

[N-BTH] Méthodes d'estimation des indicateurs d'efficacité de valorisation de l'azote par les nouvelles variétés de blé tendre

Jean-Pierre COHAN^{*1}, François-Xavier OURY², Aurélie MAILLIARD³, Josiane LORGEOU^{*4}, Marie-Hélène BERNICOT³, Christine LE SOUDER⁴, Adeline STREIFF⁴, Sonia GEOFFROY⁴, Philippe LEREBOUR⁵, Thierry MOITTIE⁵, Patrice SENELLART⁵, Olivier DRUELLE⁶, Corentin BONNARD⁶, François GUION⁷, Jacques LE GOUIS²

1 - ARVALIS-Institut du végétal - Station expérimentale de La Jaillière - La Chapelle St Sauveur - 44370 Loireauxence

2 - INRA-UCA - UMR GDEC - 5, chemin de Beaulieu - 63000 Clermont-Ferrand

3 - GEVES - Domaine de l'Anjouère - 49370 La Pouze

4 - ARVALIS-Institut du végétal - Station expérimentale - 91720 Boigneville

5 - UFS - 17, rue du Louvre - 75001 Paris

6 - Semences de France - Ferme du Corbeau - 91490 Milly la Forêt

7 - ANMF - 66, rue de la Boétie - 75008 Paris

* **Coordinateur** : Jean-Pierre COHAN (jp.cohan@arvalis.fr), Josiane LORGEOU (j.lorgeou@arvalis.fr)

1. Introduction

Notre projet a été motivé par l'attente de l'agriculture française et européenne de pouvoir répondre aux besoins d'augmentation et d'optimisation de la production des céréales tout en maintenant la qualité des produits, en limitant les coûts de production et en réduisant les effets négatifs sur l'environnement. L'azote est un élément nutritif essentiel qui influence fortement le rendement en grains et la teneur en protéines. Cependant, La production, le transport et l'application des engrais azotés sont très consommateurs d'énergie et le prix de ces engrais est indexé au prix du pétrole. Ainsi le prix des engrais simples azoté a très fortement varié dans les dix dernières années (INSEE). Cela se traduit pour l'agriculteur par un coût équivalent à environ 25-30% des charges opérationnelles. Un des moyens de diminuer ces charges est d'améliorer l'efficacité d'utilisation par la culture et notamment l'efficacité d'absorption. En effet seuls environ 60% de l'azote disponible dans le sol seront absorbés par le blé (Gaju *et al.*, 2011 ; Cormier *et al.* 2016). Une partie est perdue par lessivage entraînant une pollution des eaux de surface et des nappes phréatiques. Une autre partie est volatilisée sous forme d'oxyde nitreux, un gaz à effet de serre supérieur à celui du gaz carbonique. Ainsi, les engrais azotés seraient responsables tout au long de leur cycle d'environ 50% des émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole. Pour limiter ces impacts négatifs, il peut être envisagé une diminution des apports azotés. Mais cela doit se faire tout en maintenant le rendement et la teneur en protéines. Il semble donc essentiel de favoriser la sélection de variétés de blé plus efficace dans leur utilisation de l'azote pour produire du rendement et des protéines.

Comme pour la plupart des cultures, l'azote est un facteur de production essentiel pour le blé tendre d'hiver (Jensen *et al.* 2011). Le maintien d'un état de nutrition azotée non limitant est donc un enjeu majeur pour assurer une collecte de blé répondant aux objectifs de production quantitative et qualitative pour les débouchés intérieurs et export, particulièrement exigeants en matière de teneur en protéines du grain (Méléard 2007, ARVALIS 2013). En parallèle, les pertes d'azote réactif dans différents compartiments environnementaux (atmosphère, aquifère...) sont dans certains cas à l'origine d'impacts négatifs sur la qualité de l'air, la qualité de l'eau et le bilan gaz à effet de serre des filières de production agricoles (Galloway *et al.* 2003, Sutton *et al.* 2011). Enfin, l'instabilité des cours du prix des engrais azotés, avec néanmoins une tendance haussière sur le long terme, fait que le recours aux intrants azotés de synthèse pèse de plus en plus lourd dans le bilan économique des

exploitations françaises (Laurent et Leveau 2014). Pour toutes ces raisons, l'amélioration de l'efficacité des apports d'azote reste une des priorités de l'optimisation des itinéraires culturaux du blé tendre d'hiver (Hawkesford 2014). Ajoutons enfin que les contraintes réglementaires (directive Nitrates, directive NEC, plans de protection de l'atmosphère) et/ou économiques ainsi que des choix volontaires d'orientation des systèmes de culture vont probablement générer de plus en plus de situations où le blé tendre d'hiver sera conduit en état de nutrition azotée sous-optimale. Il devient donc nécessaire de s'intéresser également au comportement des variétés dans ces situations de carence subies ou volontaires.

La réponse à ces enjeux fait nécessairement intervenir plusieurs leviers qui ont tous bénéficié d'importants travaux de recherches et développements depuis 30 ans : l'élaboration de la méthode du bilan prévisionnel (Rémy and Hébert, 1977; Rémy and Viaux, 1983), le développement d'outils de pilotage de la fertilisation azotée (Soenen *et al.* 2017), l'amélioration des pratiques d'apports des engrais (Bouthier 1997; Limaux *et al.*, 1999; Cohan et Bouthier 2010) et l'adoption des formes d'engrais les plus efficaces (Chambers et Dampney 2009, Sylvester-Bradley *et al.* 2014). Associé à tous ces leviers agronomiques, l'obtention (par les généticiens et les sélectionneurs), l'évaluation (par les agronomes) puis l'adoption (par les agriculteurs) de variétés affichant la meilleure efficacité de valorisation de l'azote possible, est un moyen d'action majeur (Good *et al.*, 2004; Hirel *et al.* 2007; Foulkes *et al.*, 2009, Cormier *et al.* 2016). Actionner ce levier nécessite néanmoins de disposer de traits à sélectionner clairement identifiés et d'une caractérisation fine sur le critère « efficacité de l'azote apporté » des variétés mises sur le marché. En 2014, seuls deux indicateurs étaient utilisés en routine. La *Grain Protein Deviation* (GPD, Oury et Godin 2007) représente l'écart à la relation négative rendement-teneur en protéines attribuable à une variété. Elle est utilisée dans le processus d'inscription français piloté par le CTPS-GEVES depuis 2007 et est maintenant prise en compte dans la plupart des programmes de sélection. Elle n'a néanmoins pas d'utilisation pratique dans le cadre de la gestion de la fertilisation azotée par l'agriculteur. Le besoin unitaire en azote par unité de rendement (*coefficient b*, Le Souder et Bernicot 1993) est couramment utilisé dans les outils de gestion de la fertilisation azotée pour estimer le besoin global en azote de la culture (par multiplication avec l'objectif de rendement). Des valeurs par variété sont diffusées tous les ans par ARVALIS-Institut du végétal et relayées par les organismes agricoles économiques et de développement. Le coefficient *b* présente néanmoins deux inconvénients : ses bases scientifiques

ont été définies dans les années 90 avec un paysage variétal différent du panorama actuel de la diversité génétique à disposition des agriculteurs et il ne prend en compte qu'un objectif de production quantitatif, sans considérer les objectifs spécifiques de teneur en protéines du grain imposés par les marchés. *A contrario*, la littérature scientifique propose de nombreux indicateurs susceptibles d'être utilisés. En particulier, les travaux en génétique se reposent beaucoup sur la notion de *Nitrogen Use Efficiency* (NUE, Moll *et al.*, 1982) et de ses composantes la *Nitrogen Uptake Efficiency* (NupE) et la *Nitrogen Utilization Efficiency* (NutE) (Hirel *et al.*, 2007; Sylvester-Bradley et Kindred 2009). Les travaux en agronomie, eux, ont le plus souvent recours à la notion d'*Apparent Fertilizer Recovery* (AFR, ou Coefficient Apparent d'Utilisation-CAU en français) (Foulkes *et al.*, 1998; Limaux *et al.*, 1999) et à la notion de besoin unitaire en azote (Le Souder et Bernicot 1993).

Afin de mettre au point de nouveaux indicateurs d'efficacité de l'azote pour différents usages (sélection, préconisation et pilotage des variétés) et critères recherchés (rendement, teneur en protéines, propriétés de panification), le projet N-BT a été lancé en 2014 réunissant 6 partenaires : ARVALIS-Institut du végétal, INRA, GEVES, UFS, Semences de France et ANMF. Il a poursuivi trois objectifs :

- Elaborer de nouveaux indicateurs d'efficacité de valorisation de l'azote des nouvelles variétés de blé tendre d'hiver, y compris des indicateurs de tolérance à une carence azotée.
- Evaluer les conditions de leur mise en pratique en routine par le sélectionneur et l'évaluateur de variétés.
- Mettre à disposition des résultats de recherches permettant d'explicitier les différences d'efficacité de l'azote entre variétés, à destination des sélectionneurs et du monde de la recherche en génétique et en agronomie.

Le présent article a pour objet de présenter la synthèse des travaux réalisés au cours de ce projet conduit d'octobre 2014 à mars 2018.

2. Matériel et méthode

Trois réseaux expérimentaux complémentaires ont été mis en place et valorisés : le nombre de variétés allant croissant à mesure que l'intensité analytique et le nombre de régimes azotés testés allaient décroissants. Ils ont chacun fait l'objet d'une procédure d'analyse de données adaptée à leurs caractéristiques (nombre de régimes de fertilisation azotée, variables mesurées).

► Réseau expérimental n°1

Le réseau expérimental n°1 a regroupé des essais méthodologiques à haute intensité analytique, destinés à étudier de manière détaillée les interactions entre les variétés et les régimes de fertilisation azotée. Il a aussi été le support de plusieurs procédures de validation de méthodes élaborées sur les autres réseaux. **Le protocole expérimental mis en place sur le réseau n°1** a consisté à évaluer 6 à 12 variétés de blé tendre d'hiver soumises à des doses croissantes d'apport d'engrais azoté minéral (dispositif dit en « courbe de réponse »). La courbe de réponse était constituée de 6 doses totales d'engrais apportées en 3 apports (stades tallage, début montaison, fin montaison) sous forme d'ammonitrate. Ces 6 doses étaient réparties de la manière suivante : témoin sans apport, X-80, X-40, X, X+40 et X+80 kg N.ha⁻¹, X représentant la dose totale prévisionnelle d'engrais azoté calculée à la sortie de l'hiver. Pour les plus petites doses totales, un fractionnement en 2 apports a pu être adopté dans certains essais en privilégiant les apports tardifs pour éviter d'induire un biais dans la contribution des apports à la teneur en protéines du grain. Les essais ont tous été réalisés en micro-

parcelles par plusieurs stations expérimentales d'ARVALIS-Institut du végétal selon un plan expérimental en criss-cross ou en split-plot. 6 essais ont été implantés sur la campagne 2013-2014, 6 essais en 2014-2015 et 4 essais en 2015-2016. Un essai de la campagne 2013-2014 n'a pas été conservé pour l'analyse en raison d'importants dégâts de grêle survenus en fin de cycle. De même, un essai de la campagne 2014-2015 a été retiré en raison d'une trop grande hétérogénéité de sol affectant la précision des résultats. Enfin, sur la campagne 2015-2016, un essai n'a pas été mené à son terme en raison de problème d'implantation, et un essai a été retiré de l'analyse en raison d'un comportement non interprétable dans le contexte climatique atypique de la récolte 2016. Au final, 12 essais sur les 16 implantés ont été valorisés dans le cadre du projet, représentant une diversité de sol et de climat correspondant aux principaux bassins de production du blé tendre en France. Les essais ont tous fait l'objet d'une caractérisation détaillée du sol (analyse physico-chimique complète sur 3 horizons 0-30 cm/30-60 cm/60-90 cm), ainsi que de l'enregistrement quotidien des données agro-météorologiques de base (températures, pluie, rayonnement global, ETP...). Afin d'étudier finement les interactions de la variété avec le régime de fertilisation azotée sur de multiples variables et indicateurs agronomiques et physiologiques, de nombreuses mesures ont été réalisées : production et teneur en azote des grains et des pailles, teneur en protéines du grain, stock d'azote minéral du sol à la récolte (reliquat post-récolte), indices de qualité de panification. La quantité d'azote prélevée par la plante entière (grains+pailles+racines) a été estimée en multipliant la quantité d'azote présente dans les grains et les pailles par 1.25.

Les **données élémentaires** (variables mesurées et calculées sur chaque variété à chaque dose d'azote) ont fait l'objet d'une analyse de variance en modèle mixte permettant de tester l'effet des facteurs variété, azote et essai de manière directe et en interaction entre eux. Le coefficient apparent d'utilisation de l'azote (CAU) de chaque variété dans chaque essai tel que défini dans Limaux *et al.* 1999, ainsi que le NUE et ses composantes telles que définies dans Hirel *et al.* (2007) et Sylvester-Bradley et Kindred (2009), ont été calculés sous chaque régime de fertilisation et étudiés dans l'analyse de variance citée ci-dessus. Ensuite, **la réponse des différentes variables aux doses croissantes d'engrais azotés** (dispositif en courbe de réponse) a été analysée en ajustant successivement plusieurs modèles statistiques. Nous avons ainsi pu déterminer pour chaque variété le rendement optimal et la dose d'azote nécessaire pour l'atteindre, la teneur en protéines obtenue à l'optimum et la quantité d'azote absorbé nécessaire pour l'atteindre. Ces variables de base ont servi à calculer le besoin d'azote par unité de rendement (coefficient « b ») tel que défini par Le Souder et Bernicot (1993). **En prenant comme référence un objectif de teneur en protéines de 11.5%**, les différents modèles de courbes de réponses ont permis de déterminer l'éventuel besoin unitaire complémentaire pour atteindre cet objectif (coefficient « bc »), et donc le besoin unitaire total pour combiner optimum de rendement et 11.5% de teneur en protéines du grain (coefficient « bq »). Une évaluation de l'impact de l'utilisation de ce coefficient sur le reliquat azoté post-récolte a aussi été réalisée. Enfin, nous avons calculé le coefficient apparent d'utilisation de l'azote (CAU) de chaque variété conduite à son optimum dans chaque essai tel que défini dans Foulkes *et al.* (1998) et Cohan *et al.* (2018), ainsi que la NUE à l'optimum et ses composantes telles que définies dans Hirel *et al.* (2007) et Sylvester-Bradley and Kindred (2009). Les liens entre les différents indicateurs d'efficacité de l'azote sont explicités dans la figure 1. L'ensemble des variables calculées sur la base des courbes de réponses a aussi fait l'objet d'une analyse de variance en modèle mixte pour déterminer l'impact de la variété et de l'essai sur leurs variations.

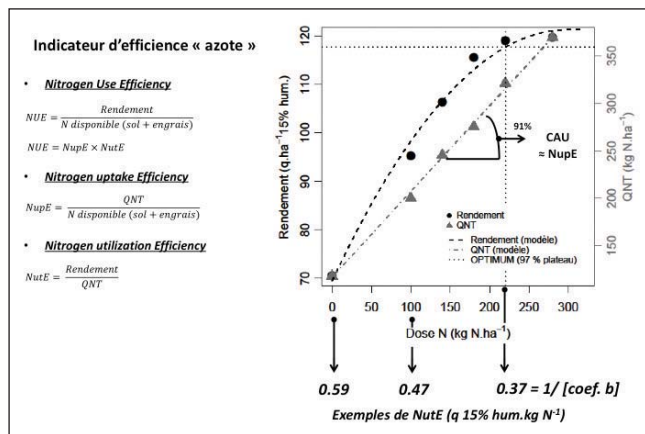


Figure 1 : Liens entre les principaux indicateurs d'efficacité d'absorption et de valorisation de l'azote calculés sur le réseau 1. Adapté de Cohan et al. 2017.

► Réseau expérimental n°2

Le réseau 2 représente le cœur du dispositif expérimental utilisé pour caractériser les variétés vis-à-vis de leur tolérance à une diminution de la fertilisation azotée et vis-à-vis de leur capacité à valoriser l'azote mis à disposition par le sol ou sous forme d'engrais. Il reprend les résultats des sites d'inscription du protocole Evaluation des Variétés Economes en Azote du CTPS. Ces essais CTPS représentent six jeux de données : deux zones (Nord et Sud) x trois couples d'années (2013-2014, 2014-2015 et 2015-2016). Ces essais ont tous été conduits en micro-parcelles selon différents dispositifs statistiques (split-plot, criss-cross, blocs adjacents) et sont décrits de manière détaillée dans un document du GEVES (CTPS/GEVES 2017). En résumé, le protocole consiste à tester les listes variétales soumises au processus d'inscription à 3 régimes de fertilisation azotée : X-80, X et X+40 kg N.ha⁻¹, X représentant la dose totale prévisionnelle d'engrais azoté calculée à la sortie de l'hiver. L'engrais azoté a été apporté en 4 apports (stades tallage, début et mi montaison, fin montaison), les différences de régimes portant essentiellement sur les apports à début montaison. Ils ont été complétés par une expérimentation spécifique du projet N-BT, conduite selon le même protocole sur 12 sites de post-inscription comparant un tronc commun de variétés inscrites en octobre 2014 et bénéficiant de résultats antérieurs du protocole spécifique du CTPS. Plusieurs aléas climatiques et d'expérimentation ont conduit à ne pouvoir valoriser que huit sites (quatre en 2015, et quatre en 2016). Ces huit sites représentent une diversité d'environnements représentative de la zone de culture du groupe des variétés de blé tendre de précocité intermédiaire. Tous ces essais ont été conduits par le GEVES, l'INRA et les semenciers membres du partenaire UFS. Le rendement, la teneur en protéines et le poids de 1000 grains (PMG) ont été mesurés pour toutes les variétés présentes dans les essais du réseau 2. Une caractérisation du sol et une mesure de la quantité d'azote absorbé dans les pailles et le grain sur une variété témoin ont aussi été réalisées. Enfin, des mesures de qualité technologique du grain (panification, alvéogramme de Chopin, Gluten Humide et Gluten Index) ont été effectuées sur certaines modalités de certains essais.

Dans le cas spécifique de l'étude des indicateurs de tolérance à la carence azotée, nous avons fait appel à des jeux de données supplémentaires. Il s'agit de quatre jeux de données issus de deux projets FSOV 2003A et 2010F « azote » antérieurs (FSOV 2004-2005 et FSOV 2011-2012, ce dernier ayant donné lieu à deux expérimentations distinctes, l'une pour des génotypes précoces, notée FSOV-P, et l'autre pour des génotypes tardifs, notée FSOV-T), et du programme PIA BreedWheat ANR 2010-

BTBR-003 (essais conduits en 2012, 2013 et 2014). Ces jeux de données supplémentaires ont permis de gagner en puissance statistique pour l'étude des propriétés des indicateurs de tolérance à une carence en azote. Pour ces quatre dispositifs, le protocole mettait en œuvre deux niveaux d'apports d'engrais azoté : une dose X pour potentiellement atteindre l'objectif de rendement prévisionnel et une dose X-100 kg N.ha⁻¹ pour induire une carence azotée significative.

Les données élémentaires ont fait l'objet d'une analyse de variance en modèle mixte pour évaluer l'impact de la variété, de la dose d'azote, de l'essai (lieu et année) et de leurs interactions sur le rendement et la teneur en protéines du grain.

Les modalités X-80 et X ont été le support de l'étude de 2 indicateurs de tolérance à la carence azotée sur le rendement et la teneur en protéines du grain. Le premier correspond à la perte de rendement de la modalité X-80 par rapport à la modalité X, exprimée en pourcentage du rendement à la dose X, soit la formule (rdt=rendement) :

$$\text{indicateur de tolérance pour le rendement} = \frac{rdt_x - rdt_{x-80}}{rdt_x}$$

Le second correspond à l'écart à la régression (relation positive) entre le rendement de la modalité X et le rendement de la modalité X-80. Comme pour la GPD, sont utilisés les résidus standardisés de la régression pour identifier les génotypes qui, pour un niveau de rendement à la dose X donné, enregistrent une perte de rendement significativement plus faible (ou significativement plus forte) que les autres lorsqu'ils sont cultivés à la dose X-80.

Les 3 modalités X-80, X et X+40 ont été le support de l'étude de **2 indicateurs d'efficacité de valorisation de l'azote** dits « simples » car ne recourant pas à des mesures d'azote absorbé plante entière (seuls les jeux de données CTPS et du projet ont été utilisés car les jeux de données provenant d'autres projets ne comportaient pas de modalité X+40). Ils sont basés sur la régression (calculée pour chaque génotype) entre la quantité d'azote exportée dans les grains (qN grains, calculée à partir du rendement et de la teneur en protéines du grain) et la dose d'azote apportée. On obtient ainsi une ordonnée à l'origine, qu'on peut considérer comme la capacité de la variété à valoriser l'azote du sol, et une pente qui peut être assimilée à sa capacité à valoriser l'apport d'engrais. Une 1^{ère} approche méthodologique pour exploiter les 3 modalités sous la forme d'un dispositif en courbe de réponse a aussi été abordée.

► Réseau expérimental n°3

Le réseau 3 a été constitué par des extraits de deux réseaux d'expérimentations préexistants au projet : le réseau post-inscription ARVALIS (France entière) et le Variétoscope de Semences de France-In Vivo (liste Centre-Précocité intermédiaire). Au total, 115 essais ont été valorisés (39 provenant de Semences de France et 76 provenant d'ARVALIS-Institut du végétal), de 2010 à 2016. **Le protocole** a consisté dans la mise en essais de longues listes variétales soumises à un seul régime de fertilisation azotée (a priori à l'optimum), dans des dispositifs statistiques en bloc de micro-parcelles. Tous les essais ont bénéficié de mesures de rendement et de teneurs en protéines du grain. Les essais réalisés dans la période temporelle couverte par le projet ont aussi bénéficié de mesure complémentaire permettant de mieux caractériser les sites d'essais en terme de dynamique de l'azote (caractérisation du sol, reliquat sortie hiver, reliquat post-récolte).

L'analyse de données du réseau 3 s'est concentrée sur l'élaboration d'une méthode simplifiée de calculs des coefficients b, bc et bq sur la base de validation d'hypothèses simplificatrices à partir des données des réseaux 1 et 2.

3. Résultats et discussion

► Etude détaillée des facteurs impactant l'efficacité du blé tendre vis à vis de l'azote (réseau 1).

L'analyse des données obtenues sur le réseau n°1 indique clairement que la variété, la dose d'engrais azotée et leur interaction ont un effet significatif sur le rendement, la teneur en protéines, la quantité d'azote absorbé par le blé tendre d'hiver et le reliquat azoté post-récolte (Tableau 1). La variété présente aussi un effet significatif sur les ratios à la récolte, mais seul le NHI est impacté par la dose d'azote. Tous les indicateurs d'efficacité de l'azote testés (efficacité globale NUE, efficacité d'absorption de l'azote NupE-CAU et efficacité de valorisation de l'azote absorbé en grain NutE) sont significativement influencés par la variété et la dose d'azote et, à l'exception du CAU, par leur interaction.

L'analyse des données obtenues sur le réseau n°1 indique clairement que la variété, la dose d'engrais azotée et leur interaction ont un effet significatif sur le rendement, la teneur en protéines, la quantité d'azote absorbé par le blé tendre d'hiver et le reliquat azoté post-récolte (Tableau 1). La variété présente aussi un effet significatif sur les ratios à la récolte, mais seul le NHI est impacté par la dose d'azote. Tous les indicateurs d'efficacité de l'azote testés (efficacité globale NUE, efficacité d'absorption de l'azote NupE-CAU et efficacité de valorisation de l'azote absorbé en grain NutE) sont significativement influencés par la variété et la dose d'azote et, à l'exception du CAU, par leur interaction.

	Effets fixes			Effets aléatoires		
	V	N	VAR × N	E × V	E × N	E
Variables de production						
RDT	***	***	***	***	***	***
PROT	***	***	***	***	***	***
QNT	***	***	***	***	***	***
RPR	***	***	**	***	***	***
Ratios à la récolte						
HI	***	ns	ns	***	***	***
NHI	***	***	ns	***	***	***
Indicateurs d'efficacité N						
NUE	***	***	***	***	***	***
NupE	***	***	***	***	***	***
NutE	***	***	**	***	***	***
CAU	*	*	ns	***	***	***

*** ($p < 0.001$) ; ** ($0.001 < p < 0.01$) ; * ($0.01 < p < 0.05$) ; ns = non significatif

Tableau 1 : Analyse de variance sur les données élémentaires du réseau 1. V = variété, N = dose d'engrais N, E = essai. RDT = rendement en grain, PROT = teneur en protéines du grain, QNT = quantité N totale absorbé à la récolte (grain+paille+racine), HI = indice de récolte (Harvest Index), NHI = indice de récolte azote (Nitrogen Harvest Index), CAU = coefficient apparent d'utilisation de l'azote, NUE = Nitrogen Use Efficiency, NupE = Nitrogen Uptake Efficiency, NutE = Nitrogen Utilization Efficiency.

L'analyse des résultats obtenus à l'optimum de fertilisation azotée calculé a posteriori sur les courbes de réponse à l'azote du réseau 1 est aussi riche d'enseignements (Tableau 2). La variété a un effet significatif sur le rendement, la teneur en protéines et la quantité d'azote totale absorbé à la récolte à l'optimum mais pas sur la dose d'azote optimale, ni sur le reliquat post-récolte correspondant. Quand on se donne le double objectif d'atteindre l'optimum de rendement et une teneur en protéines égale à 11.5 %, la variété présente un effet significatif sur la dose d'azote nécessaire pour assurer ce double objectif, mais pas sur la quantité d'azote totale absorbé et le reliquat post-récolte correspondant. Il est intéressant de noter que la variété ne

présente pas d'effet significatif sur la quantité d'azote absorbé pour la conduite « témoin sans apport d'engrais », ce qui reviendrait à dire qu'il n'y a pas de différence variétale sur la capacité à absorber l'azote fourni par le sol. Il faut néanmoins souligner que la précision des mesures sur ce caractère peut dans certains cas être faible et que nous ne pouvons donc pas écarter l'hypothèse de l'effet de cette imprécision sur l'absence de significativité statistique mise en évidence. Pour finir, la variété présente un effet significatif sur les ratios HI et NHI à la récolte et sur tous les indicateurs d'efficacité de l'azote étudiés.

	V (effet fixe)	E (effet aléatoire)
Variables de production		
RDTopt	***	***
DNopt	ns	***
PROTopt	***	***
QNTopt	*	***
RPRopt	ns	***
QNT-ON	ns	***
DNprot	**	***
QNTprot	ns	***
RPRprot	ns	***
Ratios à la récolte		
HIopt	***	***
NHIopt	***	***
Indicateurs d'efficacité N		
NUEopt	***	***
NupEopt	*	***
NutEopt	***	***
CAU	***	***
Coefficient b	***	***
Coefficient bc	***	***
Coefficient bq	**	***

*** ($p < 0.001$) ; ** ($0.001 < p < 0.01$) ; * ($0.01 < p < 0.05$) ; ns = non significatif

Tableau 2 : Analyse de variance sur les données du réseau 1 calculées à l'optimum de fertilisation azotée. V = variété, E = essai. RDT = rendement en grain, DN = dose d'engrais N, PROT = teneur en protéines du grain, QNT = quantité N totale absorbé à la récolte (grain+paille+racine), RPR = reliquat azoté post-récolte, HI = indice de récolte (Harvest Index), NHI = indice de récolte azote (Nitrogen Harvest Index), CAU = coefficient apparent d'utilisation de l'azote, NUE = Nitrogen Use Efficiency, NupE = Nitrogen Uptake Efficiency, NutE = Nitrogen Utilization Efficiency. L'indice « opt » se rapporte à un calcul à la dose N optimale pour le rendement. L'indice « prot » se rapporte à un calcul à la dose N optimale pour le rendement et pour atteindre une teneur en protéines du grain égale à 11.5%. Le suffixe « ON » se rapporte à la modalité sans apport d'engrais N.

Ainsi, à l'optimum de fertilisation azotée, les variétés testées dans le réseau 1 présentent des différences significatives quant à leur capacité à absorber l'azote de l'engrais apporté (Figure 2 pour une illustration avec le CAU), puis à valoriser cet azote absorbé en rendement et en teneur en protéines répondant à la demande des marchés (Figure 3 pour une illustration avec les coefficients b, bc et bq). Ces résultats sont concordants avec ceux décrits dans de nombreuses publications qui mettent en évidence l'effet de la variété sur la NUE et la NutE (Ortiz-Monasterio *et al.* 1997, Foulkes *et al.* 1998, Le Gouis *et al.* 2000, Brancourt Hulmel *et al.* 2003, Gooding *et al.* 2005, Sadras et Lawson 2013, Cormier *et al.* 2013). Concernant la NupE ou le CAU, l'effet variété est aussi souvent mis en évidence mais pas systématiquement (Cormier *et al.* 2013). La plupart de ces études montrent, comme la nôtre, une interaction entre la dose d'azote et la variété sur les indicateurs d'efficacité de l'azote. En l'occurrence, étudier ces indicateurs à l'optimum spécifiquement calculé pour chaque situation permet de s'affranchir de ce phénomène pour mettre en évidence l'impact

de la variété seule. Notons aussi que l'effet de la variété sur le NHI est un phénomène connu dans la littérature (Ortiz-Monasterio *et al.* 1997, Le Gouis *et al.* 2000, Cormier *et al.* 2013). Ce phénomène doit nous inciter à la prudence quand on souhaite utiliser des valeurs moyennes de NHI afin de calculer des indicateurs d'efficacité dans des dispositifs expérimentaux ne disposant pas de mesure des quantités totales d'azote absorbé pour chacune des variétés testées (cf. analyses des réseaux 2 et 3). Enfin, il faut souligner que 1) la dernière étude de ce type réalisée sur des variétés disponibles en France date du début des années 90 (Le Souder et Bernicot 1993) et 2), que nous retrouvons globalement les mêmes résultats alors que le paysage variétal a largement évolué depuis.

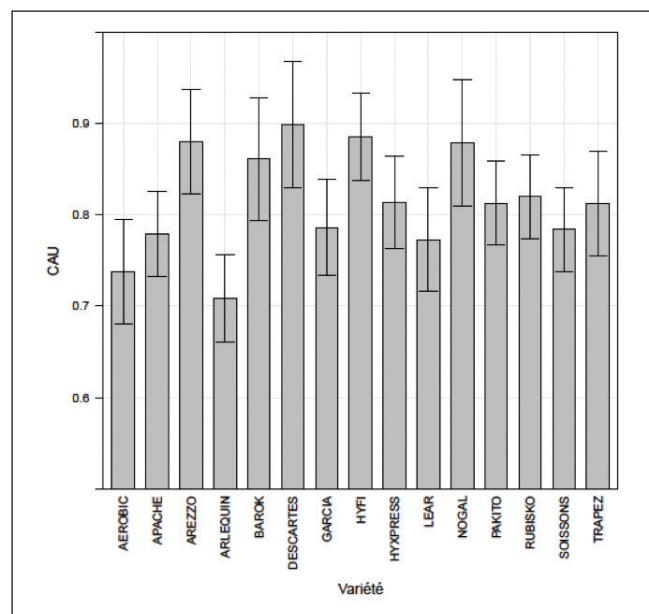


Figure 2 : Coefficient Apparent d'Utilisation de l'azote (CAU) calculés sur le réseau 1. Moyennes ajustées par variété. Les barres verticales représentent les écart-types.

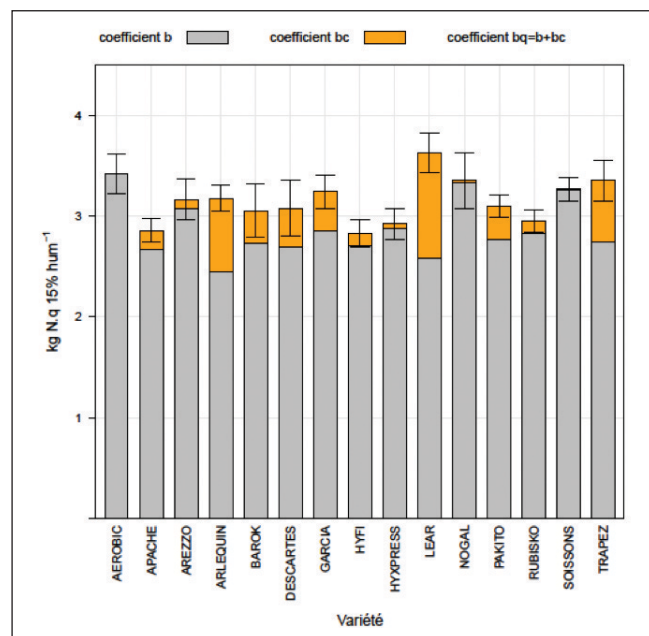


Figure 3 : Coefficients b, bc et bq calculés sur le réseau 1. Moyennes ajustées par variété. Les barres verticales représentent les écart-types calculés pour le coefficient bq (b+bc).

Le reliquat post-récolte est influencé par la dose d'engrais azoté (Tableau 1). La figure 4 illustre la nature de ce lien. Il apparaît que le reliquat post-récolte est relativement stable pour une dose

d'engrais inférieure ou égale à la dose d'engrais azoté optimale. Ce résultat est cohérent avec les études déjà conduites sur ce sujet (Comifer 1997, Comifer 2013). L'accroissement du reliquat post-récolte devient vraiment significatif au-delà d'une limite aux alentours de 35 kg N.ha⁻¹ au-dessus de l'optimum. Pour un objectif de rendement de 90 q.ha⁻¹, cela signifie qu'un besoin unitaire complémentaire (bc) pour atteindre une teneur en protéines égale à 11.5% ne doit pas dépasser 0.4 kg N.q⁻¹.

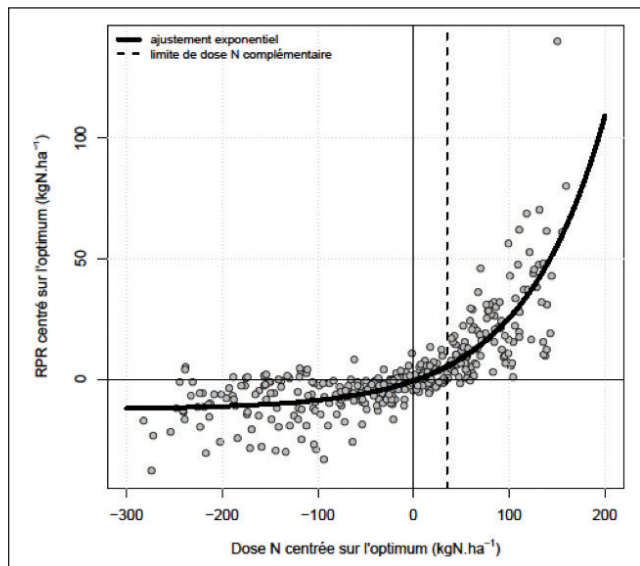


Figure 4 : Relation entre le reliquat azoté post-récolte (RPR) et la dose d'engrais azotée (Dose N) élaborée à partir des données du réseau 1. Axes centrés sur la valeur calculée à l'optimum de fertilisation azotée. La ligne pointillée représente la limite au-delà de laquelle une dose d'azote complémentaire à la dose N optimale pour le rendement induit une progression significative du reliquat post-récolte.

► Résultats élémentaires obtenus sur le réseau 2

La figure 5 représente un exemple de distributions du rendement et de la teneur en protéines sur un jeu de données représentatif du réseau 2. Le rendement baisse fortement lorsqu'on passe de la dose X à la dose X-80, mais le rendement change peu entre la dose X et X+40. En revanche, pour la teneur en protéines, l'évolution apparaît linéaire : la baisse est également forte entre la dose X et la dose X-80, mais la teneur en protéines continue à augmenter entre X et X+40. Ces résultats sont cohérents avec la plupart des autres études publiées sur le sujet (Foulkes *et al.* 1998, Sylvester-Bradley et Kindred 2009).

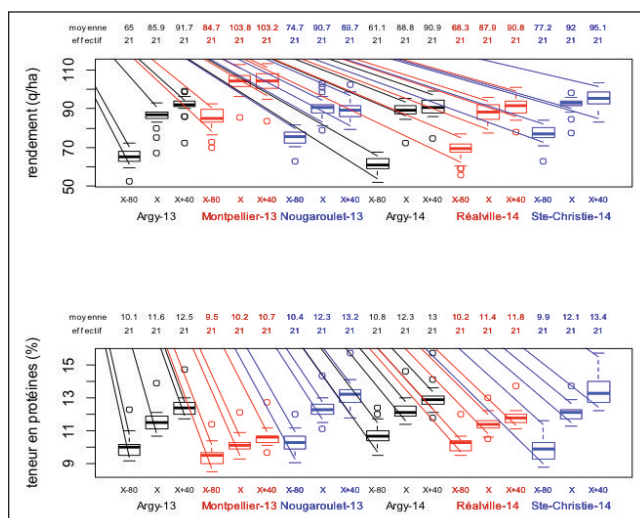


Figure 5 : Boxplots représentant les distributions des valeurs de rendement et de teneur en protéines pour les six essais validés de l'expérimentation CTPS zone Sud de 2013-2014 (réseau 2).

Sur tous les jeux de données disponibles, la réduction de la fertilisation azotée provoque une baisse des valeurs moyennes de rendement et de teneur en protéines. Cependant les analyses de variance réalisées montrent que, dans la plupart des cas, il y a une interaction « génotype * conduite N » significative, ce qui indique que les différents génotypes ne répondent pas tous de la même façon et qu'il est donc pertinent de s'intéresser à des indicateurs variétaux liés à l'efficacité de l'azote apporté au blé tendre. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus sur le réseau 1.

► Elaboration d'indicateurs de tolérance à la carence azotée (réseau 2)

Les premières analyses réalisées ont tout d'abord consisté à étudier le lien entre les 2 types d'indicateurs testés. De fait les deux types d'indicateurs de tolérance apparaissent très fortement corrélés : sur les 11 jeux de données, les R^2 des régressions entre les indicateurs de type 1 (écarts pondérés) et

les indicateurs de type 2 (écarts à la régression) s'échelonnent entre 0.68 et 0.99, et la moyenne des ces R^2 est de 0.95 pour l'indicateur rendement et de 0.92 pour l'indicateur protéines. Comme les deux types d'indicateurs sont pratiquement redondants, dans la suite nous ne considérerons plus que l'indicateur de type 1. La figure 6 présente un exemple des indicateurs de tolérance pour le rendement et la teneur en protéines, selon deux types d'agrégation : calculés lieu par lieu, puis moyennés à l'échelle du réseau d'essai, ou calculés directement à partir des moyennes multi-locales. Il ressort que ces deux méthodes donnent des résultats très fortement corrélés : sur les 11 jeux de données, les R^2 des régressions entre les deux types de valeurs s'échelonnent entre 0.96 et 1, et la moyenne des ces R^2 est de 0.99 pour l'indicateur rendement et de 1 pour l'indicateur protéines. Par souci de cohérence avec le mode de calcul de la GPD actuellement pratiqué dans le processus d'inscription, nous avons opté pour le mode de calcul utilisant les moyennes multi-locales.

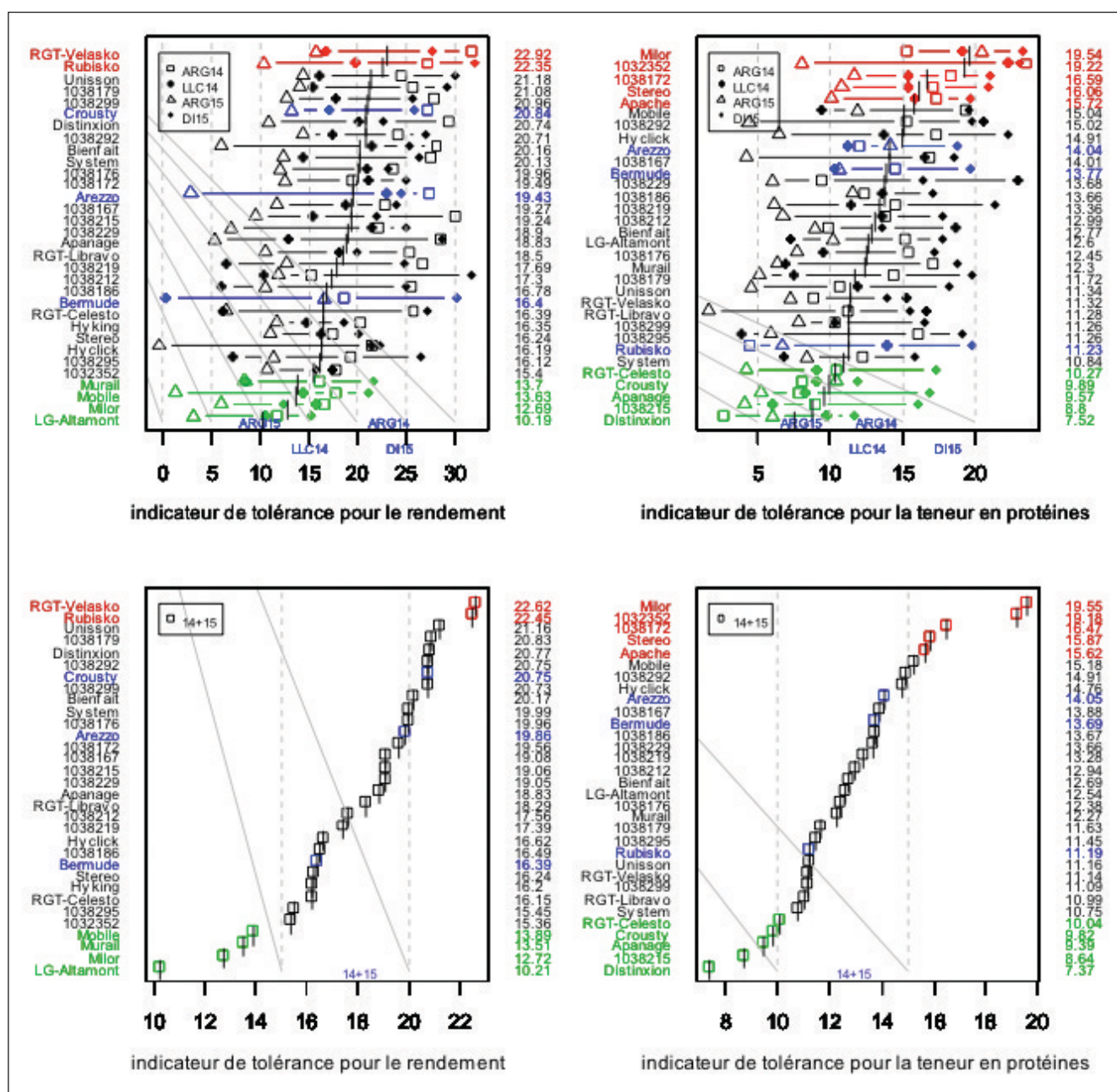


Figure 6 : Indicateurs de tolérance pour le rendement et la teneur en protéines calculés pour l'expérimentation CTPS zone Nord 2014-2015 (réseau 2), soit lieu par lieu pour les quatre essais validés (graphiques du haut), soit à partir des moyennes multi-locales (graphiques du bas)

Les analyses de variance réalisées sur les indicateurs de tolérance montrent qu'il y a un effet « génotype » significatif quel que soit le jeu de données dans le cas de l'indicateur « protéines », et significatif dans neuf cas sur 11 dans le cas de l'indicateur « rendement » (Tableau 3). Ceci indique qu'on peut effectivement discriminer des génotypes à l'aide de ces indicateurs de tolérance à une diminution de la fertilisation azotée.

	A	V	L (A)	A × V
Indicateur de tolérance rendement				
CTPS Nord 13-14	***	***	***	ns
CTPS Sud 13-14	***	*	***	ns
FSOV 15-16	***	ns	***	ns
CTPS Nord 14-15	**	**	***	*
CTPS Sud 14-15	***	(*)	***	ns
CTPS Nord 15-16	***	***	***	ns
CTPS Sud 15-16	***	ns	***	ns
FSOV 04-05	***	*	***	*
FSOV-P 11-12	*	*	***	(*)
FSOV-T 11-12	ns	**	***	ns
BW 12-14	***	***	***	***
Indicateur de tolérance protéines				
CTPS Nord 13-14	***	***	***	ns
CTPS Sud 13-14	***	***	***	ns
FSOV 15-16	***	***	***	*
CTPS Nord 14-15	ns	**	***	ns
CTPS Sud 14-15	***	**	***	ns
CTPS Nord 15-16	***	***	***	**
CTPS Sud 15-16	***	*	***	ns
FSOV 04-05	***	***	***	ns
FSOV-P 11-12	***	***	***	*
FSOV-T 11-12	***	***	***	ns
BW 12-14	***	***	***	ns

*** ($p < 0.001$) ; ** ($0.001 < p < 0.01$) ; * ($0.01 < p < 0.05$) ; (*) ($0.05 < p < 0.1$) ; ns = non significatif

Tableau 3 : Analyse de variance sur les indicateurs de tolérance rendement et protéines calculés sur le réseau 2 pour les 11 jeux de données. A = effet année, V = effet variété, L(A) = effet lieu (année).

Une relation négative significative s'observe entre les indicateurs rendement et protéines sur les 11 jeux de données (R^2 de régression moyen de 0.30, figure 7 pour un exemple). Cette liaison négative signifie que, globalement, les lignées qui perdent le moins en rendement entre les doses X et X-80, sont celles qui subissent les pertes les plus importantes en teneur en protéines ; et qu'à l'inverse, celles qui perdent le moins en protéines sont celles qui perdent le plus en rendement. Ceci n'a rien de surprenant, car c'est directement la conséquence de la forte relation négative qui existe entre rendement et teneur en protéines (Oury *et al.* 2003).

Les indicateurs de tolérance sont construits à partir de caractères (le rendement et la teneur en protéines) pour lesquels il y a de fortes interactions « génotype * milieu », et ils sont donc estimés avec un niveau d'imprécision assez élevé. Ceci entache aussi l'estimation de la position de la droite de régression entre ces deux indicateurs (R^2 moyen est seulement de 0.3 sur l'ensemble des 11 jeux de données). De ce fait, il apparaît illusoire d'utiliser les écarts à la régression (comme on le fait par exemple pour les GPDs, mais dans un cas où le R^2 moyen des régressions « rendement -teneur en protéines » est plutôt de l'ordre de 0.5), pour rechercher des lignées réalisant un bon compromis entre leur perte en rendement et leur perte en teneur

en protéines lorsqu'on passe de la dose X à la dose X-80. Cependant, dans les situations où le manque d'azote durant la montaison est prévisible (choix d'itinéraire cultural voulu ou contraint par le milieu ou la réglementation), les indicateurs de tolérance peuvent constituer des critères importants pour le choix variétal. En effet, en fonction de l'objectif prioritaire, qui peut être soit la minimisation des pertes en rendement, soit la minimisation des pertes en teneur en protéines, ces indicateurs permettent de définir les variétés les plus favorables pour atteindre cet objectif. Concernant justement la GPD, il a été mis en évidence une bonne corrélation entre les valeurs de cet indicateur calculées à X-80 et celles calculées à X (R^2 de régression moyen de 0.62) et que, a contrario, aucune corrélation significative n'a été mise en évidence entre les indicateurs de tolérance (rendement et protéines) et la GPD, quelle que soit la conduite azotée. Il n'y a donc pas de redondance entre ces critères, qui apportent bien des informations différentes sur les variétés.

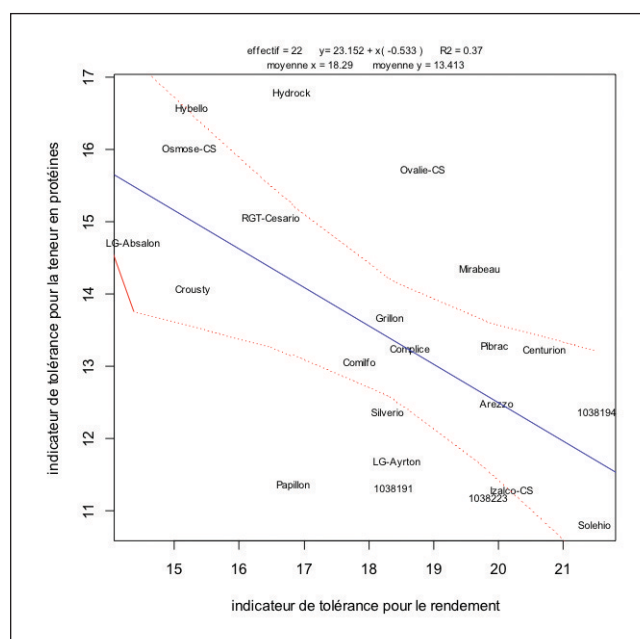
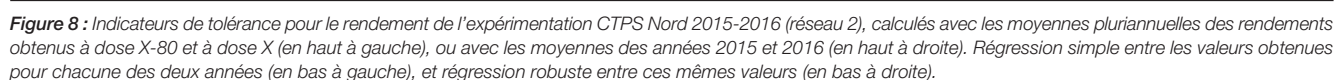


Figure 7 : Régression entre l'indicateur de tolérance pour le rendement et l'indicateur de tolérance pour la teneur en protéines dans le cas de l'expérimentation CTPS zone Sud 2014-2015 (réseau 2).

Pour qu'ils soient utiles dans la description des variétés, les indicateurs de tolérance ne doivent pas être trop fortement soumis aux interactions «génotype x milieu», et donc présenter une certaine stabilité malgré les fluctuations environnementales. Afin d'étudier ce point, nous avons comparé les valeurs des indicateurs de tolérance obtenues sur chacune des deux années consécutives des différents dispositifs (figure 8 pour un exemple). L'effet « année » apparaît très généralement significatif (10 cas sur 11 pour les différents jeux de données, qu'il s'agisse de l'indicateur «rendement» ou de l'indicateur «protéines») dans les analyses de variance (tableau 3). Cependant, le fait qu'il y ait un important effet « année » n'est pas gênant en soi : ce qui compte c'est le niveau de l'interaction « génotype x année » qui apparaît assez peu fréquemment significatif dans les analyses de variance (tableau 3), et que l'on peut estimer à travers la corrélation entre les valeurs des indicateurs obtenues pour chacune des deux années (figure 8). Les 11 jeux de données présentent la même tendance : le R^2 des régressions simples entre les valeurs des indicateurs « rendement » obtenues sur les deux années consécutives est en moyenne de 0.11, mais on passe à une valeur moyenne de 0.40 en régression robuste (méthode qui exclut les données à résidus extrêmes). L'indicateur « protéines » apparaît plus stable que l'indicateur «

Les valeurs prises par les indicateurs de tolérance peuvent être très variables d'un jeu de données à l'autre. Ceci est dû aux effets environnementaux (« année » et « lieu »), qui apparaissent très souvent hautement significatifs dans l'analyse de variance (Tableau 3). Il n'est donc pas possible d'utiliser directement des valeurs « seuils » pour discriminer les génotypes présentant des comportements contrastés pour leur tolérance à une diminution de la fertilisation azotée, puisqu'il faudrait faire varier ces seuils en fonction du jeu de données. Par contre, on peut s'inspirer de la méthode utilisée dans les essais CTPS pour attribuer des bonus/malus en fonction de la valeur de l'écart de rendement entre conduites « traité » et « non traité » avec des fongicides. L'application de cette approche sur chacun des jeux de données met en évidence une certaine constance du comportement de plusieurs génotypes (tolérant ou sensible) sur des jeux de données indépendants. En faisant le parallèle avec l'expérience acquise sur la GPD qui présente le même phénomène, ceci renforce nos conclusions sur la possibilité d'utiliser les indicateurs de tolérance à la carence azotée pour discriminer des variétés.



► Elaboration d'indicateurs « simples » de l'efficacité de valorisation de l'azote (réseau 2)

L'objet de cette partie de l'étude est d'élaborer des indicateurs variétaux d'efficacité de l'azote apporté (sol et/ou engrais) dits « simples ». Nous entendons par « simple » un indicateur qui ne nécessite que les deux mesures réalisées en routine dans les essais d'inscription et de post-inscription, soient le rendement et la teneur en protéines du grain, par opposition aux indicateurs étudiés dans le réseau 1 nécessitant d'avoir accès à la quantité d'azote absorbé totale à la récolte (grains+pailles+racines). En effet, le coût analytique de telles mesures à l'échelle d'un réseau d'évaluation variétale est prohibitif. De plus, l'option choisie dans le projet de faire ces mesures uniquement sur un témoin « azote » et donc de disposer d'un NHI moyen par essai résout le problème de coût mais repose sur une hypothèse d'extrapolation de cette mesure à toutes les variétés de l'essai. Or, nous avons démontré avec le réseau 1 que la variété a un effet significatif sur le NHI, quelle que soit la dose d'engrais azoté apportée (et donc y compris à l'optimum). Ignorer cet effet en prenant un NHI moyen pour toutes les variétés est problématique dans un processus dont l'objectif est justement de mettre en évidence des différences de comportement variétal vis-à-vis de la nutrition azotée.

La figure 9 présente quatre exemples de régression « qN grains - dose d'azote ». On peut voir sur ces exemples que les pentes sont estimées de manière précise car les trois points relatifs aux doses X-80, X et X+40 sont bien alignés et les R² sont donc très élevés. En général, il est délicat d'extrapoler une relation linéaire en dehors de l'intervalle où elle a été mise en évidence. Cependant, les courbes de réponse à l'azote établies avec une gamme de doses plus large que celle utilisée pour le réseau 2 (réseau 1), montrent que la réponse est linéaire sur l'ensemble du domaine de variation de la dose d'azote. On peut donc considérer que les ordonnées à l'origine obtenues avec un dispositif à seulement trois doses peuvent être des estimations des qN grains des variétés en l'absence de fertilisation azotée.

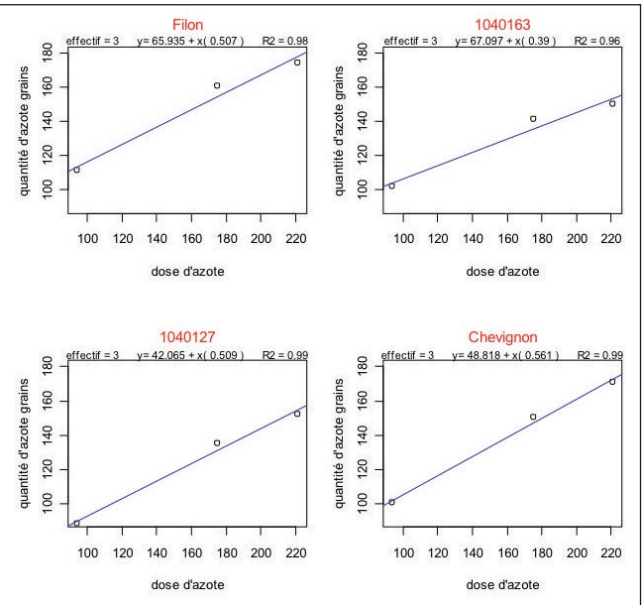


Figure 9 : Régression entre qN grains et dose d'azote pour quatre génotypes de l'expérimentation CTPS zone Nord 2015-2016 (réseau 2). Filon et 1040127 ont des pentes très similaires, mais des ordonnées à l'origine très différentes. Chevignon et 1040163 ont à la fois des ordonnées à l'origine et des pentes très contrastées.

À l'image des indicateurs de tolérance, les valeurs des indicateurs d'efficacité peuvent être obtenues soit comme la moyenne des valeurs de pente et d'ordonnée à l'origine calculées sur chacun des sites du réseau d'expérimentation, soit en calculant la

régression à partir des moyennes multi-locales. Ces deux méthodes donnent des résultats très fortement corrélés : sur les sept jeux de données, les R² des régressions entre les deux types de valeurs sont comprises entre 0.84 et 0.99 pour la pente, et entre 0.74 et 0.98 pour l'ordonnée à l'origine. Pour des raisons de cohérence globale entre indicateurs, nous avons opté pour la méthode de calcul à partir des moyennes multi-locales.

Les analyses de variance montrent que l'effet « variété » n'est significatif que dans trois cas sur sept dans le cas de la pente (Tableau 4), et encore moins fréquemment significatif pour ce qui est de l'ordonnée à l'origine (deux cas sur sept avec une significativité faible). Pour cette dernière, c'est sans doute en partie dû à l'imprécision du calcul, car une faible erreur sur l'estimation de la pente peut conduire à de grandes variations dans le calcul des ordonnées à l'origine, puisqu'elles sont estimées loin du domaine d'établissement de la régression « qN grains - doses d'azote ». Dans les deux cas il y a sans doute aussi des interactions « génotype * lieu » qui interviennent, même si nous n'avons pu les tester dans notre modèle d'ANOVA (les interactions « génotype * année » sont, quant à elles, souvent non significatives). Quoiqu'il en soit, le calcul à partir des moyennes multi-locales permet probablement une certaine stabilisation des indicateurs d'efficacité simples. Il est donc intéressant d'utiliser d'autres méthodes statistiques que l'ANOVA pour déterminer si ces indicateurs peuvent permettre de discriminer des génotypes pour la valorisation de l'azote apporté.

	A	V	L (A)	A × V
Pente				
CTPS Nord 13-14	ns	**	***	(*)
CTPS Sud 13-14	***	ns	***	ns
FSOV 15-16	***	ns	***	ns
CTPS Nord 14-15	***	**	***	*
CTPS Sud 14-15	***	ns	***	ns
CTPS Nord 15-16	***	ns	***	ns
CTPS Sud 15-16	***	***	***	ns
Ordonnée à l'origine				
CTPS Nord 13-14	***	ns	***	ns
CTPS Sud 13-14	**	ns	***	ns
FSOV 15-16	(*)	ns	***	ns
CTPS Nord 14-15	***	(*)	***	*
CTPS Sud 14-15	***	ns	**	ns
CTPS Nord 15-16	***	(*)	***	ns
CTPS Sud 15-16	***	ns	***	ns

*** (p < 0.001) ; ** (0.001 < p < 0.01) ; * (0.01 < p < 0.05) ; (*) (0.05 < p < 0.1) ; ns = non significatif

Tableau 4 : Analyse de variance sur les indicateurs d'efficacité simple calculés sur le réseau 2 pour les 7 jeux de données. A = effet année, V = effet variété, L(A) = effet lieu (année)

Etant donné que l'effet « année » est très significatif (Tableau 4), nous avons procédé à une étude de stabilité des indicateurs d'efficacité simple selon les mêmes méthodes employées pour les indicateurs de tolérance : corrélation par régression robuste entre années consécutives au sein du même jeu de données, puis comparaison du comportement de génotypes communs entre jeux de données indépendants. Les deux approches confirment le fait que les indicateurs d'efficacité simples présentent un niveau de stabilité qui, au moins pour la pente, est tout à fait comparable à celui des GPDs, et qui peut donc être suffisant pour qu'ils soient utiles pour la caractérisation des variétés.

Tous les jeux de données présentent un niveau de corrélation fort entre l'indicateur « pente » et l'indicateur « ordonnée à l'origine » (Figure 10 pour un exemple).

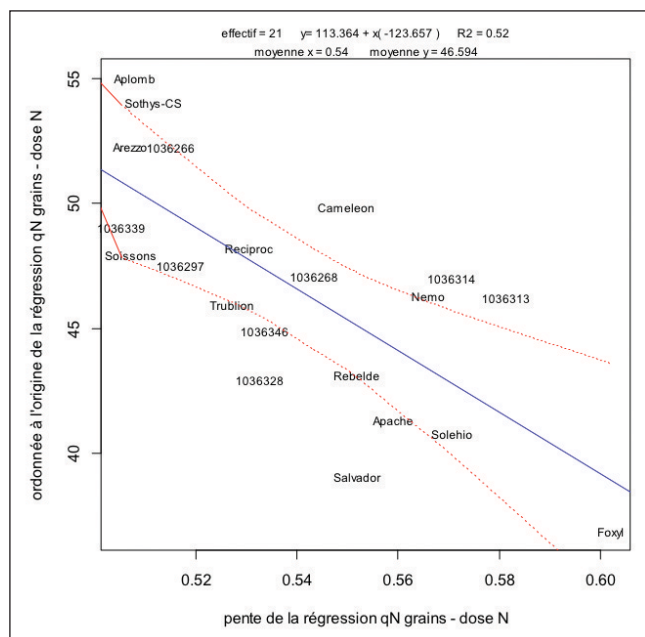


Figure 10 : Régression entre les deux indicateurs d'efficacité simples pour le jeu de données CTPS Sud 2013-14 (réseau 2).

Par construction, la pente et l'ordonnée à l'origine d'une régression sont liées négativement (lorsqu'on fait pivoter une droite de régression autour de son barycentre, une augmentation de pente conduit mécaniquement à une diminution de l'ordonnée à l'origine). Cependant, comme l'illustre la figure 9, il reste une part importante de la variabilité de l'ordonnée à l'origine qui n'est pas expliquée par la pente. Cet aspect a aussi été confirmé par l'analyse des données du réseau 1. Comme par ailleurs la position de la droite de régression entre les deux indicateurs d'efficacité simples est établie de manière assez précise (sur les 7 jeux de données, le R^2 moyen est de 0.52, valeur tout à fait comparable à ce qu'on trouve en moyenne pour la relation « rendement - teneur en protéines »), on peut envisager d'utiliser les écarts à la régression pour mettre en évidence les génotypes présentant un bon compromis pour les valeurs des deux indicateurs.

L'analyse du lien statistique entre les indicateurs de tolérance et les indicateurs d'efficacité simples indique une corrélation très faible entre les 2 familles d'indicateurs, quel que soit le jeu de données considéré. La capacité à supporter une baisse de fertilisation azotée semble donc assez indépendante de l'efficacité d'utilisation de l'azote apporté par le sol ou par les engrais. Par contre, une analyse des relations entre les indicateurs d'efficacité simple et les GPD par régression simple et PLS indiquent que les indicateurs d'efficacité simples sont en fait deux composantes essentielles des GPDs. De manière plus précise en distinguant les situations X-80 et X, il apparaît que l'efficacité de valorisation de l'azote vue à travers la GPD, correspond plutôt à la capacité du génotype à valoriser l'azote du sol (et donc à l'ordonnée à l'origine de la régression « qN grains - dose d'azote ») lorsqu'on est en situation de carence azotée (dose X-80), et plutôt à la capacité du génotype à valoriser l'apport d'engrais (et donc à la pente de la régression) lorsqu'on est en fertilisation azotée normale (dose X).

La méthode employée pour calculer les indicateurs d'efficacité simples a recours aux résultats obtenus sur trois conduites de fertilisation azotée (X-80, X, X+40). Leur calcul étant mathématiquement possible avec seulement les modalités X-80 et X, nous avons étudié la robustesse de cette approche en vue d'optimiser les coûts des réseaux expérimentaux. La figure 11 présente les corrélations entre les pentes mesurées en faisant varier

le nombre de modalités de fertilisation azotée utilisées à partir des données acquises sur le réseau 1. Il apparaît une forte corrélation entre les méthodes. Ce résultat n'est pas étonnant étant donné le caractère fortement linéaire de la relation « qN grains-doses d'azote ». Des résultats similaires (avec même des corrélations légèrement plus élevées) ont été obtenus pour l'ordonnée à l'origine. Le même type d'analyse de sensibilité a été réalisée sur les jeux de données du réseau 2 (comparaison entre les indicateurs calculés avec X-80/X/X+40 et ceux calculés avec seulement X-80/X). Les corrélations obtenues sont également assez fortes (leur valeur moyenne est de 0.77, aussi bien pour la pente que pour l'ordonnée à l'origine) et nous retrouvons pour les indicateurs calculés sur 2 modalités l'ensemble des propriétés des indicateurs calculés sur 3 modalités (notamment le lien avec les GPDs). En première approximation, il semble donc possible de se contenter de dispositifs expérimentaux avec deux doses d'azote pour obtenir des indicateurs d'efficacité simples utilisables.

Au regard du lien « explicatif » entre les indicateurs d'efficacité simple et les GPDs, leur valorisation dépendra du besoin de l'utilisateur final (chercheur, sélectionneur, préconisateur, agriculteur) en terme d'explicitation des sources de variation des GPDs calculées.

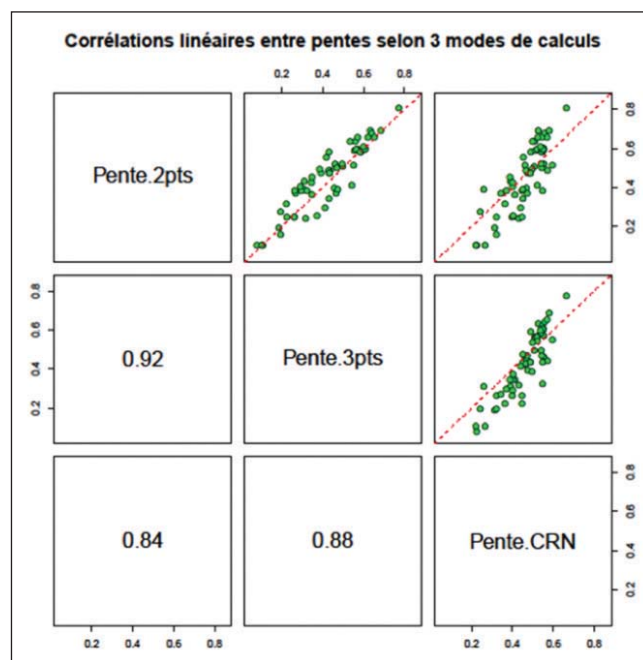


Figure 11 : Corrélations entre 3 modes de calculs de l'indicateur d'efficacité simple « pente » testés sur les données du réseau 1. « Pente.2pts » = calcul avec les points X-80 et X ; « Pente.3pts » = calcul avec les points X-80, X et X+40 ; « Pente.CRN » = calcul avec les points de la courbe de réponse à l'azote.

► Conception d'indicateurs « élaborés » de l'efficacité de valorisation de l'azote (réseau 2)

Une première approche méthodologique a été réalisée pour déterminer si l'ensemble des indicateurs étudiés sur le réseau 1 étaient calculables sur un dispositif ayant les caractéristiques du réseau 2. La 1^{ère} spécificité du réseau 1 est son dispositif d'évaluation des variétés en courbe de réponse complète à la dose d'engrais azoté, permettant la caractérisation des variétés à l'optimum de fertilisation azotée pour le rendement et un niveau donné de teneur en protéines du grain. Nous avons donc tout d'abord testé différents mode de calage d'un modèle statistique de courbe de réponse du rendement à la dose d'engrais N à partir d'un dispositif en 3 doses. Testé sur les données du réseau 1 en comparaison des résultats obtenus sur un modèle ajusté sur 6 doses, il apparaît que l'estimation du rendement optimal est satisfaisante (Figure 12, R^2 de la régression = 0.92), que celle de la

teneur en protéines est moins bonne (R^2 de la régression = 0.58) et que celle de la dose d'azote optimale est très mauvaise (R^2 de la régression = 0.02). A partir de cette approche et l'extrapolation des NHI des variétés témoins à l'ensemble des variétés du même essai, nous avons calculé l'ensemble des indicateurs testés sur le réseau 1 sur le réseau 2. Pour les variétés présentes dans les deux réseaux, les résultats obtenus sur le réseau 2 sont globalement cohérents avec ceux obtenus sur le réseau 1. Néanmoins, l'imprécision du mode de calage des courbes de réponses à l'azote et le recours à une hypothèse forte d'emploi d'un NHI moyen pour toutes les variétés dans un dispositif d'évaluation variétale nous a fait écarter cette approche, sous réserve d'investigations futures plus poussées.

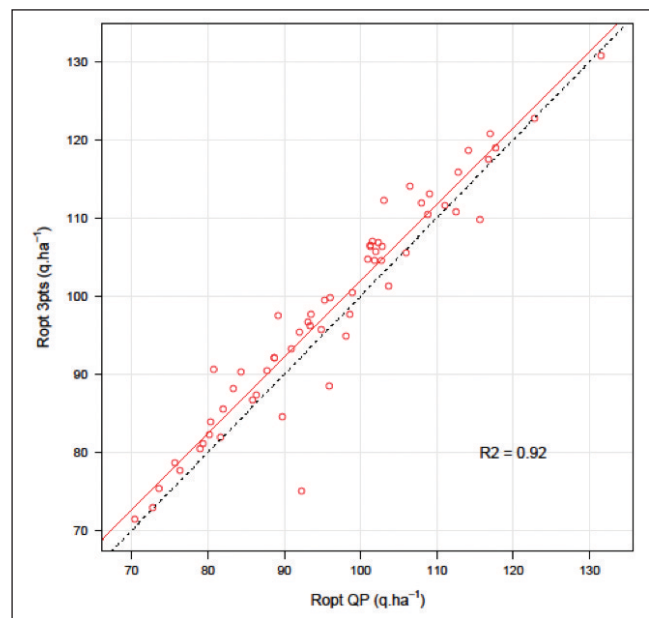


Figure 12 : Lien entre le calcul du rendement optimal avec une courbe de réponse azote complète (QP) et une courbe de réponse azote à 3 points (X-80/X+40, 3pts). Calculs réalisés sur le réseau 1.

► Effet variété et dose d'azote sur la qualité technologique des blés (réseau 1 et réseau 2)

Des tests de panification de type pain courant français (NF V03-716) ont été effectués sur des farines issues des récoltes 2014, 2015 et 2016 des essais du réseau 1. Il en ressort que, dans la plage 9-13% de teneurs en protéines, l'impact de la dose d'azote sur la note totale de panification est faible (Figure 13) alors que des interactions « variétés-essais » ressortent comme les plus fortes du fait d'effets lieux sur la note d'allongement. Les situations qui génèrent de l'extensibilité accentuent le défaut des variétés à profil extensible, mais favorisent les variétés à profil tenace (pâtes plus courtes). A l'inverse, les situations qui génèrent de la ténacité profitent aux variétés à profil extensibles. Dans certains cas, l'accroissement de la dose d'azote sur un lieu donné peut légèrement accentuer le raccourcissement des pâtes.

Les analyses dont nous disposons sur le profil des protéines analysé par HPLC complètent la première approche. Pour rappel, les gluténines de haut poids moléculaire (fraction F1) jouent un rôle essentiel sur les propriétés de ténacité. Par conséquent, plus le rapport %F1/%F2 est élevé plus la pâte est tenace. L'analyse des données issues des récoltes 2014, 2015 et 2016 a permis d'obtenir les résultats suivants :

- Le rapport %F1/%F2 n'évolue pas avec la dose d'azote, mais il varie en fonction du lieu et de l'année.
- Les situations avec un rapport %F1/%F2 faible, génèrent de l'extensibilité et accentuent le défaut des variétés à profil extensible, mais favorisent celles à profil court. Au contraire, celles avec un rapport %F1/%F2 plus élevé génèrent des pâtes courtes ce qui profite aux variétés à profil extensible.

Les variations dans le comportement en panification des variétés semblent donc attribuables à un effet « qualité des protéines » et non à effet « quantité des protéines ». Cependant, la qualité des protéines n'explique pas à elle seule le comportement en panification.

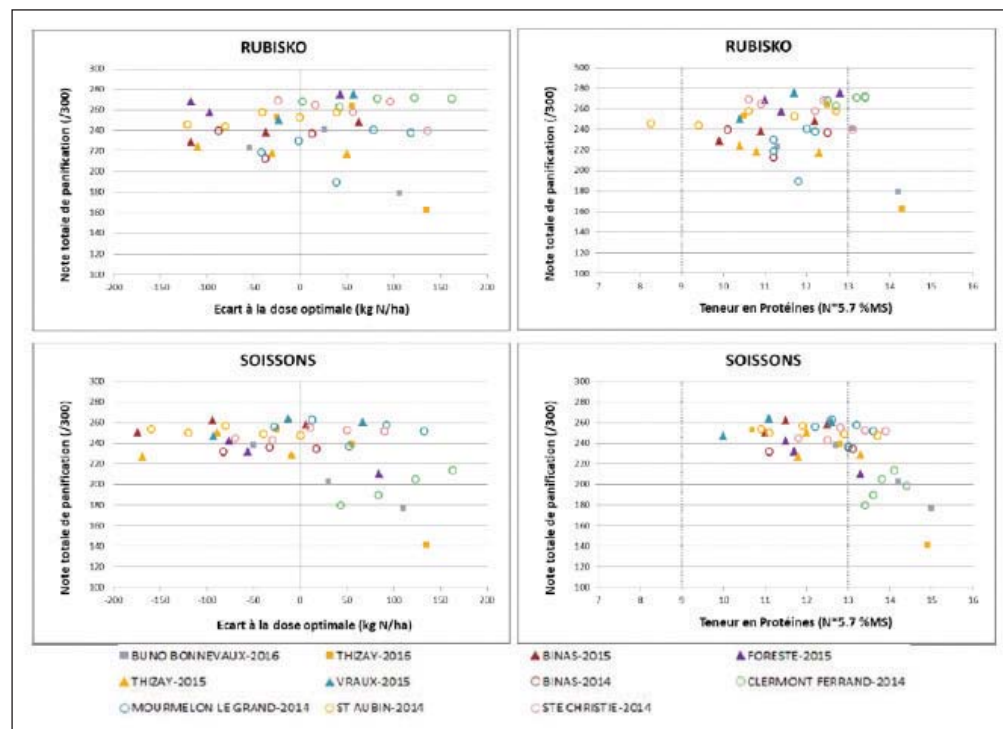


Figure 13 : Effet de la dose d'engrais azoté appliquée (à gauche) et de la teneur en protéines (à droite) sur la note de panification des variétés RUBISKO et SOISSONS. Essais du réseau 1 2014-2016. Doses d'engrais azotées exprimées en écart à la dose optimale pour le rendement calculée a posteriori sur la base d'une courbe de réponse.

Des analyses supplémentaires ont été effectuées sur le réseau 1 récoltes 2015 et 2016, à savoir :

- Un alvéogramme de Chopin (NF EN ISO 27971) : la force boulangère (W) augmente avec la teneur en protéines, qui elle-même augmente avec la dose des apports d'azote. Le rapport P/L diminue globalement avec la teneur en protéines et la dose d'azote.
- Des mesures de Gluten Humide et Gluten Index (NF EN ISO 21415-2) : le gluten humide augmente avec la teneur en protéines et la dose d'azote.

Le classement des variétés sur le W, le P/L et le Gluten humide est peu modifié en fonction de la dose d'azote apportée dans une plage de X-80 à X+80 kg N.ha⁻¹. De la même façon, les notes totales de panification ne ressortent pas sensibles à la dose d'azote, avec peu de variation de classement des variétés sur leur note de panification, excepté dans les situations à teneurs en protéines inférieures à 9% ou supérieures à 13 %.

Des analyses de qualité technologiques ont aussi été réalisées sur des échantillons des modalités X et X-80 kg N.ha⁻¹ de 21 variétés de 3 essais du réseau 2 2015 et 2016. Les analyses technologiques sont les tests de l'alvéogramme de Chopin (NF EN ISO 27971) et de panification normalisée « pain courant français » (NF V03-716). Compte tenu du faible nombre d'essais étudiés et afin de vérifier la conformité et la représentativité des 3 essais retenus, les données ont été comparées avec celles obtenues dans le cadre des épreuves de post-inscription en 2015 (provenant du réseau CTPS 2) pour les témoins Apache et Arezzo. Les W, P/L et notes de panification des variétés témoins à la dose X des 3 essais sont confirmés comme étant cohérents. Pour les variétés inscrites en 2015 et présentes dans le réseau 2, le jeu de données a été complété avec des données acquises dans le cadre des épreuves d'inscription (réseaux CTPS 1 2013 et CTPS 2 2014) et de Post-Inscription. L'étude des critères de qualité technologique, montre que :

- Pour le W, le P/L et la note totale de panification, le classement des variétés expérimentées dans le réseau 2 en 2015 et en 2016 est peu modifié en fonction de la dose d'azote apportée dans une plage de X à X+80.
- Pour chaque variété testée individuellement, la note totale de panification est peu modifiée en fonction de la dose d'azote.
- L'interaction variétés-lieux est plus significative que l'effet de l'azote ou teneur en protéines (Figure 14).

► Indicateur d'efficacité de valorisation rendement et protéines des variétés inscrites (réseau 3)

Afin de mettre à jour le mode de calcul des coefficients d'efficacité de valorisation de l'azote des variétés inscrites en France (besoin unitaire en azote à l'optimum de rendement - coefficient « b » destiné au calcul de la dose d'azote prévisionnelle par les agriculteurs) et d'y inclure un objectif spécifique d'atteinte d'une teneur en protéines de 11.5% (coefficients « bc » et « bq »), nous avons procédé à une étude méthodologique complète basée sur le réseau 3, en faisant appel aux données des réseaux 1 et 2 afin de valider certaines hypothèses de calculs inhérentes à la nature des essais utilisés (longues listes variétales testées sous un seul régime de fertilisation azoté supposé optimal dans de larges réseaux multi-locaux et pluriannuels). Le résultat de cette étude et la méthode de calcul des coefficients « b », « bc » et « bq » sont résumés dans la figure 15.

L'étape 1 passe par le calcul de la quantité d'azote présente dans le grain à la récolte (QNG) pour toutes les variétés dans tous les essais. C'est le même calcul qui est à la base des indicateurs d'efficacité simples. Les résultats acquis sur le réseau 1 nous permettent d'élaborer une équation d'estimation de la quantité d'azote totale prélevée à la récolte (QNT) à partir du QNG (**étape 2**).

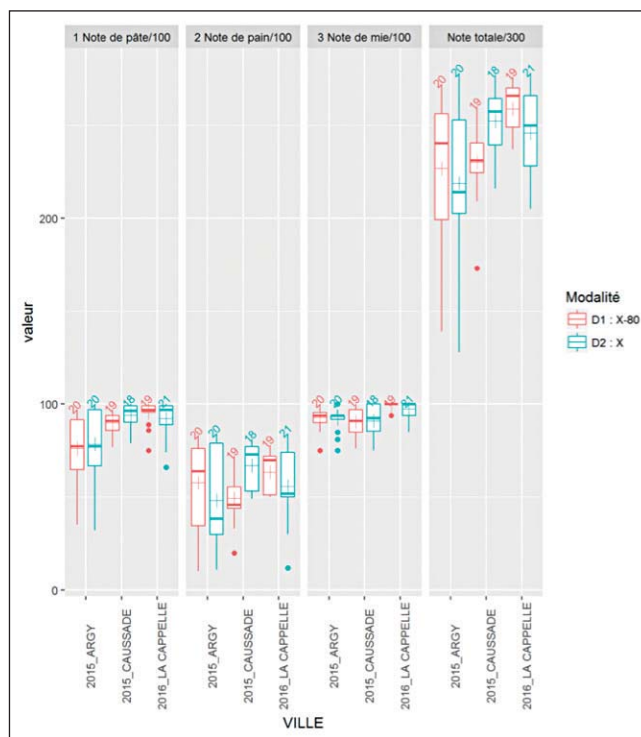


Figure 14 : comportement moyen des variétés en notes de pâte, de pain, de mie et totale de panification en fonction de la dose d'azote et des lieux. 3 essais du réseau 2 2015 et 2016.

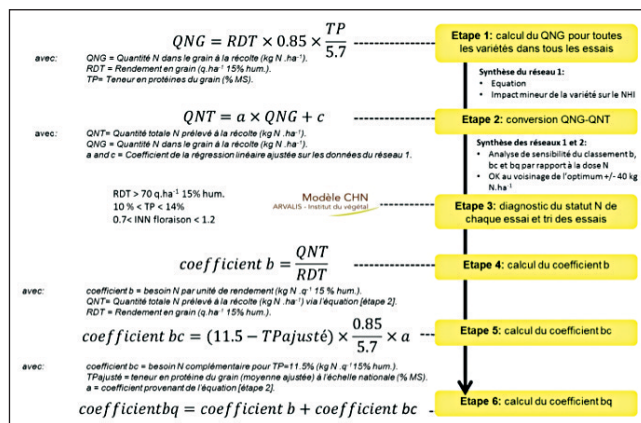


Figure 15 : Étapes de calcul et de validation méthodologique de l'élaboration des coefficients « b », « bc » et « bq » à partir des données des réseaux 1, 2 et 3. Adaptée de Cohan et al. 2017.

A la différence d'indicateurs à utiliser dans les processus de sélection ou d'inscription, nous nous autorisons ici à négliger l'impact de la variété sur le NHI car 1) l'effet de la variété sur le NHI est significatif mais d'impact mineur sur le classement des variétés relatif aux coefficients b, bc et bq (analyse de sensibilité réalisée sur le réseau 1) et 2), l'utilisation des coefficients b, bc et bq est réservée à la définition de la dose d'azote optimale à appliquer par les agriculteurs dont le calcul est influencé par de nombreux autres facteurs de variation d'impact plus conséquent (climat, pratiques d'apports des engrais...). Par définition, le coefficient « b » est calculé à l'optimum de fertilisation azotée pour le rendement (Le Souder et Bernicot 1993). Les essais du réseau 3 ne comportant qu'une seule dose N, l'hypothèse que cette dernière correspond bien à la dose N optimale est forte. Afin de l'évaluer, nous avons procédé à une analyse de sensibilité du classement variétal « b », « bc » et « bq » selon la dose d'azote appliquée sur les réseaux 1 et 2. Il s'avère que le classement reste globalement inchangé quand on se place au voisinage de la dose N optimale ± 40 kg N.ha⁻¹. À l'aide du modèle CHN (Soenen et al. 2016), nous avons procédé à

une sélection des essais du réseau 3 selon leur statut azoté à floraison et leur niveau de rendement et de teneur en protéines (**étape 3**). Sur cette base, le coefficient « b » est calculé pour toutes les variétés dans tous les essais sélectionnés (**étape 4**). En utilisant les moyennes ajustées des teneurs en protéines à l'échelle du réseau, le coefficient « bc » (**étape 5**) puis « bq » (**étape 6**) sont calculés pour l'ensemble des variétés. A partir de cette méthode cette fois appliquée à l'ensemble des essais d'évaluation de post-inscription conduits par ARVALIS depuis de nombreuses années, nous avons pu produire dès 2016, un classement innovant de l'ensemble des variétés de blé tendre d'hiver disponibles en France vis-à-vis de l'efficacité de valorisation de l'azote pour le rendement et la teneur en protéines du grain. La figure 16 présente la version de ce classement paru en décembre 2016 (et mis à jour tous les ans depuis). Notons que les préconisations de compléments de besoin « bc » s'accompagnent de préconisations spécifiques sur le fractionnement des apports d'engrais afin que ce complément bénéficie en priorité à l'accumulation de protéines dans le grain.

4. Conclusion et valorisation

Les résultats produits par le projet FSOV N-BT ont permis de répondre aux objectifs fixés initialement et de proposer plusieurs valorisations opérationnelles. En 1er lieu, à partir du réseau 1, nous avons produit des résultats originaux et détaillés sur l'efficacité d'absorption et de valorisation de plusieurs variétés de blé tendre d'hiver récemment développées en France. Grâce à un dispositif expérimental combinant les méthodes des études agronomiques (dispositif en courbe de réponse azote) et génétiques (décomposition de la NUE), l'impact significatif des variétés sur les 2 composantes de la NUE a pu être mis en évidence à leur

optimum de fertilisation respectif. **Le projet fournit donc une base de référence sur l'efficacité « azotée » de variétés élitaires encore largement utilisées par les sélectionneurs et les chercheurs.** Les résultats issus de ce dispositif ont pu aussi servir de données de base pour valider plusieurs hypothèses de travail dans le développement d'indicateurs plus adaptés à des dispositifs expérimentaux plus simples (réseau 2 et réseau 3). **Afin de permettre la valorisation de ces résultats dans de futurs projets de recherches, les résultats acquis sur le réseau 1 ont fait l'objet d'une publication scientifique** (en cours de soumission au moment de la rédaction de cet article scientifique). En 2ème lieu, le projet a permis l'élaboration d'indicateurs de tolérance à la carence azotée des variétés de blé tendre d'hiver, utilisables pour le rendement et la teneur en protéines du grain dans différents dispositifs d'évaluation variétale (sélection, inscription, post-inscription) à condition de disposer de 2 conduites de fertilisation azotée bien discriminées dans les essais. Pendant la durée du projet, **ces indicateurs de tolérance à la carence azotée ont été directement valorisés par le CTPS-GEVES car ils sont publiés à titre indicatif depuis 2017 à partir des inscriptions 2014** (CTPS/GEVES 2017, Mailliard *et al.* 2017). Leur passage au statut de variables rentrant dans le calcul des cotations est actuellement en cours de discussion au sein de la section céréales à paille du CTPS. En parallèle, nous avons élaboré des indicateurs d'efficacité « simple » de l'azote fourni (par le sol ou l'engrais). Ceux-ci peuvent être calculés sur le même type de dispositif que les indicateurs de tolérance et sont à même de discriminer les variétés avec la même puissance statistique que la GPD. Néanmoins, leur forte corrélation avec cette dernière pose la question de la redondance des indicateurs entre eux, à moins de souhaiter fournir une explication physiologique à la GPD en la

		CLASSEMENT DES VARIÉTÉS SELON LEUR BESOIN EN AZOTE (COEFFICIENTS b ET bq_{11,5%}) (en kgN/q)		2017
CLASSES DE b	VARIÉTÉS	CLASSES DE bq _{11,5%}	Modalités de fractionnement à respecter en utilisant bq _{11,5%}	
			bc _{11,5%}	Mise en réserve minimale conseillée pour la fin de montaison
2.8	Addict, Adhoc, Advisor , Aigle , Ambition, Arlequin, Armada, Atoupic, Basmati, Bermude, Boisseau, Complice , Costello , Creek , Diderot, Fairplay, Folklor, Garcia, Granamax, Hybello, Hybery, Hybiza, Hyclick, Hydrock , Hyguardo , Hyking , Hystar, Hysun, Hyteck, Hywin, JB Diego, Kundera, Lear, Lithium, Lyrik, Modern, Popeye , RGT Mondio , RGT Texaco , Salvador , Sokal, Stadium, Stereo, Trapez, Tremie, Viscount, Zephyr	3	0.2	60 kg N (40*+20)
	Glasgow, Istabraq, Sobred, Torp	3.2	0.4	70 kg N (40*+30)
3	Accor, Alhambra, Allez Y, Altigo, Andino, Apache, Apanage , Aplomb , Aprilio, Arezzo, As De Coeur, Aubusson, Bagou, Bonifacio, Boregar, Brentano, Buengo, Calabro, Calcio, Calisol, Calumet, Cellule, Cezanne, Chevalier, Comilfo, Compil, Descartes, Diamanto, Distinxion, Ephoros, Euclide, Fluor, Forblanc, Foxyl , Galactic, Galopain, Goncourt, Gotik , Hyfi, Hyxo, Hyxpress, Illico, Interet, Isengrain, Kalystar, Koreli, Lavoisier, LG Abraham, LG Absalon , LG Altamont , Memory, Musik, Nucleo, Numeric, Oregain, Paledor, Pibrac, Prevert, Reciprocal, RGT Ampiezzo , RGT Cesario , RGT Killimanjaro , RGT Tekno , RGT Velasko , RGT Venezia , Rochfort, Rubisko, Rustic, Saint Ex, Samurai, Scenario, Silverio, Sirtaki, Sobbel, Solehio, Sollario, Solognac, Solveig, Sothys CS , Sponsor, Starway, Syllon , Vyckor	3	0	40* kg N
	Accroc, Alixan, Andalou, Aristote, Arkeos, Ascott, Auckland , Barok, Belepi, Bergamo, Chevron, Collector , Expert, Fructidor, Gallix, Grapeli, Hyxtra, Ionesco, Laurier, Matheo, Milor , Nemo , Oxebo, Pakito, Pr22r58, RGT Celesto , RGT Libravo , RGT Sacramento , Ronsard, Sherlock , SY Mattis, SY Moisson, System , Terroir, Thalys, Tobak, Triumph , Valdo, Waximum	3.2	0.2	60 kg N (40*+20)
3.2	Aerobic, Altamira, Ambello, Athlon, Attlass, Bienfait , Camp Rémy, CCB Ingenio, Centurion, Exelior, Exotic, Falado, Graindor, Hendrix, Lazaro, Lukullus, Manager, Nogal, Scipion, Solssons, Sorrial, Tulip	3.2	0	40* kg N
* Les variétés introduites en 2016 et 2017 dans le classement sont en gras.		*: la mise en réserve minimale de 40 kg N pourra être réduite en cas de faible potentiel		13 décembre 2016

Figure 16 : Classement « b », « bc » et « bq » des variétés de blé tendre d'hiver disponibles en France fin 2016. Valeurs élaborées à partir de la méthode mise au point dans le cadre du projet et appliquée à l'ensemble des données de post-inscription obtenues dans les réseaux expérimentaux d'ARVALIS-Institut du végétal.

décomposant selon que la nutrition azotée est majoritairement assurée par l'azote fourni par le sol ou par l'engrais. En 3ème lieu, les analyses de qualité technologique « panification » mettent en évidence l'effet prépondérant de la variété et du lieu d'essai (interaction avec l'environnement) sur ces critères. La dose d'azote ne joue qu'un très faible rôle dans le classement d'aptitude à la panification des variétés, bien qu'elle ait des conséquences sur la teneur en protéines du grain. **Des dispositifs spécifiques « azote » pour évaluer les propriétés des variétés de blé tendre d'hiver vis-à-vis de la panification ne semblent pas nécessaires.** Enfin, l'ensemble des résultats issus des réseaux 1, 2 et 3 ont permis de valider les hypothèses nécessaires à l'élaboration d'un nouveau référentiel de besoins unitaires en azote des variétés de blé tendre d'hiver disponibles en France. Celui-ci, élaboré à partir de l'ensemble des données d'évaluation post-inscription issues des essais conduits par ARVALIS-Institut du végétal, fournit les informations nécessaires pour calculer le besoin en azote du blé

tendre d'hiver, indispensable au calcul de la dose d'azote prévisionnelle par les agriculteurs, pour différents objectifs du couple rendement/teneur en protéines du grain. **Fin 2016, la 1^{ère} version de ce nouveau référentiel a été mise à la disposition des agriculteurs et des techniciens qui les accompagnent et est mis à jour annuellement depuis (www.arvalis.fr).**

Étant donné la grande richesse des jeux de données produits, la valorisation des résultats se poursuivra sous d'autres formes pour répondre à d'autres questionnements ou pour approfondir certains points insuffisamment développés dans la durée du projet.

► Remerciements :

Les partenaires du projet tiennent à remercier le GNIS-FSOV pour son soutien, l'ensemble des équipes techniques ayant réalisé les essais et les projets Breedwheat (ANR-2010-BTBR-003), FSOV 2003A « azote » 2004-2005 et FSOV 2010F « azote » 2011-2012 pour la mise en commun des jeux de données « réseau 2 ».

Références bibliographiques

- ARVALIS-Institut du végétal (2013). Teneur en protéines des blés : relever le double défi agronomique et économique. 6p, ARVALIS Editions.
- Bouthier A. (1997). Efficacité d'un apport d'azote sur blé tendre : la pluie est rarement limitante courant montaison. Perspectives Agricoles 220, 56-59.
- Chambers B.J., Dampney P.M.R. (2009). Nitrogen efficiency and ammonia emissions from urea-based and ammonium nitrate fertilizers. IFS proceedings 657.
- Cohan J.P., Bouthier A. (2010). Engrais azoté - Pluie après apport : un facteur d'efficacité déterminant. Perspectives Agricoles 354, 38-39.
- Cohan J.P., Oury F.X., Mailliard A., Lorgeou J., Le Souder C., Praud S., Bernicot M.H., Le Gouis J. (2017). Effect of variety on *Nitrogen Use Efficiency* of bread-wheat : from breeding programs to farm practice, in: Proceedings of the International Fertiliser Society. Presented at the Agronomic conference of the International Fertiliser Society, Cambridge - UK. December 12th 2017.
- Cohan J.P., Hannon C., Houilliez B., Gravouille J.M., Geille A., Lampaert E., Laurent F. (2018). Effects of Potato Cultivar on the Components of *Nitrogen Use Efficiency*. Potato Research 61, 231-246.
- Cormier F., Faure S., Dubreuil P., Heumez E., Beauchêne K., Lafarge S., Praud S., Le Gouis J. (2013). A multi-environmental study of recent breeding progress on *Nitrogen Use Efficiency* in wheat (*Triticum aestivum* L.). Theoretical and Applied Genetics 126, 3035-3048.
- Cormier F., Foulkes J., Hirel B., Gouache D., Moëgne-Loccoz Y., Le Gouis J. (2016). Breeding for increased nitrogen-use efficiency: a review for wheat (*T. aestivum* L.). Plant Breed 135, 255-278.
- CTPS/GEVES (2017). Résultats de l'évaluation du comportement des variétés de blé tendre d'hiver vis à vis de l'azote réalisée pour le CTPS dans le cadre de l'inscription des variétés au catalogue national. Document CTPS/GEVES Janvier 2017, pp 22. Disponible à l'adresse https://cat.geves.info/CAT_WEB/Data/COMPORTEMENTAZOTEVARBTH201420152016.pdf.
- Foulkes M.J., Sylvester-Bradley R., Scott R.K. (1998). Evidence for differences between winter wheat cultivars in acquisition of soil mineral nitrogen and uptake and utilization of applied fertilizer nitrogen. The Journal of Agricultural Science 130, 29-44.
- Foulkes M.J., Hawkesford M.J., Barraclough P.B., Holdsworth M.J., Kerr S., Kightley S., Shewry P.R. (2009). Identifying traits to improve the nitrogen economy of wheat: Recent advances and future prospects. Field Crops Research 114, 329-342.
- Galloway J.N., Aber J.D., Erisman J.W., Seitzinger S.P., Howarth R.W., Cowling E.B., Cosby B.J. (2003). The Nitrogen Cascade. BioScience, 53, 341-356.
- Good A.G., Shrawat A.K., Muench D.G. (2004). Can less yield more? Is reducing nutrient input into the environment compatible with maintaining crop production? Trends in Plant Science 9, 597-605.
- Hawkesford M.J. (2014). Reducing the reliance on nitrogen fertilizer for wheat production. Journal of Cereal Science, Cereal Science for Food Security, Nutrition and Sustainability 59, 276-283.
- Hirel B., Le Gouis J., Ney B., Gallais A. (2007). The challenge of improving *Nitrogen Use Efficiency* in crop plants: towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches. J Exp Bot 58, 2369-2387.
- Jensen L. S., Schjoerring J. K., Van der Hoek K. W., Poulsen H.D., Zevenbergen J. F., Pallière C., Brentrup F., Jongbloed A. W., Willems J., Van Grinsven H. (2011). Benefits of nitrogen for food, fibre and industrial production. The European Nitrogen Assessment, ed. Mark A. Sutton, Clare M. Howard, Jan Willem Erisman, Gilles Billen, Albert Bleeker, Peringe Grennfelt, Hans van Grinsven and Bruna Grizzetti, Cambridge University Press, pp 32-61.
- Laurent F., Leveau V. (2014). La grande culture face aux (r)évolutions des marchés et politiques agricoles. In Fertilisation et environnement. Quelles pistes pour l'aide à la décision ? S. Pellerin, F. Butler, C. Guiard-Van Laethem coord. Editions QUAE, pp 59-72.
- Le Souder C., Bernicot M.H. (1993). Blé tendre et bilan azoté - Faut-il fertiliser de la même façon toutes les variétés? Perspectives Agricoles 179, 67-73.
- Limaux F., Recous S., Meynard J.M., Guckert A. (1999). Relationship between rate of crop growth at date of fertiliser N application and fate of fertiliser N applied to winter wheat. Plant and Soil 214, 49-59.
- Mailliard A., Bernicot M.H., Lorgeou J., Cohan J.P. (2017). Tolérance du blé tendre à la carence azotée - des variétés aux profils opposés. Perspectives Agricoles 445, 10-13.
- Méléard B. (2007). Choisir une variété - Mettre ses atouts qualité au service d'un débouché. Perspectives Agricoles, 395 (décembre), 18-19.
- Moll R.H., Kamprath E.J., Jackson W.A. (1982). Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. Agronomy Journal 74, 562.
- Oury F.X., Bérard P., Brancourt-Hulmel M., Depatureaux C., Doussinault G., Galic N., Giraud A., Heumez E., Lecomte C., Pluchard P., Rolland B., Rousset M., Trottet M. (2003) Yield and grain protein concentration in bread wheat: a review and a study of multi-annual data from a French breeding program. J. Genet. & Breed. 57: 59-68.
- Oury F.X., Godin C. (2007). Yield and grain protein concentration in bread wheat: how to use the negative relationship between the two characters to identify favourable genotypes? Euphytica 157, 45-57.
- Rémy J.C., Hébert J. (1977). Le devenir des engrais dans le sol. Compte Rendu de l'Académie d'Agriculture Française 63, 700-710.
- Rémy, J.C., Viaux P. (1983). La fertilisation azotée du blé tendre en système intensif en France. Perspectives Agricoles 67, 26-34.
- Soenen B., Le Bris X., Laberdesque M., Cohan J.P., Laurent F., Bouthier A., Gouache D., Garcia C. (2016). "CHN", a crop model to jointly manage water and nitrogen on winter wheat. Presented at the International Crop Modelling Symposium, Berlin.
- Soenen B., Closset M., Bonnard A., Le Bris X. (2017). Validation of a new nitrogen management tool on winter wheat based on remote sensing diagnostic and agronomic prognosis: 'QN-method' - FARMSTAR. Proceedings of 'Innovative Solutions for Sustainable Nitrogen Management', June 26-28 2017, Aarhus, Denmark.
- Sutton M.A., Oenema O., Erisman J.W., Leip A., Grinsven H. van, Winiwarter W. (2011). Too much of a good thing. Nature 472, 159-161.
- Sylvester-Bradley R., Kindred D.R. (2009). Analysing nitrogen responses of cereals to prioritize routes to the improvement of *Nitrogen Use Efficiency*. Journal of Experimental Botany 60, 1939-1951.
- Sylvester-Bradley R., Kindred D.R., Wynn S.C., Thorman R.E., Smith K.E. (2014). Efficiencies of nitrogen fertilizers for winter cereal production, with implications for greenhouse gas intensities of grain. The Journal of Agricultural Science 152, 3-22.