomasse par la culture après floraison, et par l'effet de la température sur la minéralisation d'azote dans le sol et sur les vitesses relatives d'accumulation d'azote et de carbone dans les grains (Spiertz, 1977).

Tableau 1 : Analyse de sensibilité du module de remplissage des grains, inclus dans le modèle Azodyn, au climat et à l'état du peuplement à la floraison : valeurs de sortie moyennes simulées en fonction des variables d'entrée testées

	Valeurs testées	Teneur en protéines des grains (%)	Rendement (q/ha)	Reliquat d'N dans le sol à récolte (kg/ha)
Nombre de grains/m ²	16000	14.0	68	11
	29000	13.5	82	15
Etat du blé à floraison : N absorbé (kg/ha) (corrélé à l'indice foliaire et à la biomasse accumulée)	80	11.5	59	24
	250	14.0	102	12
N minéral dans le sol à floraison (kg/ha)	20	10.7	71	17
	150	14.7	92	15
Température moyenne floraison-maturité	Froid	12.6	88	13
	Chaud	13.5	78	31
Rayonnement incident floraison-maturité	Faible	14.3	78	14
	Fort	11.9	93	14

2- Pratiques agricoles actuelles et conséquences sur la teneur en protéines

2.1. En agriculture conventionnelle

Dans les années récentes, certains organismes de collecte ont mis en place un système de bonification/réfaction, basé sur la teneur en protéines des lots de blé. Ce système a été d'autant plus rapide à mettre en place que se sont développés des outils de mesure rapide, basés sur l'analyse de la réflectance dans le proche infra rouge, permettant de réaliser une analyse instantanée dès la livraison de chaque benne de l'agriculteur. Dès lors, les agriculteurs ont modifié leurs pratiques pour augmenter leurs chances d'atteindre le seuil de 11,5%, souvent utilisé pour caler les bonifications/réfections (Le Bail et Makowski, 2004). Ils ont alors plus fréquemment fractionné leurs apports d'engrais azoté, de manière à réaliser un dernier apport tardif, autour du stade gonflement, généralement bien valorisé en protéines. Ainsi, entre 1994 et 2001, la proportion de parcelles ayant reçu 3 apports d'engrais ou plus est passée respectivement de 26% à 70% (résultats issus des enquêtes « Pratiques culturales » 1994 et 2001 du Service de la Statistique et de la Prospective du Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche, de la ruralité et de l'aménagement du territoire).

Certains facteurs peuvent affecter la teneur en protéines des grains. Ainsi, la présence de maladies sur le feuillage perturbe la remobilisation d'azote des feuilles vers les grains (Barbottin *et al.*, 2006), tendant à réduire la teneur en protéines des grains. La sécheresse ou de fortes températures pendant le remplissage des grains, affectant davantage la nutrition carbonée qu'azotée, tendent plutôt à augmenter la teneur en protéines.

2.2. En agriculture biologique

En situation d'agriculture biologique, l'azote, à côté des mauvaises herbes, est l'un des facteurs limitants majeurs du fonctionnement d'une culture de blé, et de ses performances (David *et al.*, 2005 ; Casagrande *et al.*, 2009). Ce résultat est amplifié dans les systèmes céréaliers sans élevage, où l'entrée d'azote dans le système devient difficile, car elle ne repose que sur l'utilisation d'engrais organiques, très coûteux et donc pas toujours rentables. Dans ces conditions, la teneur en protéines des grains est très souvent limitante pour l'usage envisagé en panification : le seuil de 11% n'est pas atteint dans plus de la moitié des parcelles d'un réseau de 51 parcelles agricoles en Rhône-Alpes (Figure 2).

Dans ces systèmes très pauvres en azote, l'apport d'un engrais organique est parfois très rentable, car, malgré son coût très élevé, il permet d'augmenter de manière importante le rendement dès lors qu'il est appliqué à des périodes favorables, tenant compte de sa minéralisation rapide (David *et al.*, 2005). L'effet de la fertilisation organique sur la teneur en protéines n'est, en revanche, pas systématique. En effet, dans certaines situations d'apport précoce, la valorisation de l'engrais résulte principalement en une augmentation importante du rendement, ce qui accroît les besoins en azote de la plante pour remplir ses grains, à une période où la fourniture en azote redevient limitante. Cependant, tout comme en agriculture conventionnelle, l'utilisation de modèles adaptés a permis de montrer qu'il était possible de raisonner les apports d'engrais azoté organique de manière à accroître à la fois le rendement et la teneur en protéines (David *et al.*, 2005).

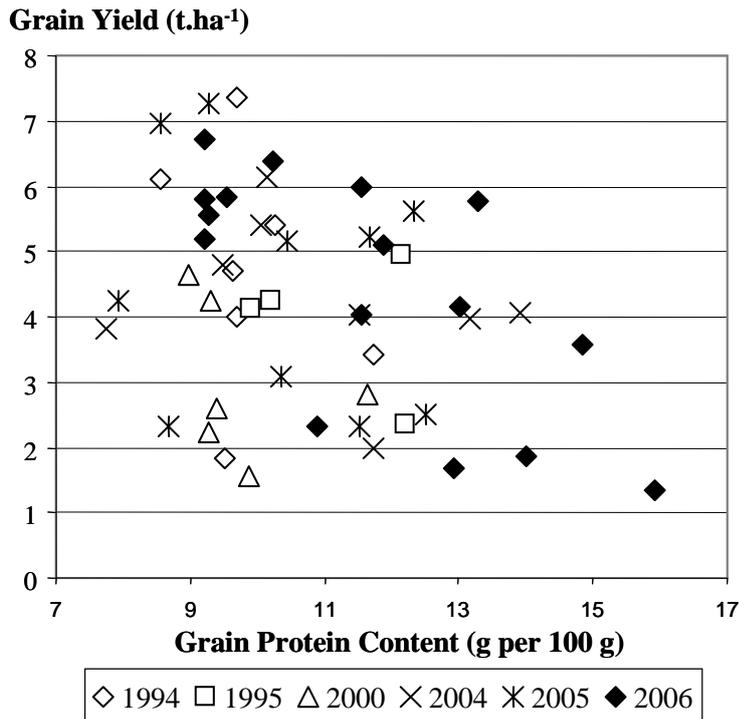


Figure 2 : Rendement et teneur en protéines des grains en agriculture biologique, sur un réseau de parcelles agricoles réparties sur 6 ans en Rhône-Alpes (issu de Casagrande *et al.*, 2009)

Dans ces systèmes, la mise en relation entre ces facteurs limitants et les techniques culturales appliquées a conduit les auteurs à recommander un choix variétal plus favorable à l'accumulation de protéines dans les grains, le choix d'un précédent cultural libérant davantage d'azote (une légumineuse), ou l'insertion d'une légumineuse fourragère comme plante de service compagne de la céréale pendant une partie de son cycle. Des résultats récents ont cependant montré que le semis d'une légumineuse fourragère au début montaison du blé, dans l'objectif qu'elle se développe sans entrer en concurrence avec le blé jusqu'à sa récolte et qu'elle couvre bien le sol pendant toute la période d'interculture, en vue de maîtriser les mauvaises herbes et de fournir de l'azote à la culture suivante, n'était pas sans risque pour la teneur en protéines. En effet, sur un réseau de 8 parcelles agricoles, réparties sur 2 années successives, dans lesquelles quatre légumineuses compagnes ont été testées, il est apparu que la teneur en protéines du blé associé avait significativement baissé par rapport à celle du blé pur dans 9 cas sur 32 (Amossé *et al.*, en préparation).

3- Effet d'itinéraires techniques innovants sur la teneur en protéines des grains

3.1. Des stratégies de fertilisation azotée innovantes

Comme nous l'avons vu précédemment, la teneur en protéines est sensible à la fois à la nutrition azotée de la culture avant floraison et après ce stade. C'est donc l'ensemble de la stratégie de fertilisation qui peut être raisonnée de manière à optimiser les performances : rendement, teneur en protéines et pertes vers l'environnement. Dans ce but, des simulations réalisées avec le modèle Azodyn ont permis de montrer que les stratégies de fertilisation azotée permettant de maximiser le rendement, d'atteindre le seuil de teneur en protéines requis par la panification, et de minimiser les pertes d'azote vers l'environnement, diffèrent selon les conditions de la parcelle (Meynard *et al.*, 2002). Les stratégies les plus intéressantes comportent généralement la suppression du premier apport, le décalage des 2nd et 3^{eme} apports vers des dates plus tardives, et/ou la modification de l'équilibre des doses entre 2nd et

3^{ème} apports. En effet, les apports d'azote réalisés en début de cycle, à des périodes où le climat est peu favorable à l'absorption et à la croissance, sont généralement mal valorisés par la culture (efficacité d'utilisation en moyenne de 40% ; Limaux *et al.*, 1999). Au contraire, des apports un peu plus tardifs, alors que la culture est en croissance active et exprime donc des besoins forts en azote, sont mieux valorisés.

3.2. Effet d'itinéraires techniques bas intrants du blé

Pour réduire significativement les impacts environnementaux de la production, et répondre aux exigences réglementaires (Ecophyto 2018 par exemple), tout en maintenant la production à un niveau élevé, des itinéraires techniques « bas niveau d'intrants » ont été conçus par les agronomes (Meynard, 1985 ; Loyce *et al.*, 2012). Ces conduites combinent le choix de variétés ayant des caractéristiques particulières (multi-résistantes aux maladies ; résistantes à la verse en particulier) et des pratiques favorables à la réduction des risques de maladie et de verse (réduction de la densité de semis, réduction de la fertilisation azotée, en particulier les apports précoces), ce qui permet de réduire l'application de régulateur de croissance, de produits phytosanitaires et d'engrais azoté. Ces itinéraires techniques ont été testés, d'abord dans un réseau conduit de 1999 à 2002 (Loyce *et al.*, 2012), puis dans un réseau élargi impliquant largement les chambres d'agriculture. Dans le premier réseau, les teneurs en protéines des blés chutaient lorsqu'on passait de l'itinéraire technique le plus intensif à l'itinéraire le plus extensif, tombant à des valeurs qui n'étaient plus acceptables par la meunerie. Suite à ces résultats, un travail spécifique a été réalisé sur les stratégies de fertilisation azotée à appliquer dans les itinéraires techniques à bas niveau d'intrants. En effet, tout en maintenant la logique de ces conduites, visant à réduire l'utilisation d'engrais azotés, les progrès des connaissances sur les effets de dynamiques de nutrition azotée variées (Jeuffroy et Bouchard, 1999) ont alors permis de proposer des stratégies de fertilisation azotée moins risquées pour la teneur en protéines, sans risque de réduire le rendement. Les stratégies proposées, établies à partir de simulations réalisées avec le modèle Azodyn, présenté auparavant, ont alors consisté à (1) raisonner l'application du 1^{er} apport sur la base d'un indicateur visuel d'entrée en carence de la culture (la bande double densité, mise au point par Limaux *et al.*, 2001), et (2) maintenir un dernier apport tardif pour assurer l'atteinte d'une teneur en protéines élevée. En effet, il était apparu que la teneur en protéines chutait d'autant plus que le dernier apport était réalisé trop précocement par rapport à la floraison du blé (Figure 3). Ces règles de décision ont conduit à maintenir la teneur en protéines à des niveaux proches entre les conduites bas niveau d'intrants et la conduite classique.

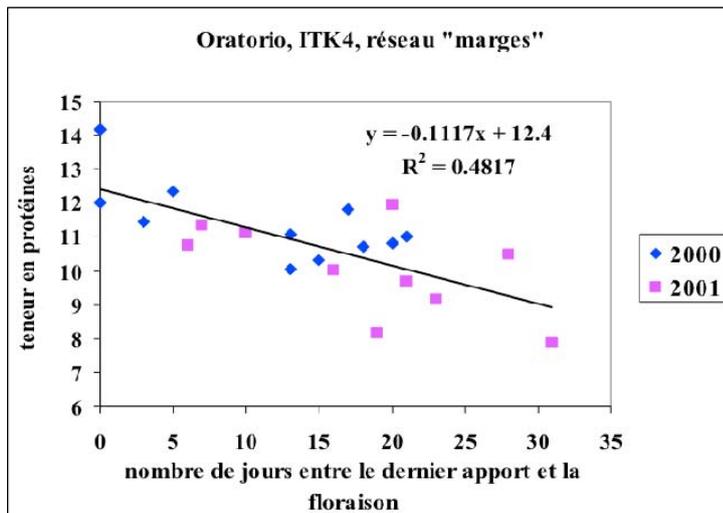


Figure 3 : Effet de la date du dernier apport d'engrais azoté sur la teneur en protéines des grains de la variété Oratorio en itinéraire technique extensif. Données issues du réseau décrit par Loyce *et al.* (2012).

On retrouve ce résultat au niveau de différents réseaux d'évaluation incluant une conduite « classique » et une conduite « faibles intrants », comme celui permettant l'évaluation des lignées avancées du programme de création variétale de l'INRA, ou celui mis en place en 2009 et 2010 par le Comité Technique Permanent de la Sélection pour étudier les conséquences d'une introduction de cette conduite « faibles intrants » dans les épreuves d'inscription (Tableau 2). On constate qu'en moyenne la diminution de rendement en conduite « faibles intrants » est de 18%, alors que la baisse n'est que de 5% pour la teneur en protéines. L'apport tardif d'azote joue donc bien son rôle pour maintenir autant que possible la teneur en protéines en conduite à intrants réduits.

Tableau 2 : rendements et teneurs en protéines observés dans différents réseaux permettant la comparaison des conduites intensives classiques (T) et faibles intrants (FI).

	Rendement T	%Protéines T	Rendement FI	%Protéines FI	Ratio FI/T pour le rendement	Ratio FI/T pour la %Protéines
CTPS Nord 2009+2010	97.50	11.80	77.30	11.30	0.79	0.96
CTPS Sud 2009+2010	73.40	12.30	63.10	12.10	0.86	0.98
INRA 2003+2004	92.20	11.50	78.90	10.60	0.86	0.92
INRA 2004+2005	99.90	10.50	83.70	9.80	0.84	0.93
INRA 2005+2006	93.60	11.20	77.80	10.10	0.83	0.90
INRA 2006+2007	89.50	11.70	71.60	10.90	0.80	0.93
INRA 2007+2008	90.60	11.50	72.60	11.30	0.80	0.98
INRA 2008+2009	94.40	11.50	77.20	11.40	0.82	0.99
INRA 2009+2010	96.90	10.90	77.50	10.40	0.80	0.95
INRA 2010+2011	95.90	9.90	81.80	9.30	0.85	0.94
Moyenne	92.39	11.28	76.15	10.72	0.82	0.95

Lorsqu'on regarde la relation « rendement – teneur en protéines » pour les 2 conduites (Figure 4), on observe effectivement que les droites de régression sont décalées (tout en restant à peu près parallèles), mais que la translation est beaucoup plus importante sur l'axe horizontal que sur l'axe vertical.

Par ailleurs, le Tableau 2 montre que les niveaux de teneurs en protéines sont très variables selon les années. On peut penser que cette variabilité est liée à des différences dans la dynamique de nutrition azotée de la culture, dues à des interactions avec le climat (et de ce fait pas toujours maîtrisables). On peut également observer que, même en situation de conduite classique, la teneur en protéines n'atteint pas toujours les valeurs seuils requises pour les débouchés en panification.

autant, voire plus, que la moyenne des deux espèces pures, tout en étant beaucoup moins fertilisée, et d'atteindre des teneurs en protéines équivalentes (Figure 5). Cet effet s'explique par la plus faible demande en N du blé, semé à moitié densité dans l'association par rapport à une parcelle semée en pur. Par ailleurs, la complémentarité des systèmes racinaires des deux espèces favorise l'utilisation de l'azote du sol par la céréale. Enfin, le rendement de la céréale étant réduit par rapport au rendement en culture pure (réduction liée essentiellement, mais en moyenne moins que proportionnelle, à la réduction de densité de semis de moitié de la céréale en association par rapport à la culture pure), les besoins en N pour remplir les grains sont moins élevés et couverts par la minéralisation azotée du sol pendant la période de remplissage des grains. Ce phénomène n'est pas forcément retrouvé en agriculture biologique du fait de la présence d'autres facteurs limitants (en particulier les mauvaises herbes) qui limitent la valorisation de l'azote du sol, et du fait d'une plus faible disponibilité d'N dans le sol, en général.

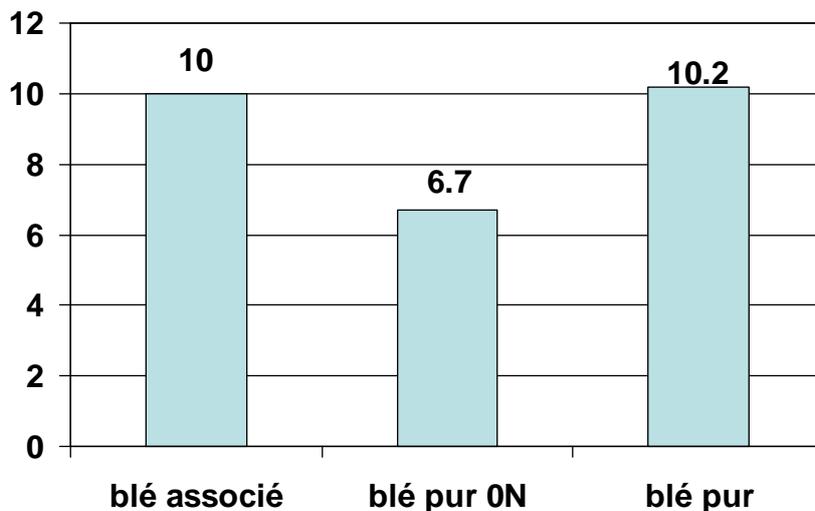


Figure 5 : Teneur en protéines du blé cultivé en association avec un pois ou en culture pure (fertilisée ou non). Résultats d'un réseau de 6 lieux sur 2 années en France (CasDAR 431, 2005). Les parcelles d'association blé-pois n'ont pas été fertilisées, tandis que les parcelles de blé pur ont reçu en moyenne 185 kg/ha d'engrais azoté.

4- Les changements de pratiques modifient-elles l'évaluation des variétés ?

Depuis 2006, les écarts à la régression rendement – teneur en protéines (également nommés « Grain Protein Deviations » = GPD) sont pris en compte pour l'inscription des variétés au catalogue officiel (Figure 6). Les variétés GPD+ (c'est-à-dire celles dont le résidu par rapport à la régression est positif), obtiennent un bonus lorsque l'écart est significatif au seuil de 7.5%, et un double bonus lorsque l'écart est significatif au seuil de 3.75% (lignées en vert sur la Figure 6). Le choix de ces seuils inhabituels (en statistique les seuils généralement retenus sont plutôt 5% et 1%) correspond à une volonté affirmée du CTPS de favoriser les lignées GPD+ (en choisissant des seuils plus élevés, on permet à un nombre plus important de lignées d'obtenir une bonification).

Nous avons vu précédemment que la relation entre rendement et teneur en protéines est sensible à la conduite culturale appliquée. Cependant, ce sont globalement les mêmes variétés qui ressortent de la relation : les GPD sont assez bien conservés d'une conduite culturale à l'autre (ce qu'on constate effectivement sur la Figure 4). Les variétés qui, à niveau de rendement égal, obtiennent des teneurs en protéines plus élevées que les autres, sont donc mises en évidence de la même manière en conduite intensive classique et en conduite à faibles intrants.

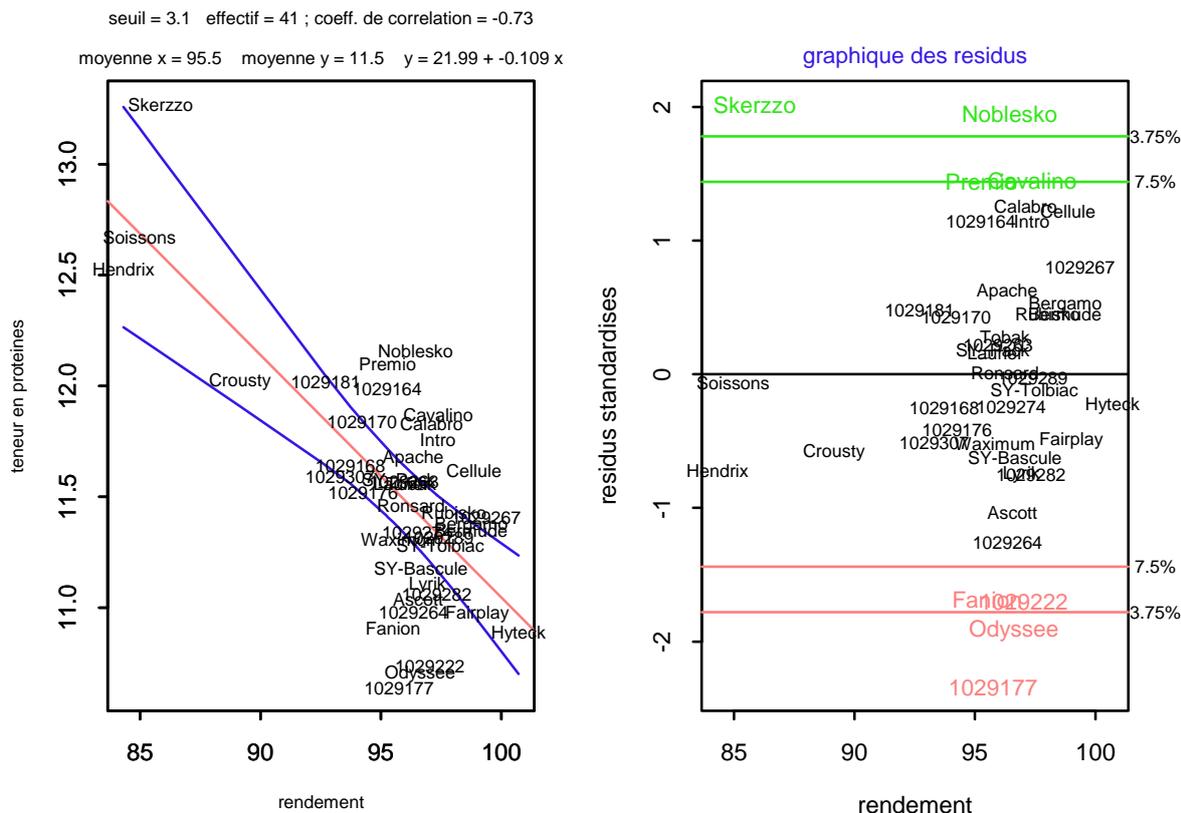


Figure 6 : Relation rendement – teneur en protéines pour les essais d’inscription des années 2010 et 2011 (zone Nord). Les variétés Skerzzo et Noblesko ont obtenu un double bonus, et la variété Cavalino un bonus simple (Premio était une variété témoin).

Conclusions

Les teneurs en protéines élevées requises sur les marchés du blé (aussi bien à l’export que pour la plupart des usages internes) sont obtenues actuellement dans le cadre d’un modèle de production très intensif. Cependant, les nuisances environnementales engendrées par ce système (en particulier la pollution des nappes par les nitrates et les pesticides et les fortes émissions de gaz à effet de serre), et le renchérissement inéluctable des engrais azotés (dont le prix est indexé sur celui des hydrocarbures), imposent de trouver des modes de culture alternatifs. Les itinéraires techniques à intrants réduits (couplés ou non à des associations variétales ou à des associations d’espèces), ainsi que le choix de variétés GPD+ (qui valorisent mieux l’azote que les autres), permettent, au prix d’une baisse modérée ou nulle de la productivité, de se rapprocher des conditions d’une agriculture durable, tout en maintenant la valeur d’utilisation du grain à un niveau acceptable pour la filière. L’agriculture biologique constitue, quant à elle, une réponse beaucoup plus radicale, mais qui s’accompagne souvent d’une forte baisse de la productivité et de la teneur en protéines, surtout dans le cas des systèmes de grande culture sans élevage. L’obtention de hautes teneurs en protéines étant, dans certaines conditions, difficile à atteindre compte tenu des conditions climatiques, il est également intéressant de s’interroger sur les process de transformation : certains process plus traditionnels sont efficaces avec des teneurs en protéines plus faibles que des process plus récents et plus industrialisés. En agronomie, les travaux se poursuivent pour identifier des modes de culture plus favorables à l’atteinte simultanée de

rendements élevés, de teneurs en protéines satisfaisantes pour les débouchés visés et d'impacts réduits sur l'environnement.

Références bibliographiques

- Barbottin A., Le Bail M., Jeuffroy M.H., 2006. The Azodyn crop model as a decision support tool for choosing cultivars. *Agronomy for Sustainable Development* 26, 107-115.
- Belhaj Fraj M., 2003. Evaluation de la stabilité et de la faisabilité des associations variétales de blé tendre d'hiver à destination meunière en conditions agricoles. Thèse de Doctorat, ENSA, Rennes, France.
- 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
- Casagrande M., David C., Valantin-Morison M., Jeuffroy M.H., 2009. Factors limiting the grain protein content of organic winter wheat in south-eastern France: a mixed-model approach. *Agronomy for Sustainable Development* 29, 565-574.
- CasDAR 431, 2005. Cultiver des associations céréales-protéagineux : des intérêts agronomiques, économiques et environnementaux à découvrir. Rapport final, 78p. + annexes.
- Corre-Hellou G., Brisson N., Launay M., Fustec J., Crozat Y., 2007. Effect of root depth penetration on soil nitrogen competitive interactions and dry matter production in pea-barley intercrops given different soil nitrogen supplies. *Field Crops Research* 103, 76-85.
- David C., Jeuffroy M.H., Laurent F., Mangin M., Meynard J.M., 2005. The assessment of a decision-making tool for managing nitrogen fertilization of organic winter wheat. *European Journal of Agronomy* 23, 225-242.
- Jeuffroy M.H., Bouchard C., 1999. Intensity and Duration of Nitrogen Deficiency on Wheat Grain Number. *Crop Science* 39, 1385-1393.
- 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: R. Bonhomme, P. Maillard (Eds), *Fonctionnement des peuplements végétaux sous contraintes environnementales*. 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., Recous S., 1999. Azodyn: a simple model simulating the date of Nitrogen deficiency. *European Journal of Agronomy* 10, 129-144.
- Lamine C., Messéan A., Paratte R., Hochereau F., Meynard J.M., Ricci P., 2011. La lutte chimique au cœur de la construction du système agri-alimentaire. In : P. Ricci, S. Bui, C. Lamine (eds), *Repenser la protection des cultures ; innovations et transitions..* Quae, Educagri, Versailles-Dijon. pp. 30-58
- Le Bail M., Meynard J.M., 2003. Yield and protein concentration of spring malting barley: the effects of cropping systems in the Paris Basin (France). *Agronomie* 23, 13-27.
- Le Bail M., Makowski. D., 2004. A model-based approach for optimizing segregation of soft wheat in country elevators. *European Journal of Agronomy* 21,171-180.
- Limoux F., Meynard J.M., Recous S., 2001. Le témoin « double densité » pour déclencher la fertilisation azotée du blé : bases théoriques et principes généraux. *Perspectives Agricoles* 273, 62-70.
- Limoux F., Recous S., Meynard J.M., Guckert AL., 1999. Relationship between rate of crop growthn at date of fertiliser N application and fate of fertiliser N applied to winter wheat. *Plant and Soil* 214, 49-59.
- 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., Felix I., Heddadj D., Leblanc O., Leleu M., Mangin P., Méausoone M., Doussinault G., 2012. Growing winter wheat cultivars under different

management intensities in France : a multicriteria assessment based on economic, energetic and environmental indicators. *Field Crops Research* 125, 167-178.

Meynard J.M., 1985. Construction d'itinéraires techniques pour la conduite du blé d'hiver. Thèse de Docteur-Ingénieur, INAPG, Paris, France.

Meynard J.M., Cerf M., Guichard L., Jeuffroy M.H., Makowski D., 2002. Which decision support tools for the environmental management of nitrogen? *Agronomie* 22, 817-829.

Pelzer E., Bazot M., Makowski D., Corre-Hellou G., Naudin C., Al Rifaï M., Baranger E., Bedoussac L., Biarnès V., Boucheny P., Carrouée B., Dorvillez D., Foissy D., Gaillard B., Guichard L., Mansard M.C., Omon B., Prieur L., Yvergniaux M., Justes E., Jeuffroy M.H., 2012. Pea-wheat intercropping in low-input conditions combine high economic performances and low environmental impacts. *European Journal of Agronomy*, sous presse.

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

Simpson R.J., Lambers H., Dalling M.J., 1983. Nitrogen redistribution during grain growth in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Physiology* 71, 7-14.

Spiertz A., 1977. The influence of temperature and light intensity on grain growth in relation to the carbohydrate and nitrogen economy of the wheat plant. *Netherlands Journal of agricultural Science* 25, 182-197.

Trottet M., Doussinault G., 2002. Analyse du progrès génétique chez le blé tendre au cours du XX^{ème} siècle. *Le Sélectionneur Français*, 53.