

Méthodes pour sélectionner des variétés de blé tendre adaptées aux situations de disponibilité en azote limitante

Marie-Hélène JEUFRY¹, Philippe BURGER², Arnaud GAUFFRETEAU¹, Christophe LECOMTE³, François-Xavier OURY⁴, Jean-Bruno BEAUFUME⁵, Philippe LONNET⁵, Eric MARGALE⁵, Patrice SENELLART⁵, Axel OLIVIER⁵

* Coordinateur : Axel OLIVIER⁵, aolivier@invivo-group.com, Tél. : 01 40 66 20 78

1 - INRA Centre Grignon UMR Agronomie - BP 01, 78850 Thiverval-Grignon

2 - INRA Castanet UMR AGIR - Che de Borde Rouge Auzerville - BP 27, 31326 Castanet Tolosan

3 - INRA Laboratoire de Microbiologie Géochimie des sols - 17 rue Sully, BP 86510, 21065 Dijon Cedex

4 - INRA Génétique Diversité et Ecophysiologie des Céréales - 234 avenue du Brézet, 63100 Clermont-Ferrand

5 - GIE Recherches Génétiques Céréales Club 5 - 83 avenue de la Grande Armée, 75782 Paris Cedex 16

Le changement de contexte agricole conduit à sélectionner des variétés capables de maintenir un rendement et une teneur en protéines élevés, en situation de disponibilité limitante en N au long du cycle cultural. Ceci est difficile à atteindre, d'une part parce que les essais (de sélection ou d'inscription) sont actuellement conduits sans une connaissance précise de la dynamique de nutrition azotée qui les caractérise, et d'autre part parce qu'on ne dispose pas d'outils rapides et faciles à mettre en œuvre pour caractériser la nutrition azotée de l'ensemble des géotypes testés, variable nécessaire pour analyser la réponse des géotypes face à une période de faible disponibilité en azote.

Les progrès techniques, aussi bien dans les outils de mesure indirecte de l'état de nutrition azotée du couvert, que dans les modèles de culture, permettent d'envisager l'utilisation de ces méthodes pour une caractérisation rapide de la nutrition azotée d'un grand nombre de variétés, tout au long de la période végétative.

La méthode de diagnostic agronomique et de caractérisation variétale, basée sur une analyse statistique des variations de rendement, est un outil puissant pour interpréter les réseaux d'essais variétés. Son adaptation à l'analyse des variations de teneur en protéines serait particulièrement intéressante afin (1) d'identifier des facteurs limitants particuliers de cette variable, (2) de caractériser le comportement variétal vis-à-vis spécifiquement de ce critère.

Enfin, l'utilisation de la relation rendement-teneur en protéines pour repérer les variétés ayant un bon comportement sur les deux variables. Cependant, on sait que les différences de précocité peuvent être grandes entre variétés au sein d'un essai. Or, la date du dernier apport d'azote (par rapport au stade floraison) a un effet important sur la teneur en protéines d'une culture. Il est donc nécessaire d'analyser l'effet de la précocité variétale sur la relation rendement-teneur en protéines.

1. Proposer des méthodes pour caractériser rapidement le statut azoté d'un grand nombre de géotypes

La détermination du statut azoté pour chaque micro-parcelle au sein d'un essai variété de blé nécessite le développement de méthodes rapides et non destructrices. Différentes méthodes, concernant des mesures sur les feuilles ou sur l'ensemble du couvert, ont été testées expérimentalement dans le but de proposer un indicateur fiable et rapide à mesurer.

► Les méthodes "feuilles"

Les méthodes basées sur l'estimation de la teneur en chlorophylle à l'aide d'un chlorophyll meter nécessitent une calibration préalable pour prendre en compte les spécificités variétales. Cette contrainte n'est pas trop gênante lorsqu'il s'agit de piloter la fertilisation azotée du blé. En revanche, leur utilisation dans le cadre d'un essai variété est rendue plus complexe, du fait même que l'on ne dispose pas des équations de calibration pour les géotypes observés.

Pour contourner ce problème, nous avons testé deux approches. La première utilise directement la teneur en azote des feuilles. Dans le cadre de cette étude, cette teneur a été estimée en laboratoire par la méthode Dumas. Dans un contexte opérationnel, la teneur en azote de la feuille pourrait être estimée à l'aide d'un spectromètre proche infrarouge de laboratoire ou de terrain pour lesquels des calibrations robustes peuvent être développées. La deuxième approche utilise un nouvel appareil, la pince Dualex (Force-A) permettant d'estimer un état de stress azoté à partir des polyphénols de la feuille estimés à partir d'une mesure d'absorbance de la fluorescence de la chlorophylle (Cartelat *et al.* 2005).

a. Les mesures d'azote des feuilles

Les résultats, obtenus sur un réseau de 5 sites et 2 années pour les variétés Caphorn, Charger, Récital et Soissons, ne permettent pas de dégager de relation suffisamment étroite et stable entre une mesure de la teneur en azote d'un étage foliaire et l'INN, mesurés à floraison. La meilleure relation obtenue, utilisant la F2 à la floraison, n'explique pas plus de 55% de la variabilité observée pour la première année d'expérimentation (Figure 1).

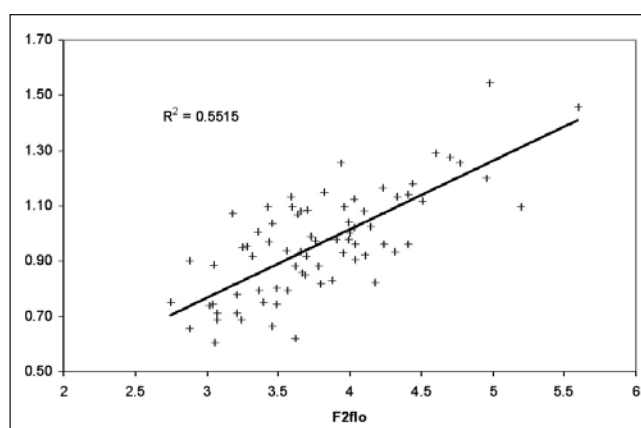


Figure 1 : Relation entre la teneur en azote de la feuille F2 à floraison et l'INN à floraison pour la campagne 2007.

Même dans le cas le plus favorable, la construction d'un modèle de prédiction de l'INN entraîne une erreur de calibration importante (RMSEc=0.13). Ce niveau d'erreur est largement de l'ordre de grandeur des différences à mettre en évidence entre les variétés.

Des résultats obtenus à Auzeville en 2007 mettent en évidence l'influence de la dynamique de la nutrition azotée sur les relations entre la teneur en azote des feuilles et l'INN, mesure globale au niveau de la plante et intégrative dans le temps. Trois conduites azotées ont été utilisées dans cet essai : les conduites N1 et N3 diffèrent par la dose d'N appliquée, tandis que N2 diffère aussi par la dynamique de disponibilité de l'azote (alimentation en azote concentrée en début de cycle, renforcée par le précédent pois, et absence d'apport qualité). Pour l'ensemble des mesures feuilles, les points issus de la conduite N2 se trouvent décalés par rapport à la relation générale constatée sur les autres traitements (Figure 2).

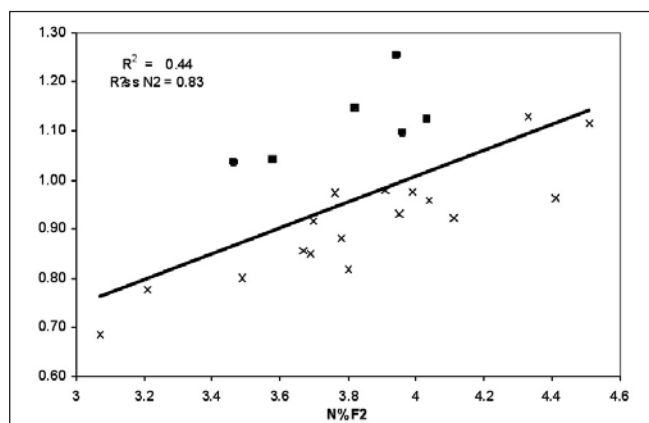


Figure 2 : Relation entre la teneur en azote de la feuille F2 (en partant du haut) et l'INN au stade floraison sur l'essai Auzeville 2007. Les points noirs correspondent aux mesures issues de la conduite N2, les croix correspondent aux conduites N1 et N3.

Cette influence de la dynamique de nutrition azotée est évidemment présente dans les essais menés en réseau entre les différents sites, ce qui perturbe probablement les relations. Le décalage phénologique entre les variétés ajoute encore un niveau de variabilité qui se traduit par des dynamiques de nutrition azotée légèrement différentes au sein d'un même essai.

b. Les mesures Dualex

Les mesures Dualex ont été réalisées uniquement à Auzeville sur les variétés Arche, Caphorn, Récital et Soissons, en utilisant une gamme de niveaux de nutrition azotée. On constate que la relation entre l'absorbance et l'INN diffère entre variétés (Figure 3).

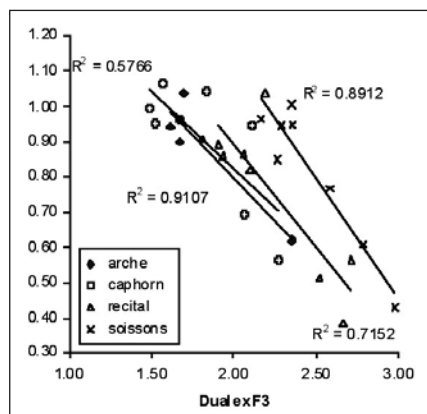


Figure 3 : Relation entre l'INN et la mesure brute Dualex sur la feuille 3 (en partant du haut) à floraison.

Cet effet se manifeste essentiellement par un décalage des droites de régression. Or, pour utiliser cette mesure dans le cadre d'un essai variétés, il est évidemment nécessaire de prendre en compte l'effet variété de façon simple. Pour cela, on peut corriger les mesures brutes par la valeur minimale obtenue pour chaque variété sur une parcelle dont la fertilisation azotée est non limitante (NL) :

$$i\text{Dualex} = \text{Dualex} - \text{Dualex}_{\text{NL}}$$

Cette correction reste toutefois imparfaite et entraîne une perte de puissance par rapport aux relations établies pour chaque variété (Tableau 1). A floraison, la feuille F2 permet d'atteindre la moins mauvaise précision, alors qu'au stade 2 noeuds, c'est la dernière feuille ligulée qui est la plus informative. On retrouve ici aussi la dégradation de la précision des relations : les mesures à 2 noeuds sont nettement plus précises que les mesures à floraison.

	2 noeuds	Avt dernier apport	Floraison
F1	0.076	-	0.145
F2	0.079	0.112	0.132
F3	-	0.127	0.152

Tableau 1 : Erreurs quadratiques moyennes de calibration (RMSEc) sur l'INN des différentes équations de calibration obtenues pour chaque étage foliaire.

► Les mesures au niveau du couvert

a. Les mesures aéroportées

Le développement de solutions techniques d'imagerie aérienne haute résolution à bas coût, utilisant comme vecteur un ULM ou un drone et des capteurs basés sur des appareils photos numériques modifiés, permet d'envisager l'utilisation de cette approche dans le cadre des essais variétés de blé. Celle-ci a donc été testée la première année d'expérimentation du projet. Nous avons fait appel à un prestataire de service (L'avion jaune - <http://www.lavionjaune.fr/>) pour les acquisitions et le traitement des images. En raison d'un problème technique sur le vol du 23/04, seules les images du 08/05 ont pu être valorisées. En raison du décalage de phénologie des variétés de blé tendre présentes dans l'essai, nous avons utilisé comme vérité terrain les données acquises sur un essai variétés de blé dur présent dans la même plateforme que l'essai blé tendre du projet et qui était à floraison. Nous disposons de 2 niveaux de nutrition azotée contrastés. Les images ont été traitées selon les méthodes développées dans une étude précédente (Lelong et al., 2008).

Les données radiométriques disponibles ne permettent qu'une approche empirique basée sur les indices de végétation. Dans le cas présent, on a utilisé le NDVI = (PIR - Rouge) / (PIR + Rouge) et le PIR/Rouge.

Dans la pratique, il s'agirait de développer un modèle de prédiction de l'INN à partir des données recueillies sur les témoins pour l'appliquer aux autres variétés présentes dans l'essai. Trois types de modèles ont donc été développés pour prédire l'INN à floraison à partir (1) des mesures brutes, des mesures ajustées par variété (2) en divisant par la valeur maximale de la variété ou (3) en retranchant cette valeur.

La qualité prédictive des modèles utilisant NDVI est globalement identique à celle des modèles utilisant PIR/R

comme prédicteur (Tableau 2). Les deux types de transformation de la variable initiale permettent d'améliorer sensiblement la prédiction même si le niveau de précision atteint n'est pas suffisant.

Modèle	Prédicteur	RMSE calibration	RMSE validation
1a	NDVI	0.067	0.115
2a	NDVlr	0.065	0.087
3a	NDVln	0.064	0.087
1b	PIR/R	0.067	0.115
2b	PIR/Rr	0.061	0.087
3b	PIR/Rn	0.061	0.087

Tableau 2 : Erreur de calibration et de prédiction pour les différents modèles simulant l'INN à partir de différents prédicteurs.

b. Les mesures au niveau du sol

L'utilisation d'un spectromètre positionné au sol permet d'utiliser une géométrie d'acquisition relativement constante (au mouvement du soleil près) et de lever les contraintes de poids du capteur et de risques de casse, ce qui permet d'envisager l'utilisation de capteurs plus performants. Enfin la nécessité de disposer d'un dispositif imageur disparaît. Le spectromètre hyperspectral utilisé (MMS Zeiss) couvre la gamme 320-1140 nm en 256 bandes de 3 nm. Les mesures ont été acquises en maintenant le capteur à la verticale et à une hauteur constante de 60 cm au dessus du couvert (Figure 4). La surface couverte par le capteur est un disque de 25 cm de diamètre (en haut du couvert). Chaque mesure dure environ 200 millisecondes. Les données ont été acquises sur une série d'essais variétés implantés selon 3 niveaux de disponibilité en azote.

Le spectromètre utilisé permet de calculer de nombreux indices de végétation. Nous avons donc essayé de corrélérer 21 indices, issus d'une analyse de la bibliographie, aux valeurs d'INN. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec l'indice $DVI=R_{800}-R_{680}$, mais l'erreur d'étalonnage reste forte (RMSEc=0.086, Figure 5) même en réalisant un étalonnage variétal.

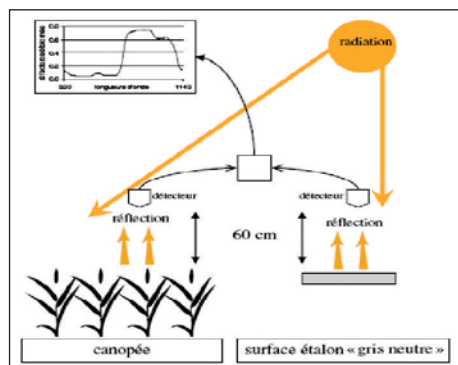


Figure 4 : Principe d'utilisation du capteur hyperspectral porté.

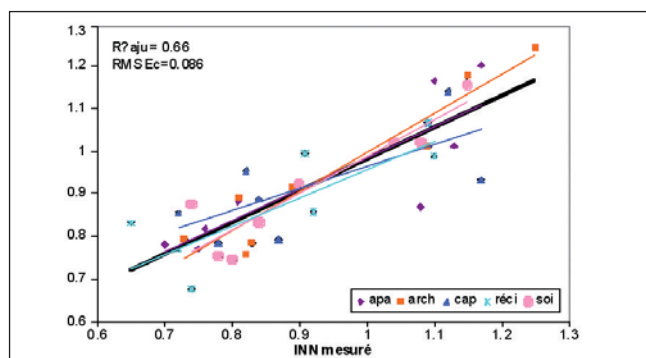


Figure 5 : Relation entre l'INN mesuré et l'INN prédit par le modèle $INN = f(DVI)$ après un étalonnage variétal.

Une approche alternative consiste à utiliser l'ensemble du spectre pour prédire la variable d'intérêt, l'INN. La méthode classiquement utilisée est la régression PLS (Partial Least Square). Pour améliorer la robustesse de l'équation en augmentant le nombre de points, les données de blé tendre ont été agglomérées à des données collectées sur blé dur sur la même plateforme. L'analyse des spectres a été réalisée sur la dérivée première et non sur le spectre brut.

La précision atteinte par l'équation développée par PLS (RMSEc=0.078) est comparable à ce que l'on obtient en développant des relations spécifiques par variété dans l'approche par indice (RMSEc=0.086).

L'approche chimiométrique permet donc de mieux valoriser l'information spectrale. Les données disponibles ne permettent pas de valider au sens propre du terme sur un jeu de données indépendant les équations obtenues. La validation croisée permet cependant de se faire une idée de la précision envisageable avec cette approche (Figure 6). Dans notre étude, l'erreur quadratique obtenue en validation croisée "full cross" est $RMSEcv=0.086$.

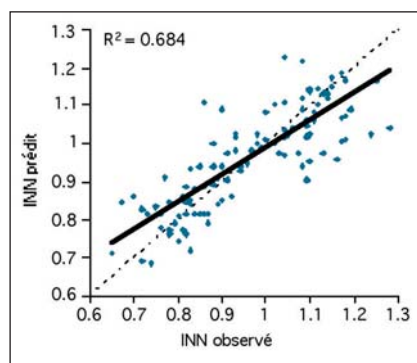


Figure 6 : Relation INN prédit-INN observé pour le modèle PLS à 6 valeurs latentes.

2. Proposer des indicateurs simples pour caractériser les milieux de sélection du point de vue de la dynamique de nutrition azotée

La réponse d'une culture de blé à un stress azoté dépend de la dynamique de nutrition azotée observée sur cette culture (Jeuffroy et Bouchard, 1999). Au sein d'un essai variété, du fait des différences de comportement des variétés (phénologie, et dynamique d'absorption d'azote et de croissance), les variétés ne rencontrent pas la même dynamique de nutrition azotée. La caractérisation de la réponse de chaque variété vis-à-vis d'un stress azoté ne peut donc pas porter sur la réponse du rendement dans des situations variétés de fertilisation azotée, mais requiert la connaissance de la dynamique de nutrition azotée de chaque variété. Le suivi expérimental de cette variable étant trop lourd, on peut envisager d'utiliser des modèles de culture. Mais, ces derniers comportant des erreurs de prédiction, il est nécessaire de réduire au maximum ces erreurs. Les méthodes combinant des données simulées en continu et des données observées ponctuelles permettent d'envisager d'améliorer de façon significative la précision des modèles (Naud *et al.*, 2007). Nous avons testé l'une de ces méthodes pour caractériser la nutrition azotée de nombreuses variétés au sein d'un essai.

► Méthode et essais mobilisés

a. La méthode de filtrage particulière

La méthode du filtrage particulière permet de valoriser les informations issues des simulations d'un modèle de culture et d'observations réalisées dans la situation précise dans laquelle on cherche à prédire une variable. Appliquée sur une période antérieure à la mesure (lissage), cette méthode permet de corriger les données simulées pendant une période, à partir d'une ou plusieurs mesures réalisées(s) à l'issue de cette période. Sans rentrer dans les détails, cette méthode est basée sur (i) la transformation d'un modèle déterministe en un modèle stochastique, par l'introduction d'un terme aléatoire dans certaines équations du modèle, (ii) la réalisation d'un très grand nombre de simulations (10000 dans notre cas), pour un set fixé de données d'entrée du modèle, (iii) la comparaison de l'ensemble des valeurs simulées à la valeur observée (en tenant compte de l'incertitude de la mesure) et la correction de la valeur moyenne simulée (qui se traduit par la non prise en compte de certaines simulations, trop éloignées de la valeur mesurée), (iv) le calcul des valeurs simulées antérieurement à la mesure, à partir des simulations conservées.

Nous avons fait l'hypothèse qu'il serait possible de mesurer la nutrition azotée des variétés à floraison. Nous avons donc cherché à prédire la dynamique antérieure de nutrition azotée (l'évolution de l'indice de nutrition azotée, INN) à partir du modèle Azodyn et d'une mesure de l'état du couvert à floraison.

Le filtrage a été réalisé en utilisant des mesures de biomasse aérienne (MS) et/ou azote accumulé dans la culture (QN). Pour disposer d'un écartype moyen des données mesurées à floraison, on a calculé la moyenne des données observées sur un réseau pluri-annuel et multilocal. Les valeurs de moyenne et écartype obtenue sont, pour la biomasse, de 1002,57 g/m² et 13,84 g/m² respectivement, et, pour l'N accumulé, de 126,09 kg/ha et 7,42 kg/ha respectivement. Dans le cas de filtrage simultané sur MS et QN, la moyenne de la covariance entre les deux variables, a été estimée à -0,125 sur le réseau multilocal et pluri-annuel.

b. Le modèle de culture Azodyn

Le modèle de culture utilisé dans notre étude est Azodyn, spécifiquement adapté pour rendre compte de la dynamique de nutrition azotée d'une culture de blé et de ses conséquences sur le rendement et la teneur en protéines (Jeuffroy & Recous, 1998 ; David & Jeuffroy, 2009). Le modèle requiert, en entrées, les caractéristiques du sol de la parcelle considérée, quelques informations sur le système de culture de la parcelle, le climat journalier pendant le cycle de la culture (température moyenne, pluie, rayonnement global, ETP), les dates de quelques stades phénologiques clés (début montaison, floraison) et l'état du couvert en sortie hiver (biomasse aérienne et N accumulé par la culture, reliquat d'N minéral dans le sol). Il simule, chaque jour entre sortie hiver et récolte, la disponibilité d'N minéral et d'eau dans le sol, l'indice foliaire de la culture, sa croissance aérienne, son accumulation d'azote, l'INN, puis, pendant le remplissage des grains, la sénescence du couvert et l'accumulation de biomasse et d'azote dans les grains. En sortie, il simule les composantes du rendement, la teneur en protéines et le reliquat d'N minéral dans le sol à récolte.

Les mesures d'état du couvert en sortie hiver étant rarement disponibles, elles sont tirées au hasard, pour chaque simulation, dans une base de données issues de mesures réalisées dans un réseau multilocal et pluri-annuel antérieur (Barbottin, 2004).

c. Les essais mobilisés

Nous avons utilisé deux types d'essais :

- des essais réalisés antérieurement à Grignon, pendant 3 années (1995, 1996, 1998, 1999), comportant une diversité de modalités de fertilisation azotée (environ 6 par an) mais peu de variétés (1 en 1995 et 1996, 2 en 1998 et 5 en 1999) et sur lesquels un suivi fréquent (toutes les deux semaines au moins) de l'INN a été réalisé.
- les essais réalisés chez les partenaires du projet, pendant 2 ans (2007 et 2008, Cappelle, Orgerus, Premesques, Verneuil, Clermont-Ferrand, Le Moulon, Mons, Rennes, Toulouse), comportant un grand nombre de variétés, dont 3 témoins (Caphorn et Soissons dans tous les lieux, et Arche à Toulouse, Charger ailleurs) sur lesquelles des mesures ont été réalisées de manière plus fréquente, et 2 conduites culturales ("intensive", IN, et "faibles intrants", FI, cette dernière étant caractérisée non seulement par une réduction de la fertilisation N mais aussi de la densité de semis, et par l'absence de régulateur et de fongicide). Sur les témoins, les mesures d'INN ont été réalisées à la sortie hiver, à début montaison, à 2 noeuds, et à floraison.

La méthode a donc été, dans un premier temps, testée sur les essais de Grignon, pour lesquels on disposait à la fois d'une plus grande gamme de nutrition azotée (ce facteur variant seul), et d'un plus grand nombre de données en dynamique. Puis, dans un second temps, elle a été appliquée sur les essais FSOV.

d. Filtrage indirect avec les mesures SPAD

La mesure de l'INN étant lourde et coûteuse à réaliser sur l'ensemble des variétés d'un essai, on a fait l'hypothèse qu'une estimation indirecte de cette variable, à l'aide d'une mesure SPAD (avec un chlorophyllmètre), pourrait être utilisée. Nous avons donc également testé le filtrage à partir d'une mesure SPAD. Dans ce cas, il est nécessaire de disposer de la relation qui existe entre l'estimateur indirect (SPAD) et la variable d'état du modèle sur laquelle le filtrage va porter, au stade concerné. Nous avons utilisé des données acquises pour estimer ces relations :

$$\text{SPADF2} = 17,348\%N + 19,531, \text{RMSE} = 5,95$$

$$\text{SPADF2} = 0,107 \text{QN} + 26,17, \text{RMSE} = 5,77$$

$$\text{SPADF2} = 0,0219 \text{MS} + 18,089, \text{RMSE} = 6,01$$

$$\text{INN} = 0,0836 \exp(0,047 \text{SPADF2}), \text{RMSE} = 0,149.$$

► Résultats

a. Évaluation de la méthode sur les essais "N"

Le filtrage du modèle a été réalisé uniquement sur la base des mesures réalisées à floraison. La correction a ensuite été "diffusée" aux variables simulées entre sortie hiver et floraison et l'intérêt de la méthode a été analysé en comparant les valeurs simulées par le modèle (corrigé ou non corrigé) aux valeurs mesurées, pendant cette période. Les valeurs d'INN simulées ont été comparées soit à la valeur d'INN observée à floraison (en faisant l'hypothèse que cette valeur rendait bien compte de la dynamique antérieure de nutrition azotée), soit aux valeurs simulées avec Azodyn seul, soit aux valeurs simulées avec le modèle corrigé par le filtrage à floraison. Les valeurs d'INN mesuré entre sortie hiver et floraison ont varié, sur l'ensemble des cas de Grignon, entre 0,278 et 1,434. Dans tous les cas, le filtrage améliore la simulation de la dynamique de

nutrition azotée par rapport au modèle seul, et par rapport à la valeur d'INN à floraison considérée comme stable au cours du temps (Tableau 3).

Le filtrage réalisé sur les deux variables simultanément (MS et QN) a parfois conduit à des problèmes de stabilité du modèle. Il est donc préférable de filtrer sur une seule variable, les résultats étant par ailleurs meilleurs dans ce cas en 1998 et 1999.

Les résultats obtenus pour l'ensemble des cas testés sont moins bons en 1999 : ceci est dû à la présence de la variété Florence-Aurore, pour laquelle la qualité prédictive du modèle était nettement inférieure (RMSE=0,182 contre RMSE = 0,116 au maximum pour les autres variétés, dans le cas du filtrage avec QN).

	Filtrage	RMSEp	RRMSEp %
1995	INN Floraison	0,233	28,7
	Azodyn seul	0,110	13,5
	Filtrage MS et QN	0,085	10,5
	Filtrage QN	0,087	10,7
1996	INN Floraison	0,266	28,2
	Azodyn seul	0,104	11,1
	Filtrage MS et QN	0,085	9,0
	Filtrage QN	0,091	9,6
1998	INN Floraison	0,267	28,1
	Azodyn seul	0,173	18,3
	Filtrage MS et QN	0,116	12,2
	Filtrage QN	0,109	11,5
1999	INN Floraison	0,441	45,9
	Azodyn seul	0,180	18,7
	Filtrage MS et QN	0,153	15,9
	Filtrage QN	0,148	15,4
	Filtrage SPAD	0,167	17,3

Tableau 3 : Qualité prédictive du modèle Azodyn calculée à partir de la valeur observée à floraison (INN_{floraison}), de la valeur simulée par le modèle sans filtrage (Azodyn) ou avec filtrage à floraison sur MS et QN ou QN seul, ou encore avec une mesure indirecte SPAD (seulement en 1999). Les RMSEp sont calculées sur la comparaison des valeurs simulées et observées entre sortie hiver et floraison, chaque année d'essai.

La prédiction de la dynamique de l'INN avec le modèle filtré par la mesure SPAD est proche de celle réalisée avec le modèle filtré par la mesure directe de QN (résultats 1999), et apparaît meilleure qu'avec le modèle seul ou la valeur constante d'INN à floraison.

L'analyse de l'évolution dans le temps des erreurs de simulation (dans le cas du filtrage avec QN à floraison) ne montre pas une meilleure précision des simulations à proximité de la date de mesure (résultats non montrés).

b. Application de la méthode aux essais variétés

Sur le réseau d'essais FSOV, la présence de carence azotée avant floraison a été plus rare : les valeurs moyennes d'INN entre sortie hiver et floraison ont varié, sur l'ensemble des sites/années et des variétés témoins, entre 0,82 et 1,12.

La comparaison des valeurs simulées et observées porte sur un tout petit nombre (2 à 3) de valeurs sur chaque site/année. Néanmoins, il apparaît que le filtrage du modèle améliore les résultats de prédiction de l'INN au cours du temps, par rapport au modèle seul en 2007. En 2008, les résultats obtenus avec les deux méthodes sont très proches.

L'extrapolation à l'ensemble de la période végétative de la valeur mesurée de l'INN à floraison apparaît un meilleur prédicteur que le modèle en 2007, mais un moins bon en 2008. Ce résultat dépend étroitement de la présence ou non de carence azotée sur les essais avant floraison : sans carence, la valeur floraison peut être extrapolée sans grosse erreur.

Le filtrage particulière apparaît moins performant sur ces sites que sur les essais de Grignon. Il serait nécessaire de prolonger l'étude pour savoir si la raison principale est la faible gamme de carence azotée rencontrée dans ces essais (ce qui risque d'être le cas dans les essais variété en général, excepté dans des essais spécifiques où la fertilisation azotée est drastiquement réduite) ou le faible nombre de points expérimentaux. Dans cette hypothèse, le manque de gain de RMSE observé sur les essais FSOV ne permet pas de conclure sur l'intérêt de la méthode.

Site	ITK	2007	2008	2007	2008	2007	2008
		Modèle seul	Modèle seul	Modèle + filtrage QN	Modèle + filtrage QN	INN floraison	INN floraison
		RRMSEP	RRMSEP	RRMSEP	RRMSEP	RRMSEP	RRMSEP
Mons	FI	0,040		0,029		0,017	
	I	0,036		0,025		0,006	
Toulouse	FI	0,124	0,013	0,039	0,030	0,028	0,021
	I	0,118	0,014	0,008	0,003	0,004	0,006
Rennes	FI	0,009	0,003	0,009	0,002	0,019	0,120
	I	0,005	0,042	0,008	0,042	0,004	0,066
Cappelle	FI	0,001		0,023		0,011	
	I	0,002		0,046		0,006	
Clermont-Ferrand	FI	0,105		0,078		0,033	
	I	0,075		0,067		0,021	
Orgerus	FI		0,012		0,014		0,108
	I		0,004		0,005		0,067
Total		0,056	0,015	0,034	0,016	0,015	0,063

Tableau 4 : Comparaison des valeurs observées d'INN entre sortie hiver et floraison avec (1) les valeurs simulées avec Azodyn seul, (2) les valeurs simulées avec Azodyn filtré à floraison avec QN, (3) la valeur observée d'INN à floraison, considérée comme stable.

3. Adapter la méthode et l'outil de diagnostic agronomique DiagVar à l'analyse de la variabilité de la teneur en protéines

La démarche Diagvar permet (i) d'identifier les principaux facteurs limitants biotiques et abiotiques ayant agi sur un réseau d'essais variétaux par un diagnostic agronomique appliqué sur des variétés témoins-révélateurs et (ii) d'estimer la tolérance des variétés testées à ces facteurs limitants par une analyse de l'interaction génotype x milieu (Lecomte, 2005 ; Lecomte *et al.*, 2009). Appliquée au rendement (Rdt), cette démarche a donné des résultats intéressants. L'objectif de ce travail est de l'utiliser pour expliquer des variations de la teneur en protéines (TP) et identifier des variétés capables de maintenir une bonne TP dans des conditions limitantes. La TP s'exprimant comme le rapport d'un rendement en protéines (RdtP) et d'un Rdt, nous pensons que les résultats fournis par la démarche appliquée directement à la TP seraient trop difficiles à interpréter. Nous avons donc préféré appliquer la démarche sur chaque composante de la TP (Rdt et RdtP).

► Matériel utilisé

Pour réaliser cette étude, nous avons utilisé les résultats obtenus en 2007 et 2008 au sein d'un réseau d'essais variétaux décrit dans le tableau 5-A sur 9 variétés dont quelques éléments de description sont donnés dans le tableau 5-B. Deux conduites culturales (ITK) ont été

(A)		Soissons	Caphorn	Charger	Arche	Apache	Mendel	Sankara	Koreli	Recital
2007	Toulouse									
2007	Clermont-Ferrand									
2007	Le Moulon									
2007	Mons									
2007	Rennes									
2007	Cappelle									
2007	Orgerus									
2007	Premesques									
2007	Verneuil									
2008	Toulouse									
2008	Clermont-Ferrand									
2008	Le Moulon									
2008	Rennes									
2008	Cappelle									
2008	Orgerus									
2008	Verneuil									

Absente Présente - témoin révélateur Présente - variété non témoin

(B)	Préco-cité	Résistances			
		Verse	Rouille brune	Septoria nodorum	Septoria tritici
Apache	7	8	5	4	
Arche	7	7,5	6	5	
Caphorn	6,5	6	8	4	5
Charger	6	7,5	6	4	
Koreli	5,5	5,5	7		7
Mendel	6,5	6,5	4	5	6
Recital	8	6,5	1	4	
Sankara	5,5	7	3	6	5
Soissons	7	6,5	2	5	

Tableau 5 : Eléments de description du réseau d'essais (A) et des variétés testées (B).

pratiquées : une conduite intensive (IN) et une conduite avec réduction d'intrants (FI). Les témoins révélateurs, choisis pour l'étalement de leurs précocités, sont les variétés Soissons (précoce), Caphorn (un peu moins précoce que Soissons), Charger (demi-tardive, la variété Arche remplaçant Charger dans le site de Toulouse). Chaque situation (combinaison Lieu x Année x ITK) est caractérisée par 40 variables indicatrices du niveau des différents stress environnementaux rencontrés par la culture au cours du temps (annexe 1). Ces variables s'expriment sur une échelle d'intensité croissante allant de 0 à 10.

► Méthodes utilisées

Le diagnostic agronomique a été réalisé pour Rdt et RdtP de deux façons. Dans un premier temps, nous avons utilisé une régression linéaire multiple pas à pas (stepwise) avec un risque de 15% pour l'introduction et le retrait des variables. Dans un second temps, nous avons réalisé une sélection de variables par une stepwise à 40% et nous obtenons une information sur les variables par mélange de modèles. Ces deux techniques (stepwise et mélange de modèles) ont été décrites et comparées par Prost *et al.* (2008).

Les diagnostics sur Rdt et RdtP nous permettent d'estimer une TP_{Pref} par $[RdtP_{ref}/Rdt_{ref}] \times 100$ (avec Rdt_{Pref} et Rdt_{ref} les RdtP et Rdt en absence de FL), et l'évolution de TP autour de TP_{Pref} lorsque chaque FL augmente d'un point par la formule suivante : $(Rdt_{Pref} + b) \times 100 / (Rdt_{ref} + a) - TP_{Pref}$ (avec a le paramètre associé au FL sur Rdt et b le paramètre associé au FL sur RdtP).

La caractérisation des variétés (Var), pour les facteurs limitants identifiés par les stepwise à 15%, est réalisée à l'aide d'un modèle de régression factorielle (Denis, 1980) de la forme suivante :

$$Y_{ijk} = \mu + Var_j + \sum_e \alpha^e \cdot FL_j^e + Env'_j + \sum_e \beta^e_{i^*} \cdot Var : FL_{ij}^e + Var : Env'_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Dans ce modèle, le paramètre $\beta^e_{i^*}$ quantifie la tolérance de la variété j au stress FL^e . Nous avons utilisé un modèle mixte, mieux adapté aux dispositifs déséquilibrés comme le nôtre, dans lequel les effets résiduels de l'environnement (Env') et de l'interaction ($Var:Env'$) sont considérées comme des variables aléatoires au même titre que la résiduelle ε . Enfin, comme pour la stepwise, les FL sont introduits dans le modèle par un algorithme itératif bidirectionnel (à chaque étape, la variable significative la plus explicative du Y est introduite et l'ensemble des variables non significatives sont exclues du modèle).

Dans le cadre du diagnostic et de la caractérisation variétale, nous n'acceptons d'introduire un stress environnemental dans le modèle que si son effet abaisse effectivement le Rdt ou le RdtP des variétés testées. Cette contrainte de signe apparaît comme une expertise agronomique sur les données. Elle permet d'éviter certains pièges liés aux corrélations généralement nombreuses qui existent entre les covariables environnementales (FL) (sélection peu fiable des FL et mauvaises estimations associées).

► Résultats

a. Diagnostic agronomique

Le fait de passer d'un seuil de 15% pour l'introduction et le retrait des covariables à un seuil de 40% permet

généralement d'ajouter dans le modèle un nombre important de covariables (Tableau 6).

(A)		Step	Deviance	Resid Df	Resid Dev	AIC	R2	coef	pne0	sd
<none>				31	3968,3	156,3	0	106,52	1	7,96
1	+ bmax	1360,20	30	2608,1	144,8	0,34	-2,45	1,00	0,68	
2	+ sri1045m	694,12	29	1914,0	136,9	0,52	-7,77	1,00	1,39	
3	+ sfmax	420,02	28	1494,0	131,0	0,62	-1,53	1,00	0,43	
4	+ npm2	385,63	27	1108,4	123,4	0,72	-5,09	1,00	0,89	
5	+ rgstmf	491,15	26	617,2	106,7	0,84	-2,38	1,00	0,57	
6	+ spetpfl	47,00	25	570,2	106,2	0,86	-0,67	0,67	0,65	
7	+ vmax	54,02	24	516,2	105,0	0,87	-0,99	0,65	0,97	
8	+ srglhw	88,60	23	427,6	101,0	0,89	-0,60	0,61	0,65	
9	+ srglfl	37,35	22	390,2	100,0	0,90	-0,20	0,30	0,56	
10	+ spetplm	18,39	21	371,9	100,5	0,91	-0,02	0,20	0,21	

(B)		Step	Deviance	Resid Df	Resid Dev	AIC	R2	coef	pne0	sd
<none>				31	68,5	26,3	0	14,57	1	1,41
1	+ bmax	20,68	30	47,8	16,8	0,30	-0,37	1,00	0,10	
2	+ npm2	10,47	29	37,3	10,9	0,45	-0,78	1,00	0,13	
3	+ sri1045m	10,92	28	26,4	1,8	0,61	-0,81	1,00	0,17	
4	+ rgstmf	4,43	27	22,0	-2,0	0,68				
5	+ njss	6,50	26	15,5	-11,2	0,77				
6	+ sfmax	1,55	25	13,9	-12,6	0,80	-0,02	0,30	0,05	
7	+ sdfl	1,12	24	12,8	-13,3	0,81				
8	+ merp	0,62	23	12,2	-12,9	0,82	-0,51	0,90	0,28	
9	+ inn	0,54	22	11,6	-12,4	0,83	-0,06	0,59	0,07	
10	+ srglhw	0,48	21	11,2	-11,7	0,84	-0,26	0,99	0,08	
11	+ rgstem	1,43	20	9,7	-14,1	0,86	-0,26	0,91	0,13	
12	- rgstmf	0,25	21	10,0	-15,3	0,85				
13	+ spetpfl	1,30	20	8,7	-17,8	0,87	-0,23	0,98	0,08	
14	- njss	0,11	21	8,8	-19,4	0,87				
15	+ srgllm	0,49	20	8,3	-19,2	0,88	-0,14	0,57	0,19	
16	+ stmpmf	1,05	19	7,2	-21,6	0,89	-0,05	0,35	0,10	
17	- sdfl	0,24	20	7,5	-22,5	0,89				
18	+ st25ef	0,65	19	6,8	-23,4	0,90	-0,13	0,33	0,28	
19	+ spetplm	0,32	18	6,5	-23,0	0,91	-0,03	0,33	0,08	

Tableau 6 : Diagnostics obtenus pour Caphorn sur Rdt (A) et RdtP (B). Les variables ont été sélectionnées par stepwise avec un seuil de 15% (partie haute du tab) et de 40% (partie basse du tab). Les variables communes aux deux diagnostics sont en vert, les variables spécifiques sont en jaunes. Pour chaque covariable, les estimations (coef), les écarts-types associés (sd) et la probabilité qu'elle fasse partie du modèle le plus juste (pne0) sont obtenus par mélange de modèles sur les variables sélectionnées avec un seuil de 40%.

Les covariables ajoutées améliorent logiquement la qualité d'ajustement des modèles, les R² obtenus excèdent 0.7 pour Soissons et 0.9 pour Caphorn et Charger. Les probabilités pne0 des covariables introduites avec un seuil de 40% peuvent être relativement élevées, voire supérieure à celles de variables introduites avec un seuil de 15% (cf. diagnostic RdtP de Caphorn). Ces constats justifient la méthodologie associant une méthode peu sélective et le mélange de modèles.

Globalement, il apparaît une grande proximité entre les facteurs limitants du rendement et ceux du rendement en protéines. Une seule covariable apparaît spécifiquement pour Rdt pour chacune des 3 variétés (st25ef pour Soissons, vmax pour Caphorn, rgsthv pour Charger), pour respectivement 3, 10 et 8 covariables explicatives de Rdt. Une plus grande diversité de covariables apparaît pour RdtP. L'indice de nutrition azotée (inn) apparaît spécifiquement pour expliquer les variations de RdtP pour Caphorn et Charger, avec une probabilité associée élevée (0.83 et 0.91 respectivement), ce qui montre l'importance de bien caractériser l'alimentation azotée pour expliquer les variations de RdtP.

A partir des Rdt, RdtP, TP de référence et des paramètres associés à chaque FL, nous avons estimé l'effet de chacun d'eux sur TP (Tableau 7). Les FL peuvent être favorables ou défavorables à TP selon leurs effets respectifs sur Rdt et RdtP.

Les températures basses avant floraison (stmpmf) semblent affecter systématiquement le taux de protéines, comme la sécheresse en fin de montaison et pendant le remplissage (spetpmf, spetpfl, spetplm), ainsi qu'un déficit d'alimentation azotée (inn). Les faibles rayonnements semblent avoir globalement un effet négatif sur TP, mais les faibles quotients photothermiques et les faibles rayonnements à la méiose ont plutôt un effet favorable. L'effet des maladies est variable, sauf les maladies de l'épi qui ont un fort effet négatif (mais pour la seule variété Caphorn).

	Soissons	Caphorn	Charger
Rdt ref	82,54	106,52	106,88
RdtP ref	10,20	14,57	13,72
TP ref	12,36	13,68	12,83
npm2	-0,04	-0,09	0,10
srglhw		-0,17	
srglfl		0,03	
srgllm		-0,13	-0,38
stmpmf	-0,02	-0,05	
rgsthv			0,17
rgstem	0,09	-0,24	0,24
rgstmf		0,31	
sri1045m		0,25	0,31
st25ef	0,32	-0,13	
st25fl	-0,30		
spetpmf	-0,11		
spetpfl	-0,09	-0,13	-0,14
spetplm		-0,03	
inn		-0,06	-0,03
bmax	0,002	-0,04	0,01
sfmax	-0,07	0,18	0,04
merp		-0,48	
vmax	-0,03	0,13	0,16

Tableau 7 : Estimation de l'effet des différentes variables descriptives des facteurs limitants sur le taux de protéines pour les 3 variétés (en jaune : effet négatif, en bleu : effet positif).

b. Caractérisation variétale

Les variables sélectionnées dans le cadre de la caractérisation variétale sur le Rdt sont sensiblement différentes de celles sélectionnées pour RdtP. Mis à part la rouille brune et les stress hautes températures durant le remplissage, sélectionnés dans les deux cas, les faibles rayonnements en phase hivernale et en début montaison et la septoriose sont sélectionnés lorsque l'on travaille sur le Rdt alors que la densité de peuplement en sortie hiver, le stress faible rayonnement à la méiose et le stress azoté sont sélectionnés pour RdtP. Une caractérisation variétale sur RdtP permet donc de classer les variétés pour leur résistance aux stress azotés (Figure 7-C), ce que ne permet pas une caractérisation sur Rdt (Koreli et Apache sont plutôt résistantes à ce stress et Mendel y est plutôt sensible). De plus nous voyons, avec l'exemple de la rouille brune (Figure 7-A&B), que les classements variétaux peuvent varier sensiblement lorsque la caractérisation est réalisée sur Rdt ou sur RdtP. La variété Sankara est par exemple plutôt résistante à la rouille brune si on considère RdtP mais y est très sensible si on considère Rdt. Ainsi, cette variété en situation de forte pression de rouille brune aura tendance à voir son Rdt chuter et sa TP augmenter. Notons ici que mis à part pour Soissons et Réctal, les cotations fournies pour la rouille brune par Diagvar à partir du Rdt correspondent à celles présentées dans le tableau 5-B. Ces différences dans la nature des variables sélectionnées et dans les notes de résistance établies nous montrent que

travailler sur Rdt et RdtP ne donne pas des informations redondantes mais complémentaires. Cependant, certaines variables qui pourraient être introduites dans le modèle au cours de la première étape de l'algorithme comme la verse (variables globalement significatives et répondant à la contrainte de signe) n'apparaissent pas dans le modèle final. Le fait qu'elles n'aient pas été introduites au cours de l'algorithme est dû aux corrélations nombreuses entre FL et pose la question, dans ce contexte, de la pertinence du modèle final par rapport à un ensemble d'autres modèles susceptibles d'apporter une information intéressante sur les variétés.

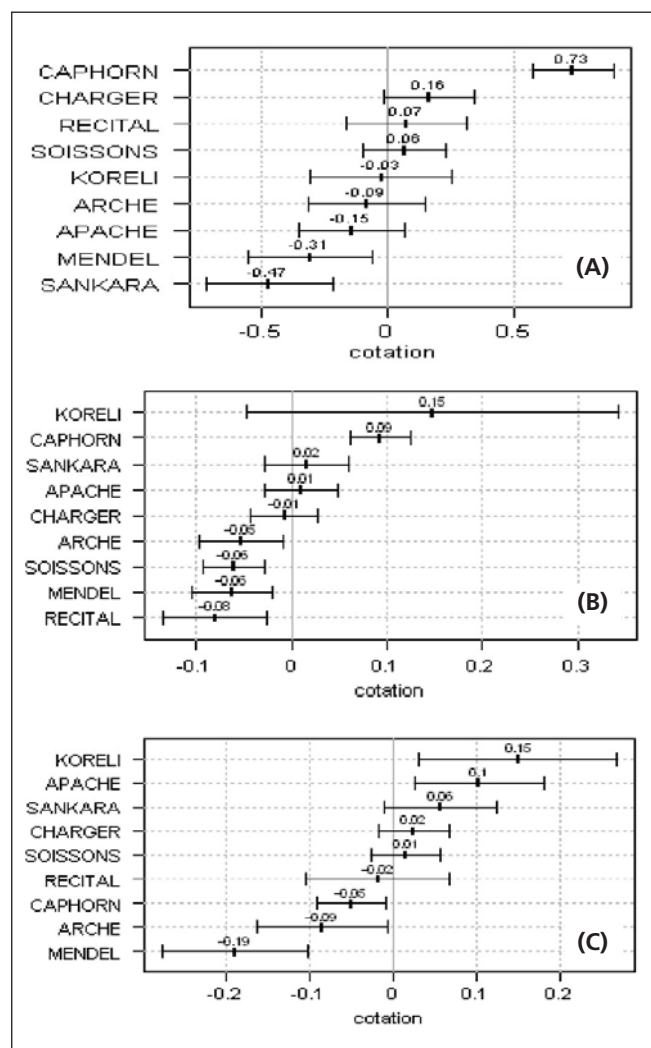


Figure 7 : Notes de tolérances variétales à la rouille brune estimées à partir des rendements (A), et des rendements en protéines (B). Notes de tolérances variétales à un stress azoté estimées à partir des rendements en protéines (C).

4. La prise en compte de la précocité permet-elle d'améliorer la prédiction des écarts à la régression "rendement - teneur en protéines"

Depuis 2006, les écarts à la régression "rendement - teneur en protéines" sont pris en compte à l'inscription pour attribuer des bonus aux lignées qui, à rendement égal,

obtiennent une teneur en protéines significativement plus élevée. Or, dans les essais variétaux, les interventions culturales (et en particulier les apports d'engrais azoté) ne sont pas réalisées au stade optimal pour chaque génotype, mais à une date commune qui peut s'avérer plus favorable à certaines lignées qu'à d'autres, en fonction des différences de précocité.

Nous avons donc analysé si la prise en compte de la précocité permettait d'obtenir de meilleures estimations pour les écarts à la relation négative entre rendement et teneur en protéines.

► Matériel et méthodes

Un dispositif expérimental impliquant 15 génotypes et 3 conduites azotées a été conduit sur 2 ans. En 2007, les essais ont été implantés à Cappelle, Clermont-Ferrand, Grignon et Orgerus, et en 2008 à Clermont-Ferrand, Grignon, Premesques et Verneuil l'Etang. Les 3 conduites azotées différaient par la date du dernier apport d'azote, réalisées :

- à l'épiaison du génotype le plus précoce ("N date précoce") ;
- à l'épiaison du génotype le plus tardif ("N date tardive") ;
- à la date d'épiaison de chacun des génotypes ("N stade constant").

Les 15 génotypes ont été choisis de manière à couvrir une large gamme de précocité, avec :

- Récital, Aubusson, Epidoc, Soissons et Apache (génotypes très précoces à précoces),
- Mendel, Caphorn, Arche et Toisondor (précocité intermédiaire),
- Quebon, Charger, Koréli, Sankara, Ephoros et Rytmic (génotypes tardifs à très tardifs).

Une étude antérieure, portant sur la relation "rendement - teneur en protéines" dans les essais CTPS, avait également montré que parmi ces 15 génotypes, Quebon se distinguait par un écart à la régression significativement positif, et Récital par un écart significativement négatif.

► Résultats et discussion

a. Caractéristiques des expérimentations 2007 et 2008

La précision des essais réalisés en 2007 et 2008 a été tout à fait satisfaisante (valeurs des CV et ETR généralement inférieures à 5, sauf pour Grignon en 2007 et Premesques en 2008, où ces valeurs étaient légèrement supérieures). Les essais présentaient un bon niveau de productivité les 2 années (de 83 q/ha en moyenne à Cappelle en 2007, jusqu'à 113 q/ha en moyenne à Verneuil en 2008). Les teneurs en protéines ont également été élevées (toujours supérieures à 12% en moyenne, sauf à Clermont-Ferrand en 2007 où la moyenne était voisine de 11%). Le dernier apport d'azote a donc bien joué son rôle qui est d'augmenter la teneur en protéines du grain.

b. Comparaison des niveaux d'interaction "génotype x milieu" et "génotype x conduite"

Nous avons approché les interactions "génotype x milieu" (GxM) et "génotype x conduite" (GxC) à travers le calcul des corrélations de rangs de Spearman : en effet, quand le classement des génotypes est bien conservé d'un milieu à

l'autre, ou d'une conduite à l'autre, cela indique un faible niveau d'interaction.

Pour les 2 caractères, les interactions GxM apparaissent assez fortes : sur les 28 couples de lieux ($n(n-1)/2$, avec $n = 8 =$ nombre d'essais réalisés sur les années 2007 et 2008) qui, pour chacune des conduites, permettent d'étudier ces interactions, les valeurs moyennes des corrélations de Spearman sont faibles (de l'ordre de 0.4 pour le rendement, et de l'ordre de 0.5 pour la teneur en protéines). Ces valeurs sont tout à fait conformes à celles qu'on trouve habituellement sur des dispositifs multiloceaux.

Par comparaison, les interactions GxC apparaissent beaucoup plus faibles que les interactions GxM : sur les 24 couples de conduites (3 couples par lieu d'essai x 8 lieux sur l'ensemble des 2 années) disponibles pour l'étude des interactions GxC, les valeurs moyennes des corrélations de Spearman sont supérieures à 0.75, pour le rendement et la teneur en protéines. Le changement de date du dernier apport d'azote n'induit donc que de faibles différences de classement des géotypes pour les 2 caractères.

c. Relation rendement - teneur en protéines et écarts à la régression

La figure 8 présente la relation rendement - teneur en protéines, pour les 3 conduites, en utilisant les valeurs moyennes calculées sur l'ensemble du dispositif (années 2007 + 2008). Les écarts à la régression de Quebon (variété qui aurait été en situation de bonus au CTPS) et Récital (variété à écart systématiquement très négatif, pour les nombreuses années où elle a été témoin CTPS), correspondent tout à fait à ce qui était attendu. On voit également que Rytmic, et dans une moindre mesure Caphorn, sont 2 variétés à comportement favorable (écarts positifs), et qu'au contraire Charger et Arche sont 2 variétés à comportement défavorable (écarts négatifs).

Les écarts à la régression "rendement - teneur en protéines" apparaissent très bien corrélés d'une conduite à l'autre, avec des coefficients de détermination de 0.85 pour la relation entre les écarts des conduites "N date précoce" et "N stade constant", 0.85 pour la relation entre les écarts des conduites "N date précoce" et "N date tardive", et 0.91 pour la relation entre les écarts des conduites "N stade constant" et "N date tardive".

Les écarts à la régression "rendement - teneur en protéines" obtenus sur le dispositif FSOV apparaissent également bien corrélés aux écarts qui avaient été calculés sur les essais CTPS (années 1995 à 2009) : les coefficients de détermination sont respectivement de 0.74, 0.76 et 0.71 pour les conduites "N date précoce", "N stade constant" et "N date tardive". Ceci confirme les résultats de plusieurs études qui ont montré que ces écarts étaient déterminés de manière relativement forte par la génétique : les estimations des écarts, basées sur des moyennes multilocales et pluri-annuelles, apparaissent assez robustes, en dépit des fortes interactions "géotype x environnement" qui peuvent affecter le rendement et la teneur en protéines.

Dans l'estimation des écarts à la régression rendement - teneur en protéines, les imprécisions viennent principalement des interactions "géotype x environnement" qui

introduisent du "bruit" dans les données de rendement et de teneur en protéines. Les données des essais FSOV (résultats non présentés) permettent de montrer que l'interaction entre la date du dernier apport d'azote et la précocité des géotypes ne représente qu'une faible partie du "bruit" dû aux interactions "géotype x environnement". En définitive, le faible niveau des interactions "géotype x conduite" pour le rendement et la teneur en protéines, fait que la date du dernier apport d'azote n'a que peu d'incidence sur l'estimation des écarts à la régression "rendement - teneur en protéines".

d. Extrapolation à des dispositifs à intrants réduits

L'expérimentation FSOV faisait varier la date du dernier apport d'azote dans le cadre d'un itinéraire technique intensif (fertilisation azotée ajustée à des objectifs de rendement élevés, et couvertures fongicide et insecticide non limitantes). Pour pouvoir comparer les écarts à la régression "rendement - teneur en protéines" obtenus pour des itinéraires techniques contrastés, nous nous sommes basés sur les données du réseau de création variétale de l'INRA. Dans ce réseau, les lignées en fin de sélection sont mises en expérimentation à la fois en conduite intensive classique et en conduite "faibles intrants" (densité de semis réduite de 40% ; fertilisation azotée réduite de 60 unités - objectif de rendement inférieur de 20 q/ha par rapport à l'intensif -, avec suppression de l'apport tallage ; absence de couverture fongicide). Le tableau 8 indique que les écarts à la régression calculés pour les 2 conduites sont fortement corrélés, quel que soit le regroupement d'années considéré (on peut cependant noter une corrélation plus faible dans le cas du regroupement des années 2007 et 2008).

Années d'expérimentation	R ²
2003 + 2004	0,64
2004 + 2005	0,51
2005 + 2006	0,88
2006 + 2007	0,68
2007 + 2008	0,36
2008 + 2009	0,64

Tableau 8 : Coefficients de détermination de la relation entre les écarts à la régression "rendement - teneur en protéines" obtenus en conduite intensive et en conduite "faibles intrants", pour différentes années d'essais du réseau de création variétale de l'INRA.

Ces résultats ne permettent pas d'extrapoler les résultats de l'expérimentation FSOV (c'est-à-dire un effet peu marqué, dans le cas d'une conduite intensive, de la date du dernier apport d'azote sur les estimations des écarts à la régression "rendement - teneur en protéines"), au cas des conduites "faibles intrants". Cependant, ils confirment la robustesse des estimations de ces écarts, puisque ceux-ci apparaissent assez stables aussi bien lorsqu'ils sont calculés sur des dispositifs expérimentaux indépendants (essais FSOV et essais CTPS), que lorsqu'ils sont obtenus avec des itinéraires techniques contrastés (Tableau 8).

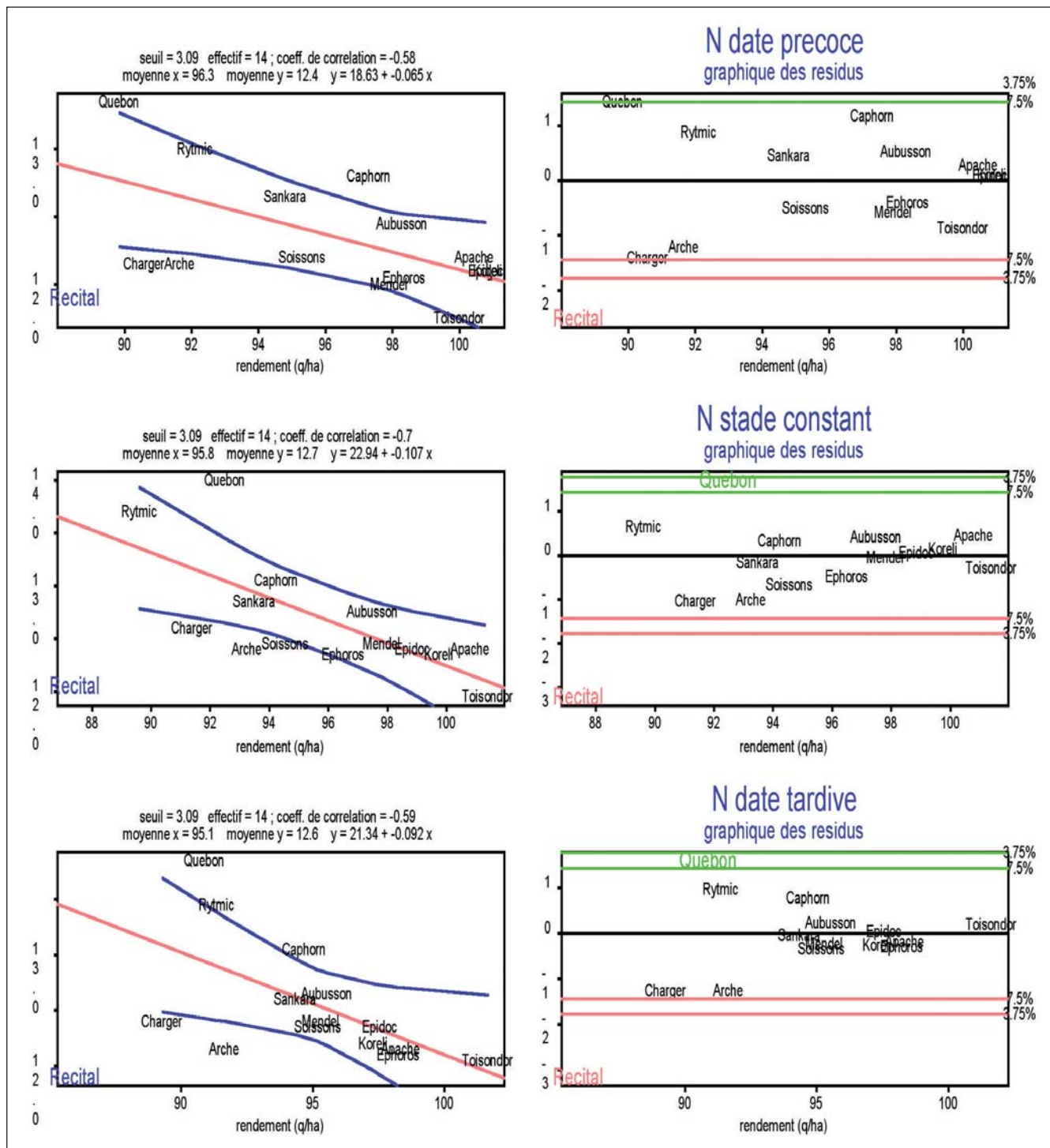


Figure 8 : Relation "rendement - teneur en protéines" et écarts à la régressions calculés sur les moyennes multilocales 2007+2008, pour les 3 conduites.

5. Conclusions et perspectives

Pour caractériser rapidement le statut azoté d'un grand nombre de génotypes, aucune des mesures testées dans ce projet ne permet d'approcher avec une précision suffisante le statut azoté de différentes variétés de blé. Les approches 'couvert', les plus prometteuses en termes de débit, nécessitent des études détaillées pour mieux comprendre et donc mieux prendre en compte les effets de structure du couvert. L'amélioration de ces méthodes indirectes passera sans doute par la combinaison de mesures de

réflectance comme testée ici et de 'fraction de trou' pour estimer l'indice foliaire. La géométrie de mesure devra être optimisée pour limiter ou prendre en compte les effets angulaires de structure. Enfin, les perspectives apportées par de nouveaux capteurs utilisant la fluorescence de la chlorophylle permettent d'envisager d'avoir accès de façon plus directe à l'état physiologique de la plante.

L'utilisation combinée d'un modèle de culture et d'une mesure (par exemple l'INN à floraison) permet de caractériser avec une bonne précision la dynamique de nutrition azotée de chaque variété au sein d'un essai. Cette

méthode permet de valoriser l'ensemble de l'information disponible sur chaque situation, tout en n'étant pas trop contraignant sur les entrées requises et la précision du modèle. L'accès à l'état du couvert à floraison par une mesure indirecte (SPAD) ne diminue pas l'intérêt de la méthode testée. Il serait maintenant intéressant d'appliquer cette méthode dans des essais variétés dans le but d'utiliser l'information simulée sur la dynamique d'évolution de l'INN de chaque variété pour analyser la réponse de celle-ci aux carences azotées.

La méthode du diagnostic agronomique, mise au point pour analyser le rendement, peut être utilisée pour caractériser la teneur en protéines. La plupart des FL identifiés par le diagnostic agronomique affecte simultanément Rdt et RdtP. Nous avons identifié relativement peu de FL spécifiques de RdtP, mais parmi eux se trouve logiquement le stress azoté. Si l'application du diagnostic directement sur TP nous semble peu recommandable, nous avons montré qu'il est possible d'estimer l'effet sur TP des facteurs limitants identifiés par les diagnostics combinés sur Rdt et RdtP. Cet effet étant variable selon la variété considérée, il apparaît nécessaire de travailler avec plusieurs variétés-témoins aux comportements contrastés.

Nous avons observé davantage de différences entre Rdt et RdtP dans le cadre de la caractérisation variétale. Ces différences s'observent dans la nature des variables sélectionnées (on retrouve le rôle spécifique de l'alimentation azotée pour expliquer RdtP) ainsi que dans les classements variétaux obtenus (les classements pour la

résistance à la rouille brune par exemple varient selon que l'on travaille sur Rdt ou RdtP).

Que ce soit pour le diagnostic agronomique ou la caractérisation variétale, il est apparu clairement le besoin de travailler sur le problème des corrélations entre variables environnementales : soit, en amont de la démarche, par un travail de présélection des situations et des variables à considérer à partir d'une analyse fine des corrélations entre variables retenues, soit par l'utilisation de méthodes statistiques gérant mieux que la régression factorielle, la régression stepwise ou le mélange de modèle les variables explicatives corrélées entre elles.

Pour sélectionner des variétés valorisant bien l'azote, une des possibilités est de favoriser les lignées dont l'écart par rapport à la relation "rendement - teneur en protéines" est significativement positif. Nos résultats montrent que les estimations des écarts à la régression, lorsqu'elles sont obtenues à partir de valeurs moyennes de rendement et de teneurs en protéines provenant de dispositifs multi-locaux, sont relativement robustes. En particulier, ces estimations ne semblent pas dépendre de la date du dernier apport d'azote (elles ne sont pas beaucoup perturbées par les différences de précocité entre les génotypes).

D'un point de vue pratique, ceci conforte le système de bonification mis en place au niveau des épreuves d'inscription du CTPS pour les lignées qui, à rendement égal, ont des teneurs en protéines significativement supérieures.

Références bibliographiques

Lelong C.D., Burger P.H., Jubelin G., Roux B., Labbé S. and Baret F. (2008). Assessment of Unmanned Aerial Vehicles Imagery for Quantitative Monitoring of Wheat Crop in Small Plots Sensors 2008, 8, 3557-3585;

Cartelat A., Cerovic Z.G., Goulas Y., Meyer S., Lelarge C., Prioul J.-L., Barbottin A., Jeuffroy M.-H., Gate P., Agati G. and Moya I. (2005). Optically assessed contents of leaf polyphenolics and chlorophyll as indicators of nitrogen deficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.). Field Crop Research 91-1 p. 35-49

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

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

Lecomte C., Prost L., Gauffreteau A. (2009). Présentation d'une méthode pour améliorer la connaissance des aptitudes variétales, intérêt des modèles, besoins de développements nouveaux. Innovations Agronomiques 7, 105-119.

Prost L., Makowski D., Jeuffroy M.H. (2008). Comparison of stepwise selection and Bayesian model averaging for yield gap analysis. Ecological Modelling 219. 66-76.

Jeuffroy M.H., Bouchard C. (1999). Intensity and Duration of Nitrogen Deficiency on Wheat Grain Number. Crop Sci., 39, 1385-1393 - Naud *et al.*, 1997

Jeuffroy M.H., Recous S. (1999). Azodyn: a simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilisation. Eur. J. Agr., 10, 129-144.

David C., Jeuffroy M.H. (2009). A sequential approach for improving AZODYN crop model under conventional and low-input conditions. Eur J Agr, 31, 177-182.

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.

Annexe 1

Code	Facteur limitant correspondant
retlv	Retard à la levée
npm2	Nombre de plantes / m ²
srglhv	Faible rayonnement hivernal (somme des rayons globaux journaliers hivernaux)
stmphv	Faible croissance hivernale (somme des tmp moyennes journalières hivernales en base 0)
rgsthv	Faible quotient photohermique hivernal (rapport srglhv / stmphv)
spetphv	Sécheresse hivernale (somme des différences P-ETP hivernales <0)
stdg	Dégâts de gel hivernal en somme de tmp mini inférieures au seuil de résistance
njss	Nombre de jours secs successifs autour du stade épi 1 cm
srglem	Faible rayonnement au début de la montaison (somme des rayons globaux journaliers)
stmpem	Faible croissance au début de la montaison (somme des tmp moyennes journalières en base 0)
rgstem	Faible quotient phothermique au début de la mont. (rapport srglem /stmpem)
spetpem	Sécheresse au début de la montaison (somme des différences P-ETP <0)
sdfem	Déficit hydrique cumulé au début de la montaison
sri1045m	Faible rayonnement à la méiose (somme des rayons globaux journaliers < 1045 J)
nji1045m	Faible rayonnement à la méiose en nombre de jours
st25m	Fortes températures à la méiose en somme de tmp max supérieures à 25°C
srglmf	Faible rayonnement en fin de montaison (somme des rayons globaux journaliers)
stmpmf	Faible croissance en fin de montaison (ssomme des tmp moyennes journalières en base 0)
rgstmf	Faible quotient phothermique en début de montaison (rapport srglmf /stmpmf)
spetpmf	Sécheresse en fin de la montaison (somme des différences P-ETP <0)
sdfmf	Déficit hydrique cumulé en fin de montaison
st25ef	Fortes températures entre épiais. et flor. en somme de tmp maximales supérieures à 25°C
sti4	Dégâts de gel sur épi en somme de températures inférieures au seuil de -4°C
inn	Carences en azote pendant la montaison (indice de nutrition azotée <1)
st0f	Gel à la floraison en somme de températures inférieures au seuil de 0°C
srglfl	Faible rayonnement au début du rempl. (somme des rayons globaux journaliers)
spetpfl	Sécheresse au début du remplissage (somme des différences P-ETP <0)
sdffl	Déficit hydrique cumulé au début du remplissage
st25fl	Fortes température entre flor. et stade laiteux en somme de tmp maximales supérieures à 25°C
srgllm	Faible rayonnement en fin de remplissage (somme des rayons globaux journaliers)
spetplm	Sécheresse en fin de remplissage (somme des différences P-ETP <0)
sdfilm	Déficit hydrique cumulé en fin de remplissage
st25lm	Fortes tmp entre stade laiteux et maturité en somme de tmp maximales supérieures à 25°C
bmax	Note maximale de rouille brune sur tout le cycle
jmax	Note maximale de rouille jaune sur tout le cycle
nmax	Note maximale de rouille noire sur tout le cycle
sfmax	Note maximale de septoriose sur feuilles sur tout le cycle
omax	Note maximale d'oidium sur tout le cycle
mpmax	Note maximale de maladies du pied sur tout le cycle
merp	Note maximale de maladies de l'épi sur tout le cycle
vmax	Note maximale de verse sur tout le cycle

Annexe 1 : Liste des variables retenues pour caractériser les stress environnementaux dans le temps.