

FERTILISATION N DU BLE TENDRE : QUEL COMPROMIS TECHNICO-ECONOMIQUE ?

Benoît Pagès, Baptiste Dubois, Valérie Leveau, François Piraux

Adapter la fertilisation azotée du blé tendre d'hiver au potentiel de l'année en favorisant le rendement, la qualité et un impact environnemental le plus faible possible est depuis longtemps un des objectifs du producteur et du conseil en fertilisation. Si la dimension économique a toujours été présente, elle se renforce avec des marchés du blé tendre et de l'azote de plus en plus fluctuants et concurrentiels : les effets ciseaux des prix entre production et intrants observés au cours des 10 dernières campagnes accroissent l'incertitude quant à la rentabilité de la production de blé tendre, et en particulier l'efficacité économique de l'apport d'azote. La double incertitude sur le climat et les prix rend la prise de décision des producteurs de plus en plus complexe et accroît le risque économique associé à la production. Il apparaît alors essentiel de proposer des informations et des indicateurs supplémentaires aux producteurs pour leur permettre d'adapter la fertilisation à leurs attentes mais également à leurs contraintes : ces indicateurs doivent combiner les facteurs climatiques, techniques et économiques pour réduire le risque pris par le producteur lors de son choix de stratégie de production. Les éléments proposés ici sont d'ordre stratégique : caractériser la variabilité climatique et intégrer la variabilité économique (marché des matières premières et des engrais azotés) pour quantifier les risques des différents choix en termes de fertilisation azotée.

Contexte

Les prix du blé tendre et des engrais azotés ont fortement fluctué sur les dix dernières années : du simple à plus du double en blé tendre (de 95 à 215 €/t) comme en azote (0.5 à 1.2 €/kg N ammonitrate 33.5%). Le lien entre les cours des matières premières énergétiques et celui du blé tendre étant ténu, des effets ciseaux de prix (variation antinomique des deux marchés) sont observés : le suivi du rapport de prix entre le prix du blé tendre et de l'azote montre une variation interannuelle de celui-ci entre 0.9 et 2.5 sur la période. Au-delà de cette volatilité, le coût de la fertilisation azotée représente une part non négligeable du coût de production complet du blé tendre : environ 12 % des charges sur les 5 dernières années. Elle a également augmenté en valeur absolue de plus de 80 €/ha, c'est-à-dire plus de 20 % de l'augmentation des charges complètes constatée sur la période. C'est en cas d'effet ciseau des prix que l'impact est le plus fort, l'augmentation de charges se répercutant comme une perte de revenu.

La Figure 1 montre la difficulté de raisonnement de la fertilisation azotée : une forte variation du rapport de prix entre blé et azote, un rendement qui fluctue en fonction de l'année, une dose d'azote apportée également mais dans une moindre mesure, un coût de engrais azoté en forte augmentation en tendance.

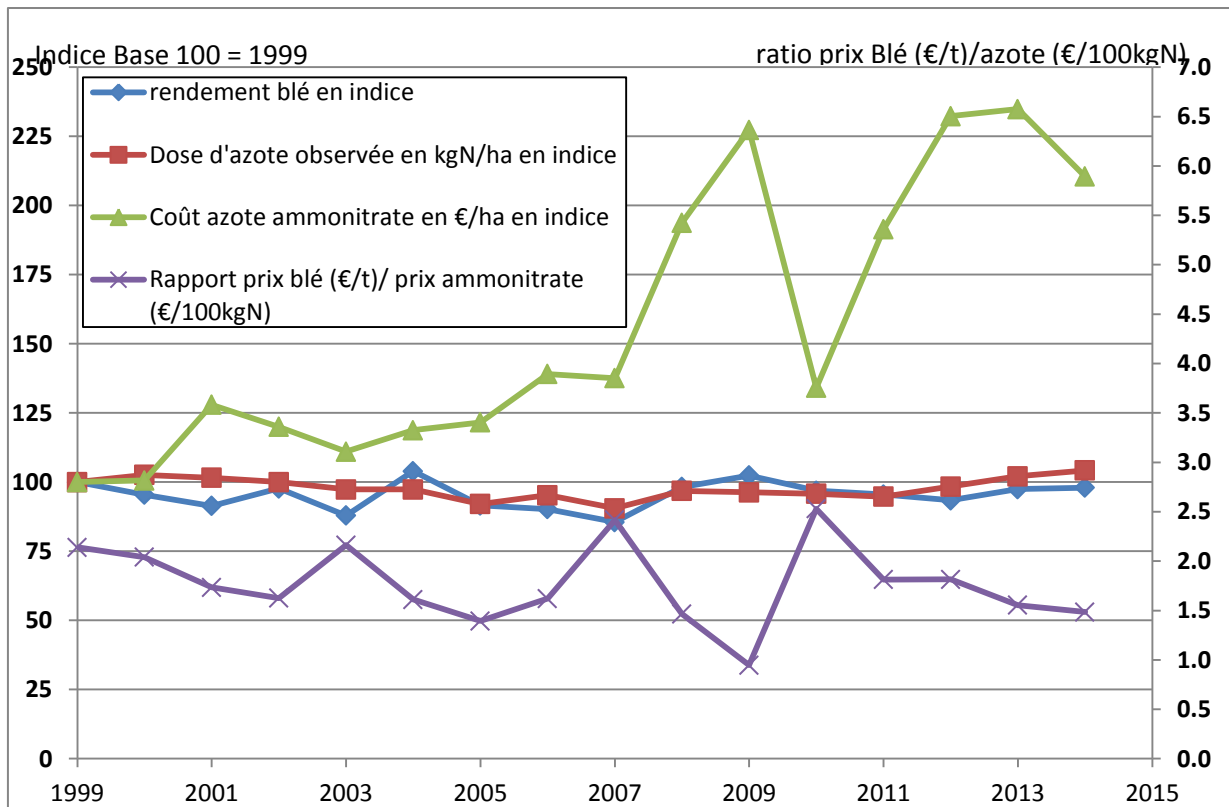


Figure 1 : Evolution en indices du rendement, de la dose d'azote et du coût d'azote/ha – Evolution du ratio prix blé/prix de l'azote. Source Arvalis Enquête Nord Loire – Observatoire Arvalis Unigrains

Matériel et méthodes

1. Données utilisées

Caractériser la variabilité climatique de la réponse du rendement à l'azote nécessite de disposer de données pluriannuelles. Ce sont les résultats d'essais « courbe de réponse du rendement du blé tendre à des doses croissantes d'azote » de deux milieux disponibles à Arvalis qui sont exploités ici. Il s'agit des limons profonds du nord de la France et en Champagne crayeuse. 228 essais effectués entre 2000 et 2010 par ARVALIS Institut du végétal ou des partenaires régionaux ont été analysés. Si les types de sols sont similaires au sein d'une même région, les lieux peuvent être différents selon les années. L'ensemble des essais exploités disposent d'au moins 3 modalités ce qui permet de faire converger le modèle statistique utilisé pour décrire les données.

La variabilité économique utilisera en complément des données annuelles relatives au prix de la tonne de blé tendre et de l'unité d'azote.

2. Modélisation

Un modèle « technique » de réponse du rendement à l'azote

L'originalité des travaux réside ici dans la volonté de rendre compte de la variabilité de la réponse du rendement à l'azote entre contextes pédo-climatiques (année – lieu) à l'aide d'un ensemble de courbes de réponse du rendement à des doses croissantes d'azote. L'idée n'est pas de caractériser les raisons de cette variabilité mais de l'estimer et de proposer ensuite aux producteurs des gammes de variation probable de leurs rendements. Le modèle utilisé est un modèle mixte avec coefficients aléatoires. Ce modèle permet d'ajuster une courbe de réponse par essai et de décrire la variabilité des paramètres de ces courbes de réponse entre essais au moyen de distributions de probabilités. Le type de courbe de réponse modélisée est la courbe classiquement mise en œuvre par les agronomes pour étudier la réponse des céréales à paille à des doses croissantes d'azote (Makowski et al. 1999), à savoir un modèle quadratique atteignant un plateau (assimilable au rendement potentiel de l'essai). (Équation 1)

Équation 1 : modèle quadratique plus plateau

$$\begin{cases} \text{si } N > N_0 \text{ alors } y = p \\ \text{si } N \leq N_0 \text{ alors } y = p - b * (N - N_0)^2 \end{cases}$$

Avec y , N , N_0 , p et b respectivement le rendement, la dose d'azote apportée, la dose optimale, le potentiel de l'essai et la pente de la courbe. Les paramètres du modèle sont donc p , b , et N_0 . Le modèle à coefficients aléatoires utilisé permet d'estimer un jeu de paramètres par essai, c'est-à-dire un ensemble de courbes dont les paramètres sont décrits par des distributions de probabilité :

Équation 2 : lois de distribution des paramètres aléatoires

$$\forall i \in \{p, b, N_0\}, i \sim N(\mu_i, \sigma_i)$$

Augmenter la précision du modèle en ajoutant de l'information sous forme d'expertise

Le modèle technique ci-dessus permet de proposer une courbe régionale de la réponse du rendement à l'azote intégrant la variabilité. Le rendement potentiel du milieu représente un des paramètres du modèle qui varie beaucoup. Le producteur a comme ambition de travailler et raisonner de façon précise à l'échelle de sa parcelle. Améliorer la précision du modèle, en réduisant la gamme de variation des rendements prédictifs, en augmenterait l'opérationnalité pour le producteur.

La forme de la courbe de réponse est peu modifiée d'un lieu à l'autre. Son adaptation, en fonction de la connaissance du producteur/conseiller du rendement potentiel, permet de revoir la distribution des résultats étudiés. Il s'agit d'intégrer *a priori* du producteur /conseiller sur ses rendements dans une approche inférentielle bayésienne. Cette méthode originale permet de combiner des modèles statistiques fondés sur des données et des informations d'expertise.

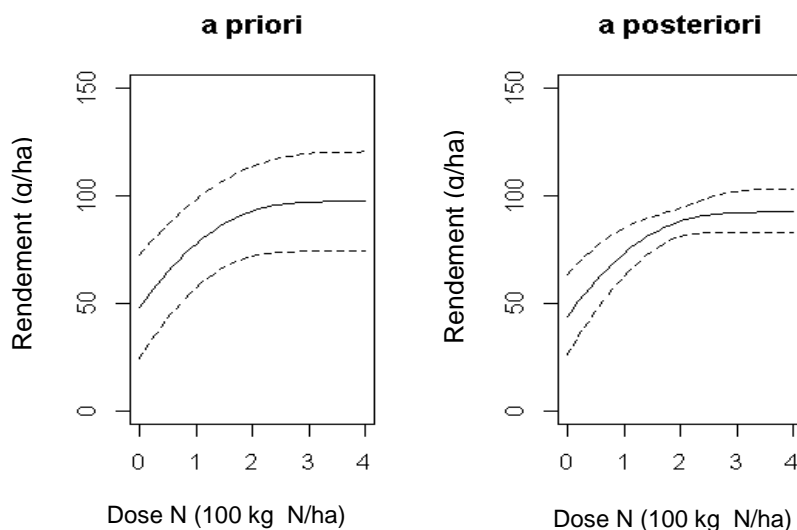


Figure 2 : courbe de réponse du rendement du blé tendre d'hiver à des doses croissantes d'azote avant et après l'intégration de l'information d'expertise sur le modèle moyen du jeu de données limons de Picardie. En pointillé IC à 80%.

L'exemple repris en

Figure 2 montre la modification et le gain de précision du modèle après expertise locale : la courbe moyenne Picardie permet la modélisation dite « *a priori* » de la

Figure 2. Dans le cas d'un producteur estimant son rendement entre 80 et 95 q/ha pour une dose de 200 kg N/ha, on affine la distribution de la courbe proposée « *a posteriori* ». Cela permet de se rapprocher de la situation réelle d'une exploitation et de proposer une courbe de réponse adaptée à son contexte pédoclimatique.

Un modèle technico-économique de réponse du rendement à l'azote

Dans un contexte de marché fluctuant des matières premières agricoles et des intrants, il apparaît essentiel de raisonner ses apports azotés en fonction du milieu, du climat et des prix d'achat des engrais et de vente des cultures, pour déterminer ainsi la dose optimale. Cela entraîne un raisonnement non plus basé uniquement sur le rendement du blé (optimum technique) mais sur la marge brute (MB) azote du blé (optimum technico-économique), calculée ainsi :

$MB = \text{prix de vente du blé } P_b * \text{rendement du blé } Y - \text{quantité d'azote apportée } N * \text{prix de l'azote } P_N$.
Les économistes proposent donc de calculer la dose d'azote qui maximise la marge brute.

Une approche classique dans les modèles de micro-économie des exploitations est de maximiser l'efficacité économique des intrants : atteindre le meilleur ratio entre les coûts associés à la production et les revenus dégagés par cette production. Ainsi le rapport de prix entre les intrants (ici le prix de l'unité d'azote) et les produits (ici le blé tendre) est un élément économique à prendre en compte. Le choix a donc été fait ici d'introduire un indicateur de rapport de prix entre les deux : prix d'une tonne de blé sur prix de 100 kg d'azote (ammonitrate 33).

Dans un premier temps, la marge brute est ainsi exprimée en fonction de ce rapport de prix entre le blé et l'azote :

$$MB = p_N * \rho * Y - \frac{p_b}{\rho} * N, \text{ avec } \rho = \frac{p_b}{p_N}$$

Ensuite, on exprime le rendement du blé à partir du modèle de courbe de réponse défini ci-dessus (Equations 1 et 2) :

$$MB = p_N * \rho * (p - b * (N_0 - N)^2) - \frac{p_b}{\rho} * N$$

Enfin, on détermine la dose d'azote qui conduit à la marge brute maximale à partir de l'expression précédente. Il vient :

$$\frac{dMB}{dN} = 0 = -p_N * \rho * b(2N - 2N_0) - \frac{p_b}{\rho}$$

$$\Leftrightarrow -\rho * b(2N - 2N_0) - 1 = 0$$

$$\Leftrightarrow N_{opt.} = N_0 - \frac{1}{2\rho b} \text{ (Equation 3)}$$

L'équation (3) définit donc la courbe des doses optimales en fonction du rapport de prix. Le terme $-\frac{1}{2\rho b}$ correspond au coût en kg d'azote de la contrainte économique (ρ). La décision de prendre en compte ou non le contexte économique dans le raisonnement de la fertilisation azotée se basera sur ce terme.

Résultats

1. Modèle technique de réponse du rendement à l'azote

La résolution de la fonction d'analyse précédemment explicitée permet de définir les paramètres du modèle de courbe de réponse à l'azote dans les deux contextes pédoclimatiques étudiés. La variabilité des réponses liées à l'effet pédoclimatique est qualifiée dans le tableau ci-dessous (

Tableau 1).

Tableau 1 : Estimation des coefficients du modèle technique de réponse du rendement à l'azote 2000-2010

Type de sol	p (q/ha)		B		N0 (kgN/ha)	
	Moyenne	écart-type	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type
Craie (Champagne)	95.70	13.3	7.1	$5.60 \cdot 10^{-7}$	270	13
Limon (Picardie)	104.65	13.4	7.1	2.06	250	27

En Picardie, le modèle caractérisé par la moyenne des paramètres p, b et N0 et leur variabilité (année /lieu) exprimée par les écarts-types apporte les informations suivantes : « Sur les sols limoneux de Picardie, le potentiel moyen parcellaire est de 104.65 q/ha (+/- 26.8 q/ha, pour un intervalle de confiance à 95%) et est atteint, en moyenne, pour une dose d'azote de 250 UN/ha (+/- 54 UN/ha, pour un intervalle de confiance à 95%) ». L'originalité de la démarche réside ici dans la probabilisation des rendements atteints par les doses de fertilisants.

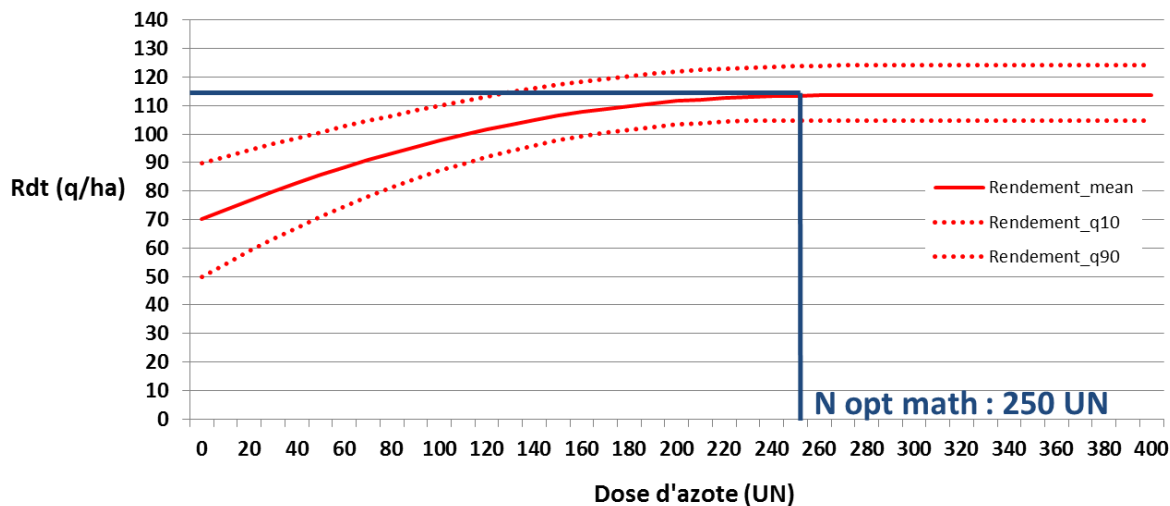


Figure 3 : courbe de réponse à l'azote et incertitude climatique sur les Limons de Picardie – essais 2000 à 2010. Courbe moyenne en traits plein et déciles 1 et 9 en pointillés

La **Figure 3** présente la courbe moyenne de réponse (courbe rouge pleine) et les 2 courbes enveloppes représentant la variabilité.

Du point de vue statistique, la dose d'azote optimale correspond à la dose d'azote minimale nécessaire pour atteindre le rendement du plateau, c'est-à-dire le rendement maximum modélisé (soit 250 kg N/ha +/- 54 kg N/ha dans l'exemple de la **Figure 3**). En raison notamment de la grande incertitude qui entoure généralement cette zone de la courbe de réponse quand elle est ajustée à l'échelle d'une expérimentation individuelle, les agronomes optent le plus souvent pour la détermination de la dose N optimale correspondant à 97 % du rendement plateau. On parle alors d'« optimum technique ». L'analyse de la dispersion des résultats (courbes pointillées : déciles 1 et 9) montre que celle-ci reste élevée avec une variation autour de la moyenne de +/- 26.8 q/ha de la réponse du rendement à l'azote. Elle est également plus forte dans les doses sous-optimales. Ainsi lorsque les producteurs se retrouvent en situation de sous-fertilisation par rapport à l'optimum technique moyen, l'aléa de la réponse du rendement à l'azote semble être accru, le peu de données disponibles dans ces situations extrêmes ne permettent pas de conclure pleinement.

Modèle technico-économique de la réponse du rendement à l'azote: quelle aide à la décision ?

Au-delà de la courbe technique prenant en compte l'aléa rendement, le modèle technico-économique intègre l'aléa des prix du blé et de l'azote. Nous proposons ici de nous positionner dans un contexte incertain pour simuler ce ratio, c'est-à-dire d'effectuer des tirages aléatoires dudit ratio et d'étudier son impact sur le choix de la dose d'azote.

Expliciter le ratio seuil « prix de blé/azote » à partir duquel la contrainte économique est négligeable

Le raisonnement économique des intrants se fera en fonction du rapport coût-bénéfice de l'apport d'azote. Ce dernier est très dépendant du niveau de prix relatif du blé par rapport à l'azote et de la fonction de réponse agronomique du rendement à l'ajout d'azote. Sur les dix dernières années, ce ratio a évolué entre 0.9 et 2.5. Dans le modèle, sa valeur sera définie par des tirages aléatoires. On définit également le « gain du raisonnement économique » comme étant la différence de marge entre un blé fertilisé à l'optimum économique et un blé fertilisé à l'optimum technique.

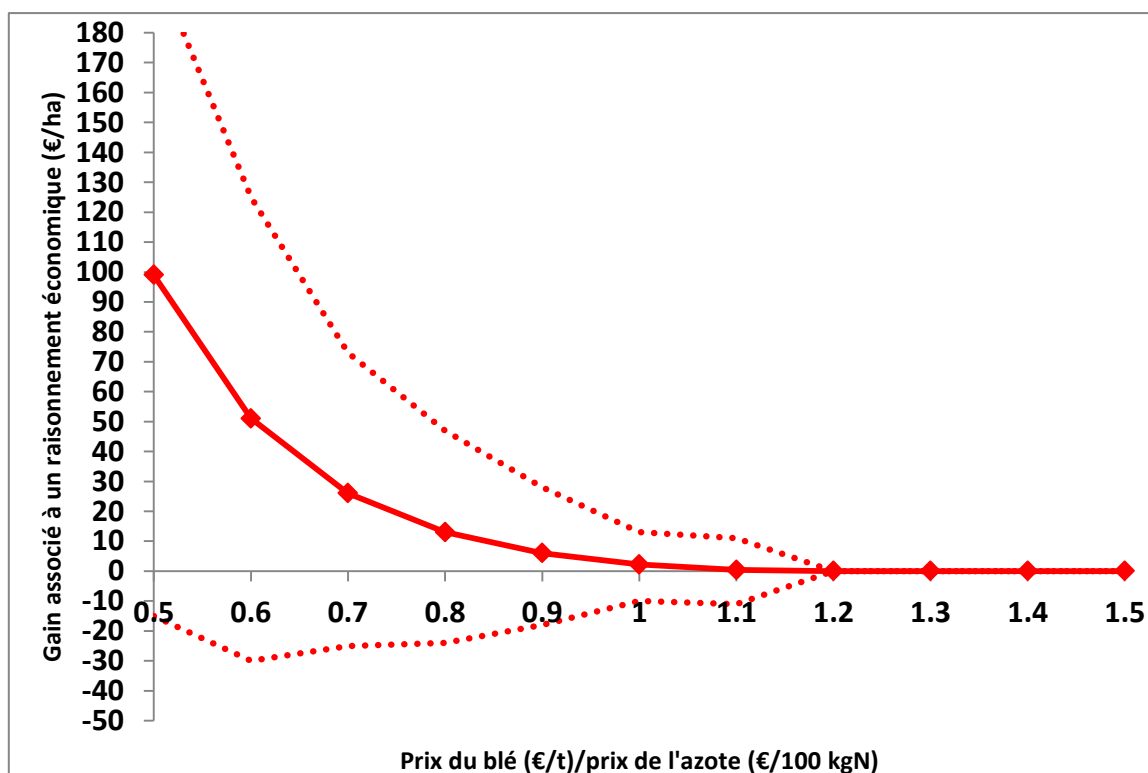


Figure 4 : Ajustement nécessaire de la dose d'azote en fonction du rapport de prix en Picardie. Courbe moyenne en trait plein déciles 1

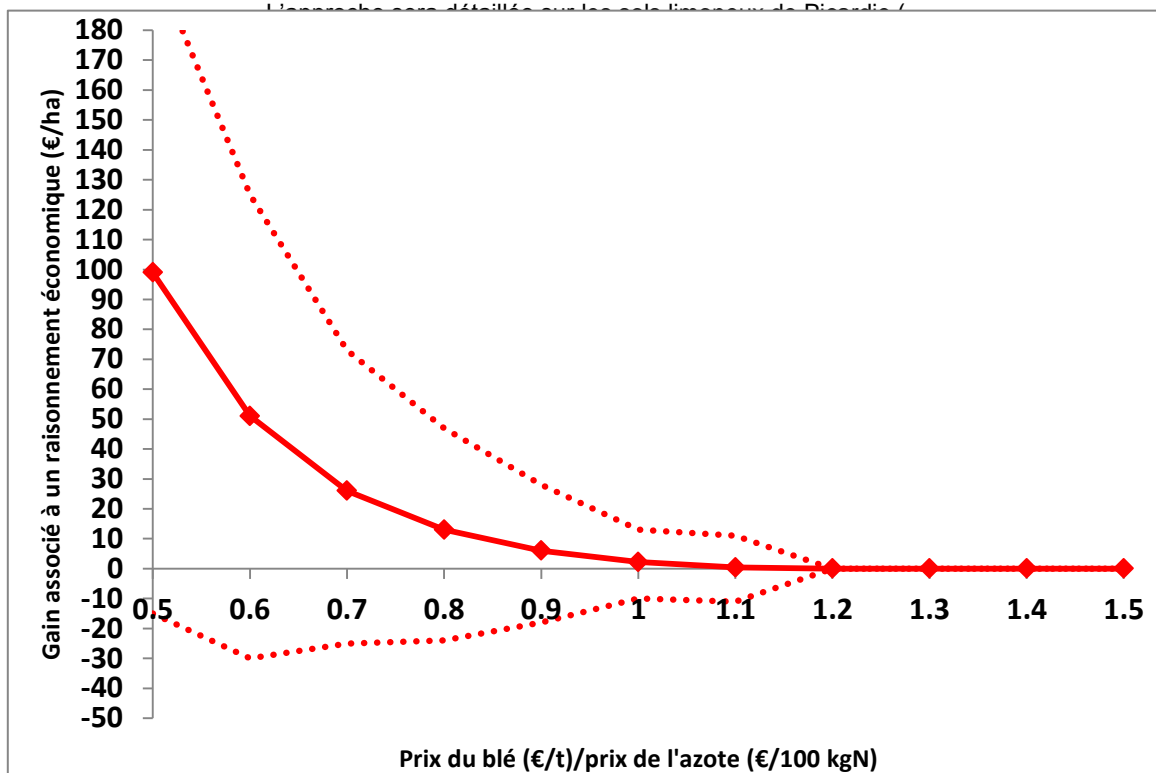


Figure 4). La courbe permet de définir un rapport de prix seuil à partir duquel le gain économique lié à un raisonnement sur l'efficacité économique des intrants est jugé négligeable et suggère au producteur de suivre les recommandations techniques (dose permettant d'atteindre l'optimum technique). Ainsi dans les conditions Picardes, ce ratio s'établit à 1 en moyenne pour un gain économique situé entre -10 et + 10 €/ha. Il peut être affiné grâce à l'approche bayésienne (précision sur le potentiel). En dessous d'un rapport de 1 la contrainte économique devient plus forte que la contrainte agronomique, en moyenne. Le raisonnement est alors plus complexe et le gain lié à un raisonnement technico –économique deviens pertinent : de 10 à 30 €/ha en moyenne pour un ration entre 0.9 et 0.7.

La précision du modèle apparait comme suffisante (+ ou – 10 €/ha) pour utiliser le ratio seuil comme un point d'alerte opérationnel du producteur pour basculer entre les deux raisonnements « technique » et technico-économique. Il a l'avantage d'être rapide à calculer et de se poser en anticipation sur les prix d'azote et de blé (fixer un prix de blé au moment de l'achat d'azote par exemple).

Cette analyse effectuée dans les 2 régions d'étude a révélé des ratios seuils différents, dépendant du contexte pédoclimatiques (**Tableau 2**). La modélisation originale de la réponse à l'azote permet également de considérer le risque pédoclimatique défini ici comme étant l'écart de marge entre le décile 9 (d9) (le moins favorable) et la réponse moyenne.

Tableau 2 : Rapports de prix seuil pour le raisonnement de l'apport d'azote

	Champagne	Picardie
Ratio seuil (Rapport de prix seuil entre blé et azote)	1,2	1
Risque pédoclimatique (écart d9 – moyenne)	17 €/ha	13 €/ha

Exemple d'application au conseil en Picardie

Ainsi, un producteur de la région champenoise peut stratégiquement anticiper ses besoins en fertilisation azotée grâce à cette approche. Si, au moment de ses achats de fertilisants, les signaux de prix sur le marché du blé (MAT échéance récolte – contrats physiques passés) indiquent par exemple un niveau de prix de 160€/t sur le produit, le producteur pourra payer sans risque financier majeur son engrais jusqu'à 1,6 €/kg N. Au-delà de ce prix, pour rester économiquement efficace, dans la région d'étude, le producteur devra adapter sa fertilisation à la baisse par rapport aux recommandations techniques.

Un raisonnement intra-annuel essentiel dans les conditions limitantes

Comme énoncé lors de l'analyse de la dispersion des résultats autour de la courbe moyenne du modèle technique (rendement=f(N)), l'effet année s'applique d'autant plus lorsque l'on s'éloigne de la dose technique optimale. Le rendement prédit devient de plus en plus incertain et dépendant des conditions pédoclimatiques. De ce fait et par symétrie, le résultat économique le devient également de plus en plus. C'est à ce moment-là qu'il faut privilégier une forte adaptation en cours de campagne.

Discussion

L'originalité du modèle technique de réponse du rendement du blé tendre à l'azote dans deux régions françaises tient dans la variabilité des résultats techniques autour de la courbe moyenne usuellement travaillée. Elle permet de mettre en regard la dose d'azote apportée et la probabilité de rendement, au-delà d'une solution unique. Une des limites actuelles est la non prise en compte de l'impact d'une modulation de la fertilisation sur le taux de protéines du blé tendre. Cet élément doit aujourd'hui faire partie du raisonnement de la fertilisation, le taux de protéines étant un des critères des cahiers des charges.

Le modèle technico-économique de réponse du rendement à l'azote permet au producteur de qualifier l'année à travers le ratio seuil prix du blé / prix d'azote. Il peut ainsi commencer à prendre position sur les marchés et raisonner entre d'une manière purement technique ou technico-économique. Il est néanmoins complexe de généraliser l'approche sans adaptation à partir de données expérimentales locales, l'exemple des deux régions étudiées montre que le ratio seuil est dépendant du milieu pédoclimatique de l'exploitation. Les bases de données riches, telles que celles rassemblées en Picardie et en Champagne ne sont pas disponibles partout. Il reste donc à collecter les données et à les tester sur d'autres régions pour affiner cette étude.

L'intérêt majeur des deux modèles est de qualifier la variabilité autour de la moyenne. Il est apparu que plus l'on s'éloigne de la dose optimale technique et du ratio seuil, plus cette variabilité semblait élevée et rendait le raisonnement à mettre en œuvre complexe voire impossible sur une exploitation. Ces modèles sont en effet calibrés et validés à l'échelle régionale... La première approche réalisée pour affiner les éléments en utilisant des inférences bayésiennes et l'expertise du producteur sont prometteuses.

Conclusion

La double incertitude sur le climat et les prix rend la prise de décision des producteurs de plus en plus complexe et accroît le risque économique associé à la production. Dans le cas du raisonnement stratégique de la fertilisation azotée, deux informations sont essentielles pour le producteur : quel risque technique et économique prend-il quand il décide de sa fertilisation azotée et sur quel(s) indicateur (s) facilement calculable peut-il baser sa décision ? Ces indicateurs doivent combiner les facteurs climatiques, techniques et économiques.

L'intérêt majeur des deux modèles technique et technico-économique proposés ici est de qualifier la variabilité de la réponse du rendement à l'azote autour de la moyenne. Le risque technique, rendement, et économique, marge, est donc quantifié. En complément, l'utilisation d'un nouvel indicateur, le rapport de prix entre la production (prix du blé) et les intrants (prix de l'azote) permet, à travers un ratio seuil, de positionner le raisonnement sur un plan uniquement technique ou technico-économique. L'anticipation du contexte « économique » de l'année peut aussi permettre au

producteur de se positionner sur les marchés. Cette étude, menée en Champagne et en Picardie, révèle des ratios seuils respectivement de 1,2 et 1 en se basant sur des essais de courbes de réponse à l'azote de 2000 à 2010. La valorisation de telles références sur d'autres régions permettraient d'enrichir l'approche. Les limites opérationnelles liées à une approche régionale et non pas à l'exploitation semblent être en partie levées en approfondissant la combinaison entre les modèles mathématiques et l'introduction d'informations « à dire d'expert ».

Bibliographie

CAREL Y., LONGCHAMPS J-Y., Bilan économique de la récolte 2014 : Le double effet de la baisse des prix et des aides, Perspectives Agricoles n°417 Décembre 2014 p. 8-13.

LEVEAU V. : Intégrer l'enjeu économique dans le raisonnement de la fertilisation azotée, Perspectives Agricoles n° 379 Juin 2011 p34-37.

MAKOWSKI D., WALLACH, D. & MEYNARD J-M., 1999. Models of yield, grain protein, and residual mineral nitrogen responses to applied nitrogen for winter wheat. *Agronomy Journal*, 91, 377-385.

PONS V., CARAES D., ELISSALT E., Évolution du prix des engrais azotés : le prix du blé joue désormais un rôle significatif, *Analyses et Perspectives Economie Agricole* n°1306, APCA, juillet 2013.