

Doses optimales d'azote sur blé



Une situation à 180 €/t blé et 0,70 €/kg N ne nécessiterait qu'une faible augmentation de la dose d'engrais (+ 8 kg N/ha) par rapport au scénario 100 €/t blé et 0,50 €/kg N.

Quels sont les effets du prix du blé et de l'engrais azoté?

Dans le contexte des cours actuels du blé, une augmentation du prix de l'unité d'azote nécessite-t-elle un ajustement de la dose totale d'azote ? Deux méthodes permettent de répondre à la question.

François Laurent
f.laurent@arvalisinstitutduvegetal.fr

ARVALIS – Institut du végétal

David Makowski
makowski@grignon.inra.fr

INRA

Le renchérissement de l'unité d'azote constatée ces derniers mois interroge sur la nécessité ou non d'ajuster la fertilisation.

Nous avons souhaité répondre à cette question de façon globale sur la sole de blé « France ». 558 essais dits « courbes de réponses à l'azote » conduits entre 1991 et 2002 ont permis de constituer un jeu de données montrant l'effet de doses croissantes d'azote sur le rendement et la teneur en protéines du grain. Pour les analyser simultanément, il est nécessaire d'exprimer les doses d'azote et les rendements selon des échelles indépendantes des caractéris-

tiques du lieu (fournitures du sol en azote et potentiels de rendement). En centrant ces deux échelles sur une dose optimale maximisant le rendement (*figure 1*), il est alors possible de quantifier l'effet d'un défaut ou d'un excès d'azote sur le rendement et la teneur en protéines (*figure 3*). Des modèles quadratique et linéaire ont été ajustés aux observations de rendement et de teneurs en protéines après avoir centré les données sur ces doses optimales. Les modèles ajustés caractérisent donc l'effet moyen de la fertilisation azotée à l'échelle de la France, et rendent compte respectivement de 77 % et

69 % de la variabilité totale.

L'utilisation de la relation moyenne dose d'azote – rendement (*figure 3a*) permet de calculer la dose d'azote nécessaire et suffisante pour maximiser la marge par hectare, compte tenu d'une hypothèse sur le couple de prix blé-azote. Nous avons choisi de comparer les effets de cette dose « optimale sur le plan économique » par rapport à un scénario de référence re-

▶ 558 essais ont permis de montrer l'effet de doses croissantes d'azote sur le rendement et la teneur en protéines du grain.

présentatif de la situation vécue avant le renchérissement des engrais azotés : 100 €/t blé et 0,50 €/kg N. **Le tableau 1a propose les modulations nécessaires de la dose d'azote pour toute variation des prix de l'engrais et du blé par rapport au scénario de référence.** L'impact de ces modulations sur la teneur en protéines a été estimé avec les relations de la figure 3b. Les résultats sont présentés dans le tableau 1b.

Quelques remarques s'imposent à l'issue de cette démarche :

- la synthèse globale des quelques centaines d'essais conduits sur plus de dix ans ne permet pas d'aller au delà de la proposition de tendances moyennes : les chiffres du tableau 1 ne doivent donc pas être interprétés comme des valeurs observables individuellement pour chaque cas particulier et ne sont donc valides qu'à l'échelle de la « sole de blé France ».

- *a contrario*, la large gamme de conditions de milieux (sols et climats) explorées par ce référentiel multisites et pluriannuel, assure une robustesse à ces tendances.

- nous n'avons pas intégré les coûts annexes liés à l'ajustement de la fertilisation azotée, comme le nombre d'apports (entraînant une variation des coûts d'épandage).

Néanmoins, les limites de cette démarche sont de deux ordres :

- les « courbes moyennes » utilisées pour quantifier les effets du prix des intrants et produits ne permettent pas d'analyser la variabilité des réponses à l'azote entre sites et années.

- notre raisonnement est effectué *a posteriori* : le centrage des courbes de réponse sur le point « référence » (97 % du rendement maximal de l'essai) revient à faire comme si nous étions capables de prévoir la dose maximisant le rendement pour chacun des sites-années

Coût de production de l'engrais : très dépendant de celui du gaz

La fabrication d'engrais azoté nécessite la synthèse préalable d'ammoniac (NH_3) qui utilise l'azote atmosphérique de l'air (N_2) et une source d'hydrogène : le gaz naturel.

Urée et nitrate d'ammonium sont obtenus par réaction de l'ammoniac avec le CO_2 ou l'acide nitrique, alors que la solution azotée s'obtient par mélange de ces derniers avec le sulfate d'ammoniaque.

Alors que le prix de l'ammoniac représente 30 % du coût de production de l'ammonitrate, celui du gaz naturel pèse pour 50 %, ce qui signifie que 80 % du coût de revient de cet engrais azoté est plus ou moins directement imputable au prix du gaz, qui peut varier de 1 à 10 selon les sources d'approvisionnement (Norvège, Russie, Algérie et Pays-Bas).

Le marché mondial de l'ammoniac, régi par un faible nombre d'acteurs, est par ailleurs soumis à de fortes tensions, aux USA et même en Europe.

Le prix du gaz étant aligné sur celui du pétrole, le prix des engrais azotés est soumis pour partie aux fluctuations des cours des hydrocarbures.

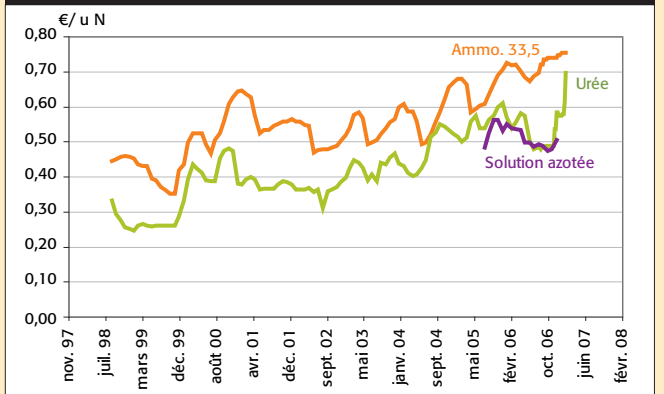
Par ailleurs, la forte demande mondiale en engrais azotés pèse sur les cours que nous observons en Europe de l'Ouest.

Les engrais simples azotés consommés en France (toutes cultures) sont essentiellement représentés par l'ammonitrate

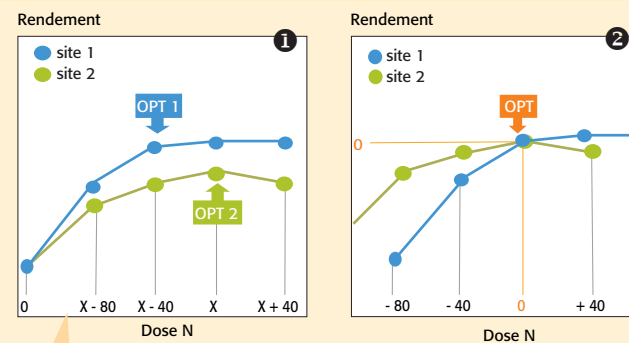
(51 %), la solution azotée (31 %) et l'urée (13 %). Ces formes connaissent des variations de prix parfois brutales, notamment pour la dernière qui subit des fluctuations liées aux importations sur le marché national (figure 2). Après une alternance de « pics » et « creux », le prix de l'unité d'azote a augmenté de 40 % sur les quatre dernières années.

Source : Unifa, 2006

Prix moyens à l'unité d'azote entre septembre 1998 et février 2007 (fig. 2, données reconstituées à partir de diverses sources).



Principe du centrage des courbes de réponse sur la dose d'azote « optimale » de chaque essai (fig. 1)



On détermine *a posteriori* sur chaque courbe de réponse (1) la dose d'azote ayant permis d'atteindre un rendement au moins égal à 97 % du rendement maximal de l'essai. Chaque courbe est alors « déplacée » pour se centrer horizontalement sur cette dose dite optimale et verticalement sur le rendement correspondant. La figure de droite (2) représente alors l'écart de rendement quand la dose d'azote diffère de la dose optimale.

étudiés. Cette démarche ne correspond pas à la situation réelle du raisonnement de la dose d'engrais, fondée sur des règles de décision (méthode du bilan, grilles régionales...)

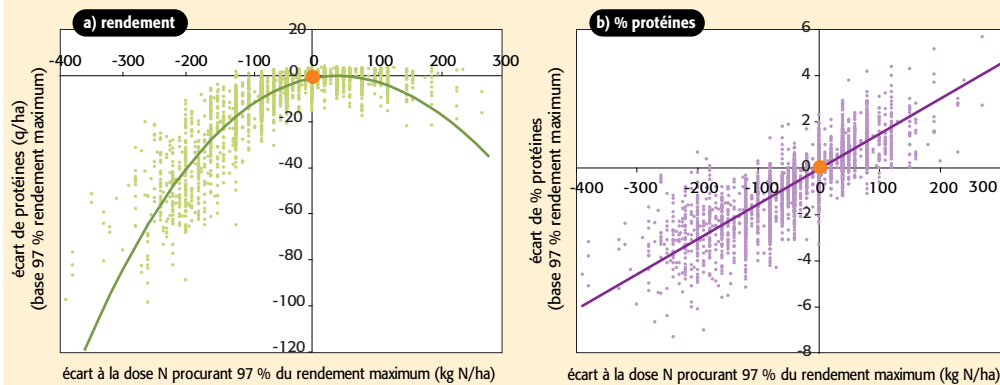
Le prix des engrais azotés a augmenté de presque 40 % sur les quatre dernières années. ▶





© N. Comec

Effet d'un excès ou d'un manque d'azote sur le rendement et la teneur en protéines du blé tendre (558 essais) (fig. 3)



La figure a) montre la relation entre le manque ou l'excès d'azote (par rapport à la dose qui permet d'atteindre 97 % du rendement maximal de chaque essai) et l'écart de rendement et de teneur en protéines. Le scénario de référence (100 €/t de blé et 0,50 €/kg N) à partir duquel seront quantifiés les effets des prix de l'azote et du blé (tableau 1) est illustré par le rond orange.

reposant sur des hypothèses du besoin en azote du peuplement, des fournitures du sol et de l'efficacité de l'engrais.

Une autre façon de traiter la question

Pour ne pas résumer l'information issue d'un grand nombre d'essais à la seule courbe de réponse moyenne, nous proposons une autre démarche, construite en trois temps :

- modéliser la réponse à l'azote à partir de relations dose d'azote – azote absorbé et azote absorbé – rendement qui tiennent compte des principales caractéristiques du milieu (notamment le reliquat d'azote sortie hiver).
- utiliser 115 expérimenta-

Comparativement à notre scénario de « référence » (100 €/t de blé et 0,50 €/kg N), seule une faible augmentation de la dose d'engrais (+ 8 kg N/ha) est nécessaire pour maximiser la marge économique dans la situation à 180 €/t blé et 0,70 €/kg N.

tions conduites dans le centre de la France sur une période de dix ans pour estimer les paramètres du modèle.

- utiliser le modèle pour prédire les réponses du rendement et de la teneur en protéines à la dose d'engrais en fonction des caractéristiques du milieu (on construit un millier de courbes de réponse à l'aide

des valeurs des paramètres précédemment obtenues).

Les courbes générées sont ensuite utilisées pour calculer une dose d'azote maximisant la marge brute à la fois en fonction des caractéristiques du milieu et des prix du blé et de l'engrais.

L'intérêt de cette démarche est qu'elle permet de développer rapidement des modèles simulant le rendement et la teneur en protéines pour blé et orge à partir d'une base de données de type « essais azote ». Ces modèles permettent de déterminer des recommandations de doses d'engrais maximisant le revenu des agriculteurs en tenant compte du contexte économique et des fournitures en azote du milieu, ce que ne permet pas la méthode du bilan. Cette approche permet également d'analyser la variabilité de la réponse à l'azote entre sites et années.

Cinq valeurs de prix de l'azote et deux valeurs de prix du blé ont été utilisées successivement pour calculer des doses d'engrais maximisant le revenu. Les résultats permettent d'examiner la sensibilité de la dose optimale à ces contextes économiques (figure 4).

Avec cette méthode, l'effet d'une augmentation

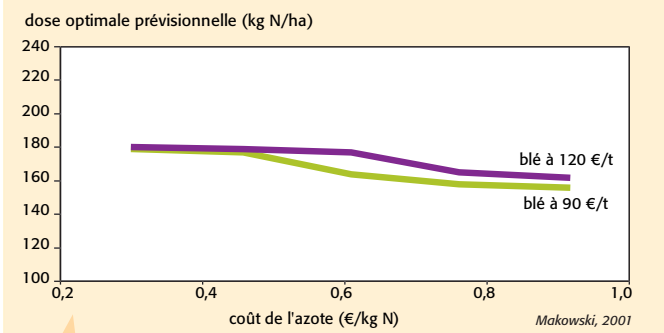
▲ Toute politique de rémunération de la récolte liée à la teneur en protéines aura une incidence sensible sur le raisonnement de la dose.

du prix du blé entre 90 et 120 €/t conduit à augmenter la dose d'engrais de 10 kg N/ha, ce qui est cohérent avec les 8 kg N/ha obtenus avec la méthode précédente pour des prix assez proches. L'antériorité de cette étude explique l'absence de test d'une hypothèse de prix du blé plus élevé - cohérente avec les cours actuels. Cependant, la convergence des tendances nous autorise à penser qu'un prix de 180 €/t augmente la dose opti-

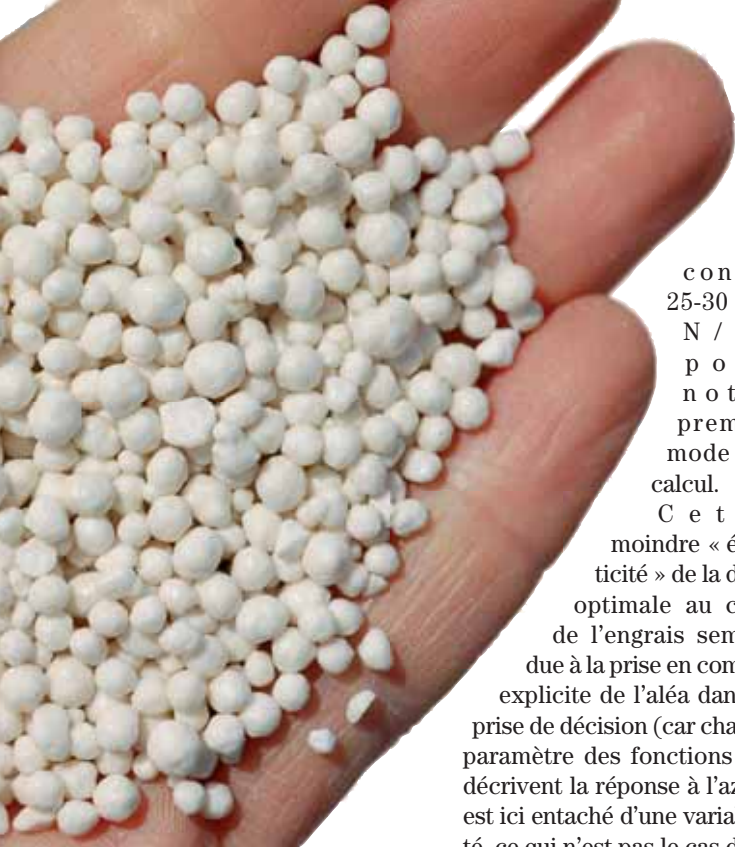


© N. Comec

Effet du prix du blé et du prix de l'engrais sur la dose d'azote qui maximise le revenu par hectare (fig. 4)



Le renchérissement de l'engrais azoté conduit à diminuer la dose conseillée de 15 à 20 kg N/ha.



contre
25-30 kg
N / h a
p o u r
n o t r e
premier
mode de
calcul.

C e t t e
moindre « élas-
ticité » de la dose
optimale au coût
de l'engrais semble
due à la prise en compte
explicite de l'aléa dans la
prise de décision (car chaque
paramètre des fonctions qui
décrivent la réponse à l'azote
est ici entaché d'une variabili-
té, ce qui n'est pas le cas dans
la première approche basée
sur la réponse moyenne des
558 expérimentations).

Précisons pour finir que la
rémunération de la teneur en
protéines de la récolte n'a pas
été prise en compte dans le
calcul des doses d'azote op-
timales de la *figure 4*. Or, la
mise en place d'une rémuné-
ration en fonction de la teneur
en protéines induit une modi-
fication des valeurs optimales
des doses d'engrais lorsque
l'objectif est de maximiser la
marge économique. **Cet effet
a été démontré lors d'étu-**

**L'enjeu du doublement du coût
de l'azote (0,50 à 1,00 €/N) serait
de -10 à - 15 kg N/ha sur la dose
totale. ▼**

▶ La prise
compte de la variabilité
de la réponse à la dose
d'engrais limite la sensibilité
des doses optimales aux
effets prix.

male recommandée d'environ
20 kg N/ha par rapport au
cours le moins rémunérateur.

L'élévation du coût de l'en-
grais se traduit logiquement
par une diminution de la dose
optimale d'engrais à apporter.
Avec cette nouvelle approche,
le passage du coût de l'azote
de 0,46 à 0,91 €/kg N engen-
dre une diminution de la dose
optimale de 15-20 kg N/ha,



Effet moyen du prix du blé et du coût de l'azote sur la dose d'azote optimale *a posteriori* et conséquence sur la teneur en protéine du grain (tab. 1)
 (Ces effets sont calculés par rapport au scénario de référence 100 €/t blé et 0,50 €/kg N illustré par le rectangle bleu)

a DOSE OPTIMALE (kg N/ha)													
		Prix blé (€/tonne)											
		90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Coût azote (€/unité N)	0,30	12	15	17	19	20	21	23	23	24	25	26	26
	0,35	8	11	14	16	17	19	20	21	22	23	24	24
	0,40	4	7	10	12	14	16	17	19	20	21	22	23
	0,45	0	4	7	9	11	13	15	16	18	19	20	21
	0,50	-4	0	3	6	9	11	12	14	15	17	18	19
	0,55	-8	-4	0	3	6	8	10	12	13	15	16	17
	0,60	-12	-7	-3	0	3	5	7	9	11	12	14	15
	0,65	-16	-11	-7	-3	0	3	5	7	9	10	12	13
	0,70	-20	-15	-10	-6	-3	0	2	5	7	8	10	11
	0,75	-24	-18	-13	-9	-6	-3	0	2	4	6	8	9
	0,80	-28	-22	-17	-12	-9	-5	-2	0	2	4	6	7
	0,85	-32	-26	-20	-15	-11	-8	-5	-2	0	2	4	6
0,90	-36	-29	-23	-18	-14	-11	-7	-5	-2	0	2	4	
0,95	-40	-33	-27	-21	-17	-13	-10	-7	-4	-2	0	2	
1,00	-44	-36	-30	-24	-20	-16	-12	-9	-7	-4	-2	0	

b PROTEINES (%)													
		Prix blé (€/tonne)											
		90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Coût azote (€/unité N)	0,30	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	0,35	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4
	0,40	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	0,45	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3
	0,50	-0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
	0,55	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
	0,60	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
	0,65	-0,2	-0,2	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
	0,70	-0,3	-0,2	-0,2	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
	0,75	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1
	0,80	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1
	0,85	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
0,90	-0,6	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	
0,95	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	
1,00	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	

A 100 €/t de blé, une élévation du coût de l'engrais azoté de 0,50 à 0,70 €/kg N peut justifier une baisse de la fertilisation azotée de 15 kg N/ha qui a pour conséquence un **baisse de 0,2 % de la teneur en protéines**. Dans la situation actualisée (à 180 €/t blé et 0,70 €/kg N), une faible augmentation de la dose d'engrais (+ 8 kg N/ha) est nécessaire, sans effet sensible sur la teneur en protéines.

des antérieures sur blé dur (+ 40 à + 50 kg N/ha) et orge brassicole (0 à - 30 kg N/ha). Dans le cas du blé tendre, une « prime protéines » de + 3 à +7 €/t modifie la dose totale optimale de + 10 à + 35 kg N/ha. Les politiques de rémunération de la récolte liée à la teneur en protéines auront donc une incidence sensible sur le raisonnement de la dose, susceptibles de modifier les ajustements précédemment évoqués.

Choix tactiques de fertilisation

À 180 €/t de blé (hors rémunération spécifique du taux de protéines), un doublement du prix de l'unité d'azote de 0,50 à 1,00 € (nous en sommes aujourd'hui à mi-chemin) nécessiterait un ajustement de la dose totale d'azote de l'ordre de - 20 kg N/ha. Ceci entraînerait une chute de la teneur moyenne en protéine de 0,4 %. À 260 €/t de blé, ce même renchérissement de l'intrant justifierait de diminuer la dose de 15 kg N/ha.

Mais le conseil est établi *a priori* et doit intégrer les aléas (climatiques, biologiques...) ainsi que les incertitudes des références techniques utilisées lors du développement des règles de décision (variabilité de besoin par quintal, des fournitures du sol de l'efficacité de l'engrais...). Ainsi, il semble que l'enjeu du doublement du coût de l'azote soit plutôt de -10 à -15 kg N/ha sur la dose totale. Cette diminution s'accompagnerait bien sûr d'une baisse de la teneur en protéines susceptible de générer des pénalités selon les politiques de rémunération de la récolte.

La prise en compte de l'environnement économique n'est donc pas chose évidente dans les choix tactiques de fertilisation. Compte tenu des cours actuels du blé, la hausse du coût des engrais que nous avons subie ne doit pas remettre profondément en cause les conseils de dose totale d'azote. ■

▶ **L'effet d'une augmentation du prix du blé entre 90 et 120 €/t conduit à augmenter la dose d'engrais de 8 à 10 kg N/ha.**

