



Produire plus et mieux
**Les vrai-faux
de la fertilisation azotée du blé**

Editions **ARVALIS** 

Distribué par :



Document réalisé par :

ARVALIS - Institut du végétal

ISBN : 978-2-8179-0289-0

Janvier 2016

ARVALIS
Institut du végétal

ARVALIS - Institut du végétal
3, rue Joseph et Marie Hackin
75116 PARIS
Tel 01 44 31 10 00
www.arvalisinstitutduvegetal.fr

membre de :



*Avec la participation financière du Compte d'Affectation Spéciale pour le Développement Agricole et Rural (CASDAR),
géré par le ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt.*



Avant-propos

Pour la culture du blé, la fertilisation azotée, est un point clé au service de la multi-performance : productivité, qualité, compétitivité, et préservation de l'environnement.

Avec l'eau, c'est, à l'échelle de la France, le premier facteur de production pour obtenir des rendements valorisant les ressources du milieu, et donc contributeur de performance économique.

Par ailleurs, la satisfaction des exigences de nos principaux marchés requiert l'obtention d'une teneur en protéines des grains adaptée. L'ajustement de la fertilisation azotée en termes de dose totale et de fractionnement constitue le principal levier pour agir sur ce critère de qualité.

En plus, l'adaptation de la fertilisation azotée aux besoins de la culture, avec un réglage cohérent du fractionnement au cours du temps contribue efficacement à la maîtrise des impacts pour l'environnement.

Pour répondre à ces enjeux, ARVALIS - Institut du végétal propose ce guide pratique pour aider les producteurs dans la conduite de la fertilisation azotée des cultures de blé. Ce document technique n'a pas la prétention de traiter tous les aspects de ce sujet complexe, mais il vise à mettre l'accent sur certains facteurs clés de réussite. Il apporte des réponses simples à des questions précises sous forme de « vrais/faux » et un éclairage pratique, pour que les producteurs puissent valoriser au mieux ces informations.

Philippe GATE

Directeur scientifique
ARVALIS - Institut du végétal

Sommaire



LES FICHES SOLUTIONS : les leviers pour allier rendement et protéines 6

I. Interaction physiologie du blé et fertilisation

1. L'azote fait taller > **FAUX** 9
2. Les besoins sont plus importants à partir du stade épi 1cm > **VRAI** 10
3. Allier rendement et protéines, c'est possible ! > **VRAI** 11
4. Les apports tardifs font échauder > **FAUX** 12
5. Les apports précoces favorisent la verse > **VRAI** 13
6. Les apports tardifs font verser > **FAUX** 14
7. Qualité des blés, la variété seule ne fait pas tout ! > **VRAI** 15

II. Raisonnement et pilotage de la dose d'azote totale

1. Il n'est pas nécessaire d'apporter plus de 200 kgN/ha en limon profond :
le sol fournit le complément nécessaire > **FAUX** 16
2. Mon outil de pilotage permet de réévaluer ma dose totale d'azote
en cours de campagne > **VRAI** 17
3. Si je veux utiliser un outil de pilotage et réévaluer ma dose d'azote,
je dois être équipé pour moduler > **FAUX** 18

III. Formes des engrais azotés

1. Le soufre ne se substitue pas à l'azote > **VRAI** 19
2. Toutes les formes d'engrais azotés ont la même efficacité > **FAUX** 20
3. En cas de temps sec, les engrais azotés foliaires sont mieux valorisés > **FAUX** 21
4. En apport de fin montaison, la solution azotée peut brûler les feuilles > **VRAI** 22
5. Il faut apporter l'urée ou la solution azotée plus tôt que l'ammonitrate
car ces formes ont un mode d'action plus lent > **FAUX** 23

IV. Fractionnement et valorisation des apports

1. 15 mm de pluie sont nécessaires pour valoriser un apport d'engrais azoté > **VRAI** 24
2. Il fait plus sec au moment du dernier apport d'azote > **FAUX** 25
3. Jusqu'à dernière feuille étalée, l'azote apporté est valorisé
en quintaux et en protéines > **VRAI** 26
4. Si mon pH est trop faible, mon azote sera mal valorisé > **VRAI** 27

1 > Calculer une dose prévisionnelle au plus proche des besoins de la plante

Le calcul de la dose totale prévisionnelle d'azote doit être réalisé en utilisant la méthode des bilans dont les références sont décrites dans les textes du 5^{ème} programme d'action de la directive nitrates (ce calcul est obligatoire : consulter l'arrêté Référentiel Régional de votre région). La précision de ce calcul permettra de limiter les risques de sous ou de surfertilisation de la culture.



Un sous-dosage de 40 kgN/ha fait perdre - 0.6/-0.7 point de protéines du grain et 3.5 q/ha !

Source : ARVALIS : essais France entière

Premier levier à mettre en place : calculer l'objectif de rendement grâce à l'enregistrement de l'historique à l'ilot cultural ou à la parcelle.

Le reliquat d'azote minéral à la récolte n'augmente qu'en cas de surfertilisation.

2 > Fractionner au bon moment

Les besoins en azote des céréales ne deviennent importants qu'à partir du stade épi 1 cm, qui marque le début d'une forte croissance avec une importante production de biomasse. Pour valoriser au mieux l'azote apporté, il est nécessaire de fractionner les apports en fonction des besoins de la plante. Une dose trop importante apportée en une fois ne pourra être instantanément absorbée par la culture et sera éventuellement soumise à des pertes (organisation au sein de la matière organique, volatilisation ammoniacale...).

- 1^{er} apport (optionnel) courant tallage : pas trop tôt, pas trop fort
L'efficacité de cet apport est liée à la croissance de la plante (donc à la température). A cette période, l'efficacité des engrais est limitée et ne dépasse pas 50 %, autrement dit, en sortie hiver une plante peu poussante ne valorise que la moitié de l'azote qu'on lui apporte. Il est donc nécessaire d'attendre un temps poussant et de limiter la dose à 40 kg N/ha.

Dans les sols où les reliquats d'azote sortie hiver sont importants (supérieurs à 60 kg N/ha sur l'horizon 0-60 cm), cet apport peut être décalé sans risque jusqu'au stade épi 1 cm. Une bande témoin semée à double densité apporte une aide pour décider de la date du 1^{er} apport. Une décoloration de cette bande sera le signe précurseur d'une carence sur le reste de la parcelle.



- 2^{ème} apport autour du stade «épi 1 cm» : satisfaire des besoins élevés

A ce stade, la culture démarre sa croissance et ses besoins azotés sont importants. Bonne identification du stade et bonne valorisation sont primordiales. Piloter l'intervention en fonction des conditions météorologiques (pluies annoncées) et de la date du premier apport : un cumul de 15 mm de pluie dans les 15 jours est nécessaire à la bonne valorisation de l'engrais.

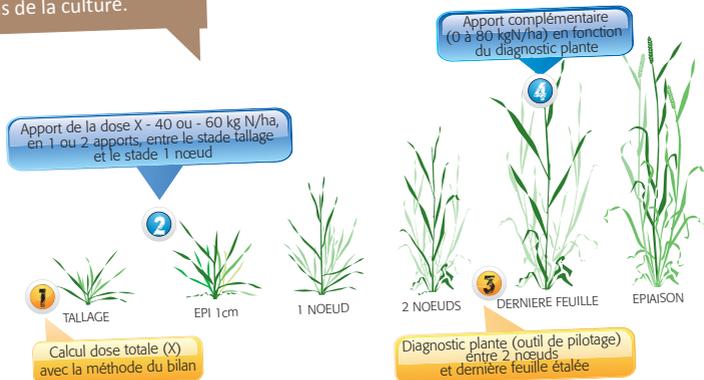
La dose apportée au stade épi 1 cm est égale à la dose totale à laquelle on retranche la dose du 1^{er} apport et la dose réservée pour l'apport fin montaison.



- 3^{ème} apport : l'indispensable apport à « dernière feuille étalée - gonflement »

C'est l'apport le mieux valorisé et le plus décisif pour combiner un effet sur le rendement ET la teneur en protéines. Par ailleurs, et contrairement à une idée reçue, la pluviométrie dans la plupart des régions de France est généralement plus favorable à cette période qu'elle ne l'est en tout début de montaison.

Faire coïncider les apports avec les besoins de la culture.



Calibrer la dose du 3^{ème} apport avec les outils de pilotage

Les outils de pilotage mesurent l'état de nutrition azotée de la plante et permettent d'ajuster la dose du dernier apport aux conditions de l'année. Ce diagnostic doit être réalisé entre le stade 2 nœuds et le stade dernière feuille étalée.

Quel que soit l'outil utilisé (Farmstar Expert, YARA N-Tester, Jubil, N-Pilot, drone...), le diagnostic doit être réalisé sur une parcelle n'ayant pas encore reçu l'intégralité de la dose bilan calculée. Une dose comprise en général entre 40 et 60 kgN/ha est mise en réserve. Pour un diagnostic valide, les apports précédents doivent avoir été réalisés avant le stade 1 nœud et avoir été valorisés par la culture (avec un cumul de pluie d'au moins 15 mm).



15 mm de pluie dans les 15 jours suivant un apport d'engrais azoté sont nécessaires pour une bonne valorisation de l'azote par la culture.

3 > Formes d'azote : attention aux conditions d'emploi

- L'ammonitrate et les urées avec additif inhibiteur d'hydrolyse de l'urée (type NBPT) fournissent les meilleurs résultats et les plus réguliers. Ce sont les formes à privilégier, et notamment pour les derniers apports d'azote au stade dernière feuille étalée.
- Urée et solution azotée contiennent de l'azote sous forme uréique très sensible à la volatilisation : éviter les conditions sèches et venteuses lors de l'épandage. Notons également qu'il est inutile d'anticiper les dates d'apport de ces formes d'engrais.

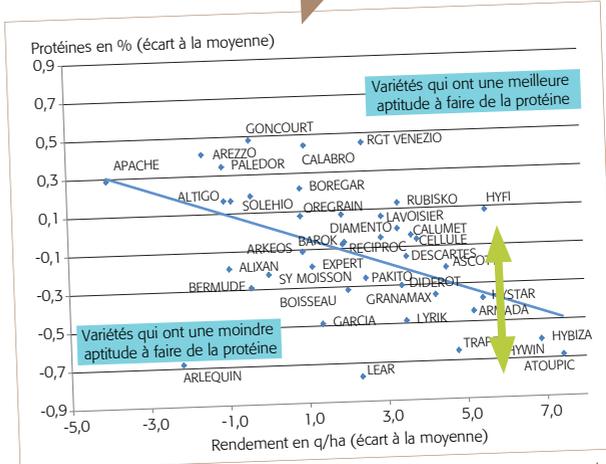
4 > L'intérêt de la génétique

Le choix de la variété conditionne dès le départ le potentiel de rendement, mais également le potentiel de teneur en protéines atteignable. Pour un même niveau de rendement, certaines variétés valorisent mieux l'azote et affichent des teneurs en protéines plus élevées que d'autres à même dose d'azote apportée. A rendement égal, l'enjeu du choix variétal est estimé à +/- 0.7 % de protéines (cf graphique).

ARVALIS publie chaque année un classement variétal sur ce critère.

Relation entre le rendement et la teneur en protéines des variétés de blé

A niveau de fertilisation équivalent, plus le rendement de la variété est élevé, plus sa teneur en protéines est faible. Mais pour un même niveau de rendement, certaines variétés valorisent mieux l'azote et affichent des teneurs en protéines plus élevées que d'autres.



Source : essais variétés blé tendre 2015, réseau ARVALIS et partenaires

Dose d'azote et variété
Les principaux leviers

les enjeux sur la teneur en protéines en %

Fertilisation azotée

C'est le principal levier pour assurer une bonne teneur en protéines

- la dose (pour 40 kgN/ha) - - - - - 0.6 %*
- le fractionnement (3 apports / 2 apports) - - - - - 0.3 %
- la forme (ammonitrate/solution azotée) - - - - - 0.8 %

Choix variétal

A fertilisation azotée équivalente, la teneur en protéines dépend largement de la variété - - - - - 0.5 à 0.7 %

Facteurs climatiques non maîtrisables

Sécheresse, excès d'eau, fortes températures...
Remarque : l'irrigation peut favoriser l'efficacité de l'engrais et l'absorption d'azote post-floraison - - - - - 1.5 à 2 %

Autres éléments de l'itinéraire technique

Peu ou pas d'effet : date de semis, apport de soufre, désherbage, protection fongicide, techniques de récolte et stockage - - - - - négligeable**

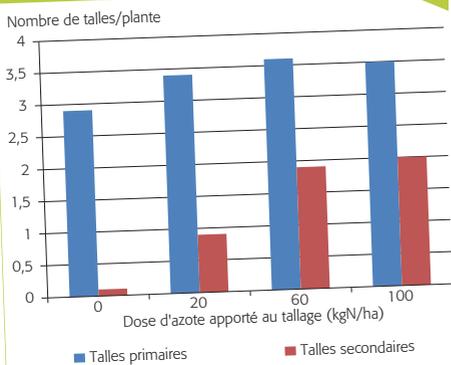
*les enjeux sur la teneur en protéines des différents leviers ne sont pas additifs
** un facteur limitant de la production et donc de l'absorption peut gêner la valorisation de l'azote dans les cas extrêmes.

POINT PHYSIO : LE TALLAGE

Le **nombre de tiges principales** (talles primaires) est indépendant de la nutrition azotée et dépend essentiellement de la date de semis (cumul de températures et durée du jour).

Au cours du tallage, le statut azoté des plantes commande la croissance et le développement de nouvelles talles. **Une suralimentation en début de cycle (avant épi 1 cm) favorisera la croissance de talles secondaires, émergeant à l'aisselle des feuilles des talles primaires.** Elles sont susceptibles de régresser au cours de la montaison si la concurrence avec les talles principales est trop forte. Elles ne contribuent alors pas au rendement et consomment azote et eau au détriment des talles primaires.

Plus la dose d'azote apportée au tallage augmente, plus le nombre de talles secondaires augmente.



Source : Essai Arvalis, Saint Rome, 1981.

L'azote apporté au tallage entretient des talles secondaires qui ne contribuent pas au rendement et favorisent la verse (surtout quand la densité de plantes/m² est élevée).

NE PAS APPORTER TROP D'AZOTE, TROP TÔT PERMET :

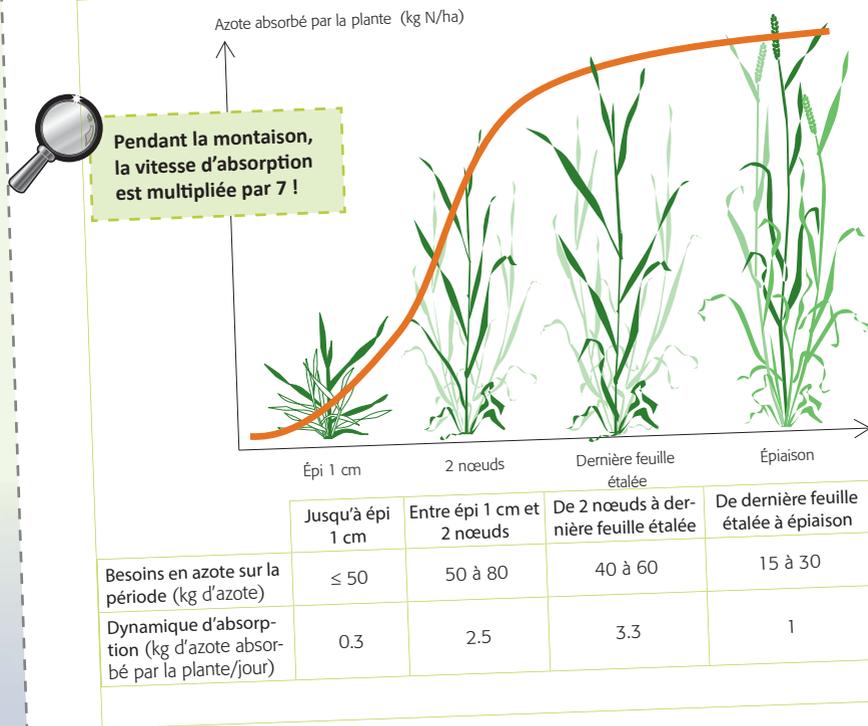
- > **D'apporter l'engrais au plus proche des besoins (montaison) :** meilleure absorption par la plante et limitation des pertes (par volatilisation, organisation microbienne, etc...). L'efficacité de l'azote apporté courant tallage n'est, en moyenne, que de 60%. Ce chiffre passe à 75-80% pour les apports à épi 1 cm et à plus de 85% pour les apports à dernière feuille ;
- > **De limiter le risque de verse** et de maladies en cas de végétation abondante ;
- > **D'assurer une bonne teneur en protéines** en permettant un report de l'azote vers la fin de la montaison.

EN RESUME : au tallage une dose modérée d'azote suffit (40-50 kg N/ha), les impasses d'apport sont souvent possibles (dose totale faible, état de la végétation, sols avec apports organiques fréquents ou reliquats azotés en sortie hiver supérieurs à 60 kgN/ha dans l'horizon 0-60 cm).

Les besoins sont plus importants à partir du stade épi 1 cm

VRAI

L'ABSORPTION DE L'AZOTE EST PROPORTIONNELLE À LA CROISSANCE JUSQU'À LA FLORAISON



L'ESSENTIEL DE L'AZOTE PRÉSENT DANS LA PLANTE À LA RÉCOLTE EST ABSORBÉ ENTRE LES STADES ÉPI 1 CM ET FLORAISON :

Les besoins en azote de la culture jusqu'à la floraison sont directement liés à la mise en place des surfaces foliaires. Limités entre le semis et la fin du tallage, ils augmentent fortement pendant la montaison puis ralentissent à partir de l'épiaison. Ainsi, une parcelle de blé absorbe en moyenne moins de 50 kg d'azote/ha du semis à épi 1 cm, soit une durée d'environ 140 à 150 jours, alors qu'elle va absorber 100 à 150 kgN/ha entre épi 1 cm et floraison soit une durée de 60 à 80 jours !

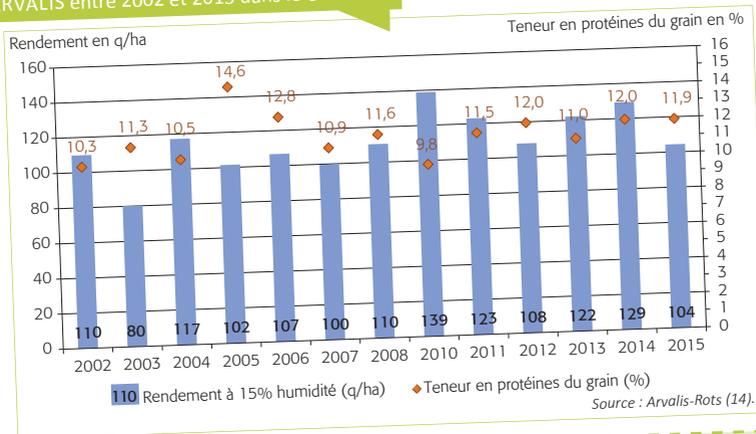
La vitesse d'absorption et donc les besoins instantanés sont ainsi multipliés par 7 entre la période du tallage et la floraison. En conséquence les apports réalisés en début puis en cours de montaison sont absorbés rapidement ce qui garantit une efficacité maximale de l'engrais.

Allier rendement et protéines, c'est possible !

VRAI

LES ESSAIS ARVALIS DÉMONTRENT QU'IL EST POSSIBLE DE CONCILIER RENDEMENT ET TENEUR EN PROTÉINES SUPÉRIEURE À 11 %.

Rendements et teneurs en protéines obtenus dans les essais ARVALIS entre 2002 et 2015 dans le Calvados



Sur 13 ans, la moyenne est de 112 q/ha et de 11,5 % de teneur en protéines du grain : allier rendement élevé et teneur en protéines supérieure à 11 % est possible.

QUELQUES RÈGLES À RESPECTER POUR OPTIMISER RENDEMENT ET PROTÉINES

- > Bien calculer sa dose totale prévisionnelle à apporter en définissant son objectif de rendement en adéquation avec le potentiel de sa parcelle (calculer son objectif de rendement en fonction des rendements réalisés sur l'exploitation selon la méthode réglementaire) ;
- > Fractionner les apports, en minimum 3 passages ;
- > Réaliser les apports en fonction du stade des cultures et des prévisions de pluie :
 - 1^{er} apport : pas trop tôt, le déclencher en fonction de la décoloration des bandes double densité ;
 - 2^{ème} apport : en début de montaison (au stade épi 1 cm) ;
 - 3^{ème} apport : au stade dernière feuille étalée afin de maximiser rendement et teneur en protéines. L'utilisation d'un outil de pilotage (FARMSTAR Expert, YARA N-Tester, JUBIL...) permet d'ajuster la dose du dernier apport aux besoins réels de la culture. Autorisé par la directive nitrates, c'est un des seuls moyens de justifier un ajustement de la dose d'azote en cours de campagne.

En blé, sous-estimer sa dose totale de 40 kg d'azote/ha par rapport à l'optimum, c'est une perte moyenne de 3,5 q/ha et de - 0,6/-0,7 % de protéines.

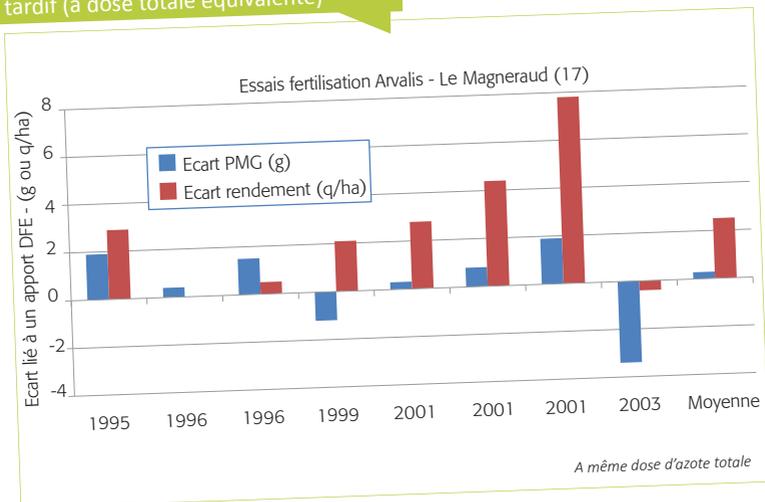
Source : ARVALIS, essais France entière.

Les apports tardifs font échauder

FAUX

UN APPORT TARDIF À DERNIÈRE FEUILLE ÉTALÉE N'A LE PLUS SOUVENT AUCUN IMPACT SUR LE POIDS DE MILLE GRAINS

Écarts de PMG* et de rendement dus à un apport tardif (à dose totale équivalente)



DANS LES ARGILO-CALCAIRES SÉCHANTS DU MAGNERAUD, SUR 5 ANNÉES D'ESSAIS UN DERNIER APPORT EST SANS EFFET SUR LE POIDS DE MILLE GRAINS

Dans ces essais, conduits dans les argilo-calcaires séchants de Charente-Maritime, on compare en culture non irriguée une modalité recevant un dernier apport d'azote entre épi 1 cm et 1 nœud à une autre recevant un report de 40 à 50 kgN/ha au stade dernière feuille étalée. Les doses totales apportées sont identiques. Sur 5 années expérimentales où l'on dispose d'une à 3 comparaisons par an, l'effet de l'apport tardif est légèrement positif sur le rendement (+ 2 q/ha non significatif). L'impact sur le PMG* dans ces mêmes situations est neutre en moyenne. Dans 2 cas seulement on observe une légère diminution du PMG. Celle-ci peut être mise en relation avec un accroissement significatif du nombre de grains/m². La légère baisse de PMG* est, dans ces deux situations, liée à un effet de compensation des composantes et non à un effet d'échaudage qui se traduirait par une chute simultanée du PMG et du rendement.

* PMG : Poids de Mille Grains

Les apports précoces favorisent la verse

VRAI

IMPACT DES APPORTS PRECOSES D'AZOTE SUR LA VERSE DES CEREALES

La verse des céréales est favorisée par les densités de végétation trop importantes et une trop forte élongation des entrenœuds qui fragilisent les tiges. La pluie et le vent en fin de cycle agissent alors comme éléments déclencheurs.

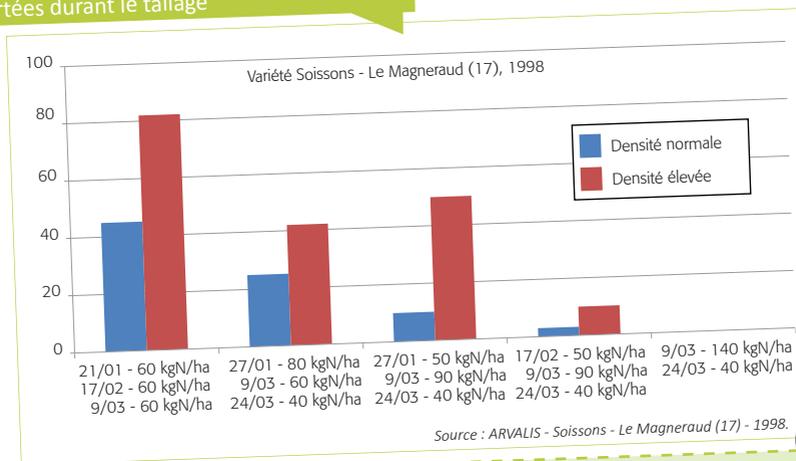
Le risque agronomique de verse est déterminé très tôt, dès la mise en place du nombre de tiges/m² (entre tallage et 1 nœud). Les états de surnutrition azotée au tallage favorisent le maintien d'un grand nombre de talles secondaires jusqu'au stade épi 1 cm. Elles régressent généralement courant montaison et ne contribuent pas au rendement. Par la suite, début montaison, une suralimentation azotée favorisera l'élongation des entrenœuds et les fragilisera.

Des apports d'azote précoces trop importants (ou une trop forte disponibilité à travers des reliquats élevés) constituent donc un facteur de risque supplémentaire de la verse.

Dans l'essai présenté ci-dessous on compare différentes modalités d'apport d'une même dose totale d'azote. Les conditions climatiques de l'année d'expérimentation étaient particulièrement favorables à la verse. Le graphique montre l'impact des dates et doses d'apport sur l'intensité de la verse (0 absence de verse, 100 parcelle totalement à plat). Dans cette situation, le stade épi 1 cm est intervenu le 9 mars. Plus les apports antérieurs (janvier/février) sont élevés et/ou fréquents, plus la verse est intense entraînant une perte de rendement significative pour les cas les plus versés. Ces effets sont accentués par une densité initiale trop importante.

Des apports d'azote très modérés au cours du tallage (40 à 50 kgN/ha) déclenchés uniquement dans les situations où ils sont indispensables constituent un élément déterminant pour réduire le risque de verse.

Intensité de la verse selon les quantités d'azote apportées durant le tallage



Plus la quantité d'azote apportée au cours du tallage est importante, plus le risque de verse est important.

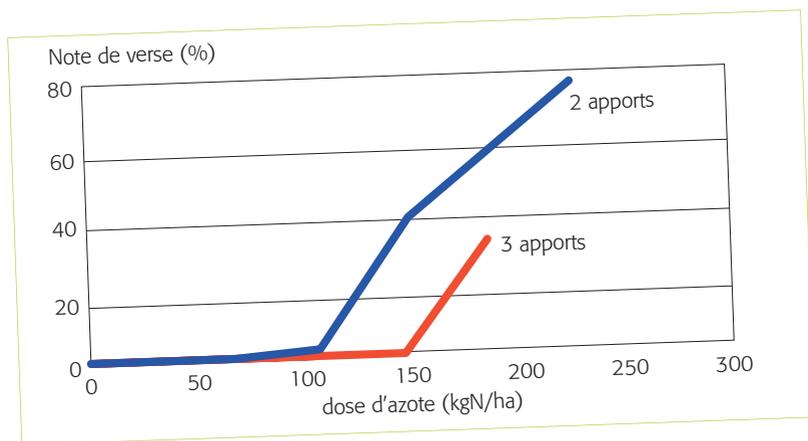
Les apports tardifs font verser

FAUX

IMPACT DU FRACTIONNEMENT DE LA DOSE D'AZOTE SUR LA VERSE DES BLÉS

Le risque agronomique de verse est déterminé très tôt, dès la mise en place du nombre de tiges/m² (tallage/début montaison) (cf. fiche « Les apports précoces font verser »). Les apports tardifs, réalisés entre 2 nœuds et gonflement vont surtout servir à alimenter les organes proches de l'épi et l'épi lui-même. Ils n'ont aucune influence sur le nombre de tiges et sur la longueur des entre-nœuds facteurs responsables de la verse.

L'essai présenté ci-dessous compare des doses totales d'azote croissantes apportées de 2 façons différentes : en 2 apports (tallage puis épi 1 cm) ou en 3 apports (tallage, épi 1 cm puis fin montaison). L'indicateur retenu ici est la note de verse qui est proportionnelle à l'intensité de la verse. Pour une même dose totale apportée, les stratégies en 3 apports permettent de diminuer l'intensité de la verse en réduisant les quantités d'azote mises à disposition de la plante précocement.



Pour une même dose totale apportée les stratégies en 3 apports diminuent le risque de verse !

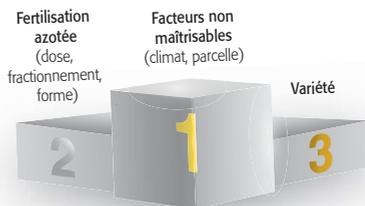
Pour une même quantité totale d'azote apportée, le report d'une partie significative de la dose d'azote en fin de montaison, peut permettre de réduire le risque de verse en diminuant d'autant la quantité d'azote apportée précocement.

Qualité des blés : la variété seule ne fait pas tout !

VRAI

Le choix de la variété a un impact sur la teneur en protéines du grain de blé. Mais ce facteur n'arrive qu'en troisième position après les conditions de culture (climat et parcelle) et la gestion de la fertilisation azotée.

Hiérarchie des facteurs d'influence de la teneur en protéines du grain des blés



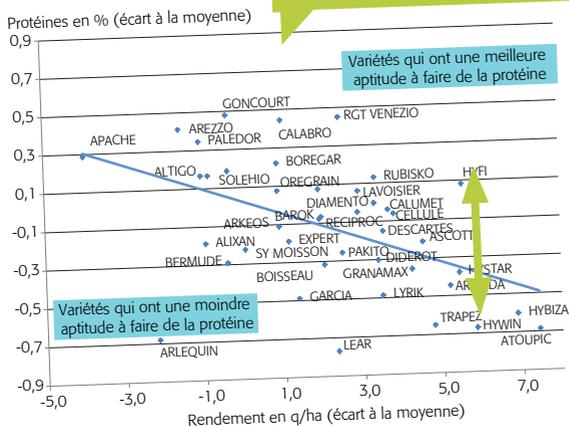
Source : ARVALIS

CHOIX VARIÉTAL : QUEL ENJEU ?

A niveau de fertilisation équivalent, plus le rendement de la variété est élevé, plus la teneur en protéines est faible. Mais pour un même niveau de rendement, certaines variétés valorisent mieux l'azote et affichent des teneurs en protéines plus élevées que d'autres.

Certaines variétés de blés (blés de force) peuvent atteindre des teneurs en protéines très élevées, au détriment de leur rendement qui est, en général, beaucoup plus faible que les variétés panifiables.

Relation entre le rendement et la teneur en protéines des variétés de blé



Source : essais variétés blé tendre 2015, réseau ARVALIS et partenaires

Pour un même rendement et une même dose d'azote apportée, certaines variétés font plus de protéines que d'autres. L'enjeu est de +/- 0.7 point de protéines : **CHOISIR UNE VARIÉTÉ QUI VALORISE MIEUX L'AZOTE**

manuel « Choisir et décider » Céréales à paille, Variétés et interventions d'automne, Blé tendre - Téléchargement libre sur arvalis-infos.fr

Pour en savoir plus : Document an-

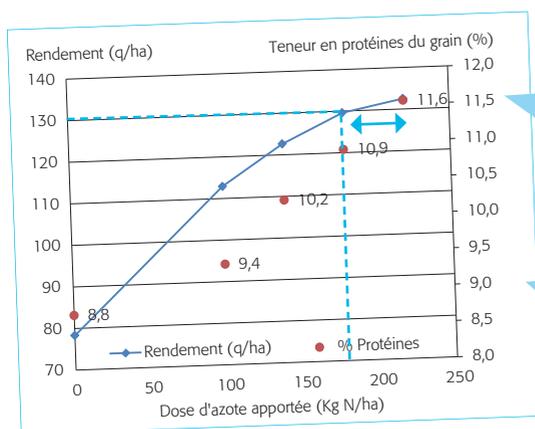
Il n'est pas nécessaire d'apporter plus de 200 kg N/ha en limon profond : le sol fournit le complément nécessaire

FAUX

Il est important de bien définir sa dose totale prévisionnelle à apporter grâce à la méthode du bilan via un outil de calcul de dose. Afin d'atteindre l'optimum rendement-protéines, il est possible de la réajuster en cours de campagne grâce à un outil de pilotage.

UN EXEMPLE EN 2009 À PLELO (22)

La dose totale prévisionnelle était de 180 kg N/ha, or dans cette situation, il était nécessaire de réajuster la dose en cours de campagne d'au moins 40 kgN/ha pour atteindre l'optimum.



L'ajout de 40 kgN/ha par rapport à la dose prévue au préalable permet de gagner 2 q/ha et 0.7 % de protéines.

A 180 kg N/ha, l'optimum de rendement et de protéines n'est pas atteint.



La dose réévaluée en cours de campagne se raisonne et s'ajuste en fonction du besoin de la culture. Certains outils de pilotage, comme Farmstar Expert, intègrent l'azote fourni par le sol dans le calcul de la dose du dernier apport.

Les expérimentations montrent que dans certaines situations et certaines années, il ne faut pas plafonner sa dose totale à 200 kg N/ha pour atteindre l'optimum rendement et protéines*. Ces conclusions s'appliquent dans toutes les régions.

* Dans le respect de la réglementation en vigueur selon le secteur concerné (consulter l'arrêté Référentiel Régional de votre région).

Mon outil de pilotage permet de réévaluer la dose totale d'azote en cours de campagne

VRAI

LES OUTILS DE PILOTAGE MESURENT L'ÉTAT DE NUTRITION AZOTÉE DES PLANTES EN COURS DE MONTAISON ET PERMETTENT D'AJUSTER LA DOSE D'AZOTE EN CONSÉQUENCE

Ils diagnostiquent si la culture est correctement alimentée ou en situation de carence azotée.

Quel que soit l'outil utilisé, le calcul de la dose totale prévisionnelle doit se faire au préalable à l'aide d'une méthode reconnue. Une partie de cette dose (40 à 60 kg N/ha) doit être mise en réserve. Le diagnostic de nutrition azotée est réalisé au moyen d'un outil de pilotage entre le stade 2 nœuds et dernière feuille. Il aboutit à un conseil de dose d'azote complémentaire, généralement compris entre 0 et 80 kg N/ha.

LES OUTILS DE PILOTAGE PERMETTENT D'AJUSTER LA DOSE PRÉVISIONNELLE AUX BESOINS RÉELS DE LA CULTURE POUR S'APPROCHER DE LA DOSE OPTIMALE

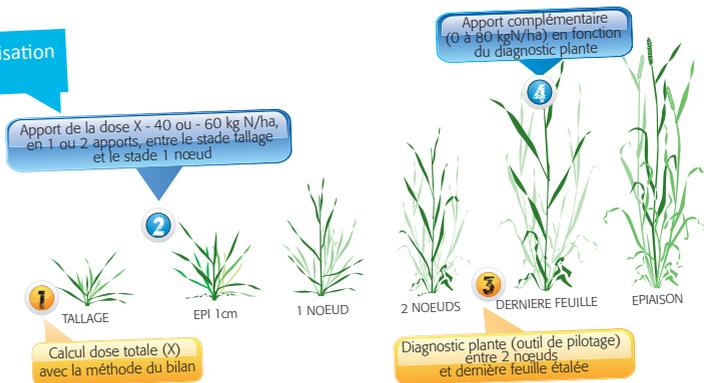
La dose totale prévisionnelle est une dose moyenne, calculée en début de cycle. Elle peut être ajustée en fonction des conditions climatiques, de l'état de nutrition azotée et de la croissance de la plante. En interrogeant la plante, l'outil de pilotage rend compte des conditions de culture et ajuste la dose complémentaire à apporter.

Le pilotage est d'autant plus justifié dans les situations où l'incertitude sur les fournitures d'azote par le sol et/ou sur la valorisation des apports d'azote antérieurs est importante. C'est le cas notamment des systèmes de culture avec apports de produits résiduels organiques ou avec des formes d'engrais azoté apportées sensibles à la volatilisation (solution azotée, urée, lisier).

Les outils de pilotage diagnostiquent l'état de nutrition azotée de la plante en mesurant la teneur en nitrates du jus de base de tige ou la teneur en chlorophylle des plantes. Pour certains d'entre eux, la biomasse mesurée apporte une information complémentaire pour le calcul de la dose du dernier apport. Les outils se basant uniquement sur un indice de végétation (type NDVI*) ne permettent pas de réajuster la dose du dernier apport.

Il est important de respecter les conditions de validité qui sont propres à chaque outil pour assurer la fiabilité du conseil. En particulier, le diagnostic doit être réalisé après le stade 2 nœuds, en s'assurant que les apports précédents aient été bien valorisés (apport au plus tard au stade 1 nœud et une quantité de pluie supérieure à 15 mm depuis le dernier apport d'azote).

Raisonnement de la fertilisation azotée sur blé



*NDVI : Indice de Végétation

Si je veux utiliser un outil de pilotage et réévaluer ma dose d'azote, je dois être équipé pour moduler

FAUX

On confond souvent la modulation des apports d'engrais et le diagnostic de nutrition azotée réalisé sur les plantes. Ce diagnostic est primordial car il permet d'ajuster la dose totale prévisionnelle à apporter en cours de campagne, en fonction des besoins de la plante. Même si les enjeux de la modulation sont moins importants, cette technique peut être intéressante pour le dernier apport d'azote, surtout sur les parcelles les plus hétérogènes.

DIAGNOSTIC, MODULATION, PILOTAGE ?

> Le diagnostic de l'état de nutrition azotée consiste à mesurer le statut azoté de la plante en cours de montaison. Il nécessite l'utilisation d'outils qui permettent de définir la dose d'azote complémentaire à apporter via des indicateurs mesurés (concentration en nitrates du jus de base de tige, teneur en chlorophylle des feuilles) ;

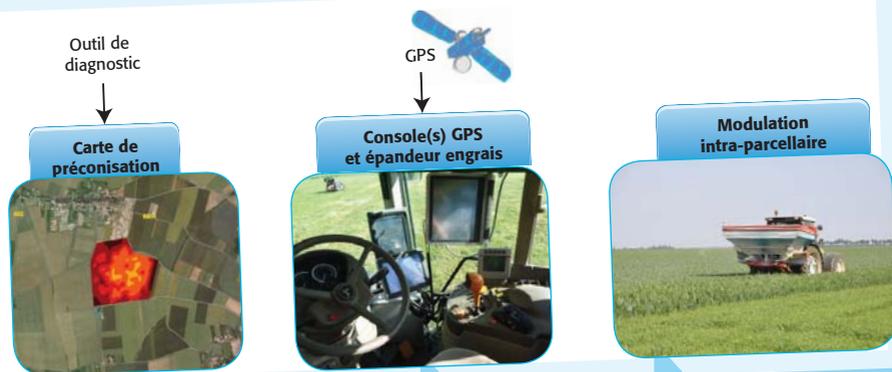
La modulation intra-parcellaire consiste à apporter des doses d'azote différentes à l'intérieur d'une même parcelle. Les outils qui mesurent seulement un indice de végétation (comme par exemple le NDVI*) permettent de faire de la modulation, mais pas de diagnostic du statut azoté de la plante ;

> Le pilotage de la fertilisation azotée passe nécessairement par le diagnostic de l'état de nutrition azotée et peut, pour certains outils, proposer de la modulation.

*NDVI : Indice de Végétation

LA MODULATION AUTOMATIQUE, COMMENT ÇA MARCHE ?

L'épandage du dernier apport d'azote en modulation intra-parcellaire permet un gain maximal de 3 q/ha (sur les parcelles les plus hétérogènes et les mieux structurées).



La console de l'épandeur lit la carte de modulation. En fonction de son positionnement dans la parcelle, elle envoie l'information à l'épandeur pour le réglage du débit.

La modulation manuelle est également possible sur les parcelles où on peut distinguer des grandes zones avec des préconisations de doses différentes.

Pour en savoir plus : brochure « Agriculture de précision : positionnement GPS, gestion intra parcellaire et évaluation des performances », Edition Arvalis, février 2015

Le soufre ne se substitue pas à l'azote

VRAI

LE SOUFRE : UNE CINÉTIQUE D'ABSORPTION ANALOGUE À CELLE DE L'AZOTE

Comme pour l'azote, l'essentiel du prélèvement de soufre a lieu pendant la montaison. Avant épi 1 cm, le soufre disponible dans le sol suffit, la plupart du temps, à assurer les besoins de la culture durant l'automne-hiver. En cas de besoin, il est nécessaire d'apporter le soufre sous forme de sulfate (SO_3) de façon précoce, au plus tard au stade épi 1 cm, pour qu'il soit absorbé à 1-2 nœuds.

Les apports tardifs (après 1-2 nœuds) ne pourront en aucun cas corriger une carence en soufre.

Le soufre ne doit donc pas constituer le facteur limitant de la croissance. En aucun cas, une unité de soufre ne peut se substituer à une unité d'azote.



Les plantes absorbent le soufre sous forme de sulfate (SO_3) et non pas S.

LE SOUFRE SERT D'ABORD LE RENDEMENT

Les situations où un apport de soufre se justifie dépendent principalement du type de sol et de la pluviométrie hivernale (lessivage du sulfate).

Les plus fortes réponses au soufre s'observent sur les sols de craie, argilo-calcaires superficiels et sableux ou sablo-limoneux superficiels où les pertes de rendement peuvent être supérieures à 10 q/ha. Sur les sols profonds limono-argileux ou argileux, le risque est plus faible et principalement lié à la pluviométrie hivernale.

La diminution des apports organiques et des retombées atmosphériques de soufre peuvent cependant entraîner des carences plus fréquentes que par le passé (voir préconisations régionales). Les apports organiques fréquents ou apports de soufre sur le précédent contribuent à limiter le risque.

PEU D'EFFET SUR LA QUALITÉ

L'apport de soufre n'a, le plus souvent, pas d'effet sur la teneur en protéines mais peut modifier leur nature. Cela se traduit par une diminution du rapport ténacité/extensibilité (P/L) des pâtes. Cet effet, non systématique, qui peut s'avérer favorable ou non selon le P/L des variétés, ne justifie pas de préconisation d'apport de soufre uniquement pour améliorer la qualité technologique du blé.

La carence en soufre est visible à partir du début montaison. Elle se manifeste en foyers par décoloration des jeunes feuilles (stries vert clair)



Toutes les formes d'engrais azotés ont la même efficacité

FAUX

QUELLES PERFORMANCES DES DIFFÉRENTES FORMES D'ENGRAIS AZOTÉS ?

Performances comparées des engrais azotés

| | | Différence de rendement par rapport à l'ammonitrate | | Différence de teneur en protéines du grain par rapport à l'ammonitrate | |
|----------------|--|---|----------------|--|----------------|
| | | Sols non calcaires | Sols calcaires | Sols non calcaires | Sols calcaires |
| [SOL N – AMMO] | Tous les apports ⁽¹⁾ | -1.9 q/ha* | -3.9 q/ha* | -0.6 %* | -0.75 %* |
| | 3 ^{ème} apport ⁽²⁾ | -1.1 q/ha* | | -0.4 %* | |
| [UREE – AMMO] | Tous les apports ⁽³⁾ | -1.4 q/ha* | -4.5 q/ha | -0.23 %* | -0.22 % |
| | 3 ^{ème} apport ⁽⁴⁾ | -0.4 q/ha | | -0.11 %* | |

(1) 120 essais ITCF-HAF dont 78 en sols non calcaires (1983-1995) ;

(2) 20 comparaisons ARVALIS (2003) ;

(3) 31 essais ITCF-ARVALIS (1981-2013) dont 5 en sols calcaires ;

(4) 60 comparaisons ARVALIS (2003)

Seules les valeurs suivies d'un (*) sont statistiquement significatives.

L'AMMONITRATE EST LA FORME DE RÉFÉRENCE

- > Dans les situations qui génèrent des pertes importantes d'azote par volatilisation ammoniacale (sol calcaire, temps sec et venteux pendant et après l'apport...) la forme ammonitrate est celle qui apporte les meilleures performances.
- > L'urée présente en moyenne une efficacité proche de l'ammonitrate. Mais des chutes de rendement importantes ont pu parfois être observées (notamment en sol argilo-calcaire et terre de craie), imputables à des pertes par volatilisation.
- > Les engrais à base d'urée avec un additif inhibiteur de l'uréase qui ralentit la transformation de l'urée vers une forme d'azote assimilable par les plantes permettent des résultats équivalents à l'ammonitrate. Dans les situations où l'urée est en difficulté, ces produits présentent une bonne efficacité.
- > La solution azotée montre une efficacité plus variable et des performances en moyenne inférieures à celles de l'ammonitrate. C'est la conséquence des pertes par volatilisation ammoniacale qui peuvent être importantes dans les heures et jours suivant l'apport.

Pour corriger les pertes liées à la volatilisation, il est recommandé d'utiliser la « Grille d'évaluation du risque de volatilisation ammoniacale » du COMIFER (<http://www.comifer.asso.fr>). Cela permet un éventuel ajustement de la dose de solution azotée à apporter en fonction notamment des conditions pédoclimatiques au moment de l'apport (dans le respect de la réglementation en vigueur). A l'exception des sols calcaires, cela permet d'égaliser la performance sur le rendement obtenu avec l'ammonitrate, mais pas celle de la teneur en protéines.

En cas d'apport d'azote sous une forme sensible à la volatilisation, l'utilisation d'un outil de pilotage s'avère particulièrement pertinente pour ajuster la dose au dernier apport.

En cas de temps sec, les engrais azotés foliaires sont mieux valorisés

FAUX

Les expérimentations montrent que les engrais foliaires que nous avons testés n'affichent pas une efficacité supérieure à celle de l'ammonitrate, à même dose totale d'azote apportée. Pour maximiser l'efficacité du dernier apport d'azote sur céréales, il est préférable d'utiliser un engrais solide appliqué dans de bonnes conditions.

Si le manque de pluie pénalise l'absorption des engrais au sol, il pénalise aussi souvent l'assimilation de l'azote apporté par voie foliaire.

- > Pour pénétrer dans la feuille, l'azote contenu dans les engrais foliaires a besoin de traverser la cuticule : une hygrométrie importante est donc indispensable ;
 - > Or, en fin de montaison des blés, les fortes hygrométries ne sont obtenues qu'en conditions de temps pluvieux.
- > Un manque d'eau provoque donc une moindre assimilation de l'azote par la culture quelle que soit la forme de l'engrais apporté. Dans la plupart des situations, un temps sec est aussi défavorable à la valorisation des engrais foliaires qu'à celle des engrais solides.**

Ces engrais ne sont pas mieux valorisés que l'ammonitrate et sont du même niveau d'efficacité :

- > Pour le rendement : 1 kg N/ha apporté par les engrais foliaires équivaut à 1 kg N/ha apporté par l'ammonitrate.
- > Pour la teneur en protéines du grain : une perte significative de 0.4 % a été observée avec les engrais foliaires par rapport à l'ammonitrate (à dose totale identique).
(Source : 13 essais ARVALIS 2001-2014 de comparaisons d'un apport foliaire à dose d'emploi des produits commerciaux et d'un apport au sol sous forme ammonitrate en fin de montaison (40 kgN/ha) à dose totale d'azote identique).

À dose préconisée, les engrais foliaires apportent de 2 à 20 kg N/ha, ils ne peuvent donc pas se substituer à un apport d'ammonitrate qui apporte par exemple 40 kg N/ha.



ARVALIS

En apport de fin montaison, la solution azotée peut brûler les feuilles

VRAI

Pour les apports après deux nœuds, l'azote liquide est moins efficace que les autres formes d'azote. De plus, quand la forme liquide est utilisée, des brûlures sont assez souvent observées sur les dernières feuilles, notamment en cas d'utilisation de buses inadaptées. Ces symptômes sont sans conséquence sur le rendement, pour des apports réalisés avant début épiaison.

POURQUOI OBSERVE-T-ON CES BRÛLURES ?

Les brûlures sont provoquées par une accumulation de sels dans le limbe des feuilles. La concentration étant à saturation, la réaction de la plante se traduit par une nécrose située en général en bout de feuille. Cette nécrose a un aspect complètement différent de celles dues aux phytotoxicités d'herbicides.

QUELS SONT LES FACTEURS AGGRAVANTS ?

| | Plus de brûlures  | Moins de brûlures  |
|-----------------------------|--|---|
| Type de buses | Buses à fente ou à grosses gouttes | Buses trifilet |
| Conditions climatiques | Rosée, vent, forte hygrométrie | Pluie lessivante après application |
| Dose et concentration azote | Solution azotée diluée, forte dose | Faible dose, apports fractionnés |
| Bouillie de pulvérisation | Avec adjuvant ou avec fongicide | |

QUELLES CONSÉQUENCES ONT CES BRÛLURES ?

Les brûlures consécutives aux apports d'azote liquide provoquent une réduction de la surface foliaire et par conséquent de l'activité photosynthétique. Cependant, quelles que soient les situations étudiées (applications de début montaison ou de fin montaison, surfaces nécrosées allant jusqu'à 50 %) aucune perte de rendement due à ces brûlures n'a été mise en évidence dans les différents essais réalisés par Arvalis et ses partenaires.

À noter que dans le cas d'apports tardifs (au-delà du stade gainé écarté), si les épillets sont touchés, des pertes de rendement peuvent être observées.


Des brûlures parfois spectaculaires mais sans conséquences sur le rendement



ARVALIS

Pour en savoir plus :

Perspectives Agricoles - n°234 - avril 1998

Perspectives Agricoles - n°244 - mars 1999

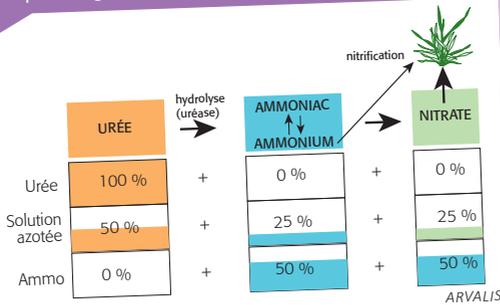
Perspectives Agricoles - n°264 - janvier 2001

Il faut apporter l'urée ou la solution azotée plus tôt que l'ammonitrate car ces formes ont un mode d'action plus lent

FAUX

URÉE ET SOLUTION AZOTÉE : 2 ENGRAIS À DOMINANTE URÉIQUE

Différentes formes d'azote présentes dans les principaux engrais minéraux.



L'urée et la solution azotée contiennent de l'azote sous forme uréique contrairement à l'ammonitrate. Bien qu'une petite partie puisse directement être assimilée par les racines, l'urée doit d'abord être hydrolysée en ammoniac (NH₃) pour être mise pleinement à disposition de la culture. L'hydrolyse de l'urée est effectuée par une enzyme spécifique, l'uréase, produite en abondance par les micro-organismes du sol et les racines.

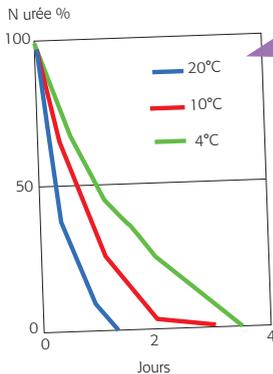
DES CONDITIONS DE TEMPÉRATURES PEU EXIGEANTES

La transformation de l'urée en ammoniac par hydrolyse est dépendante de l'activité de l'uréase.

Le niveau d'activité de l'uréase est rarement limitant, mais il dépend :
 > du contact entre l'urée et l'uréase qui peut être ralentie en conditions sèches ;

> de la température : plus celle-ci est élevée et plus l'hydrolyse est rapide. Cependant, même à température basse, l'hydrolyse reste rapide : 4 jours à 4°C pour 100 % d'hydrolyse (en incubation au laboratoire INRA-COFAZ). En conditions réelles, lors d'un apport d'azote sur blé réalisé début mars à une température de 3.3 °C, seulement 8 jours ont été nécessaires pour l'hydrolyse de la totalité de l'urée (essai INRA COFAZ – sol de limon – Somme).

À 20°C, moins de 2 jours sont nécessaires pour que l'urée se transforme en totalité en ammoniac par hydrolyse. Il faut 4 jours à 4°C.



Temps nécessaire pour la transformation totale de l'urée en ammoniac, en fonction de la température (incubation de sol de limon en laboratoire INRA-COFAZ)

Ne pas avancer les apports

En conditions normales d'humidité du sol, la vitesse d'hydrolyse est toujours rapide. Une dose d'azote apportée sous forme d'urée ou de solution azotée est hydrolysée en 3 à 8 jours maximum dans les conditions les plus défavorables. Il n'est donc pas nécessaire d'avancer la date des apports en fonction de la forme d'engrais azoté.

15 mm de pluie nécessaires pour valoriser un apport d'engrais azoté

VRAI

L'efficacité des engrais azotés épandus à la surface du sol dépend principalement du cumul de pluie après l'apport d'engrais.

L'humidité du sol en surface le jour de l'apport influence peu l'efficacité de l'engrais s'il ne pleut pas après l'épandage.

Après l'apport d'un engrais azoté : 15 mm de pluie suffisent pour mettre l'azote à disposition des racines dans un délai de 15 jours, afin de permettre une utilisation correcte de l'engrais et satisfaire à temps les besoins des plantes.

> Des formes d'engrais plus ou moins sensibles à la volatilisation ammoniacale

Solution azotée : de par sa composition, elle est plus sensible aux pertes par volatilisation. Le pH élevé du sol et le vent, l'absence de pluie peuvent provoquer des pertes importantes (jusqu'à 15-25 % de la dose apportée dans certaines situations).

Ammonitrate : moins sensible aux pertes en l'absence de pluie dans les jours suivant l'apport, il peut être rapidement assimilé en cas de retour des pluies.

➔ Pour maximiser l'efficacité de certaines formes plus sensibles à la volatilisation, le délai entre l'apport et la pluie doit être le plus court possible.

> En pratique :

Piloter selon les prévisions météo pour décider du moment des apports.

Il est recommandé d'apporter la solution azotée en période pluvieuse (petites pluies annoncées dans les 3 jours après l'apport), sinon reporter l'apport dans la mesure du possible.

Expérimentation sous les abris mobiles de la station ARVALIS du Magneraud (17) pour évaluer l'impact de la pluviométrie sur les engrais azotés.



ARVALIS

La rosée suffit-elle à valoriser un apport d'azote ? NON !

Une forte rosée correspond à 0,1 mm. Au mieux cela permet de faire fondre les granulés, mais pas la migration de l'azote vers les racines.

La rosée n'est donc pas suffisante pour valoriser l'engrais.



Il fait plus sec au moment du dernier apport d'azote

FAUX

Analyse fréquentielle sur 20 ans de la probabilité d'avoir des conditions favorables à la valorisation d'un apport d'azote.

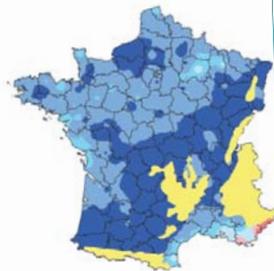
Apport du 11 avril



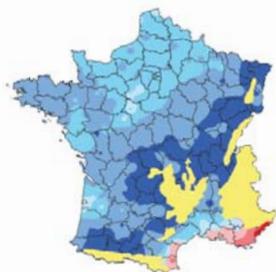
Apport du 21 avril



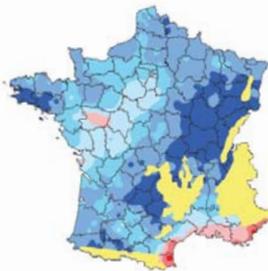
Apport du 1er mai



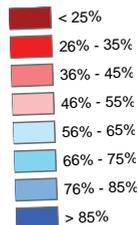
Apport du 11 mai



Apport du 21 mai



% de chance de cumuler 15 mm de pluie sous 15 jours après un apport d'engrais azoté.



Postes météo : METEO-France, SRPV, Terres Inovia, INRA, ARVALIS.

> **En pratique** : L'analyse des données météo sur 20 ans montre que les apports d'engrais réalisés autour du stade Dernière Feuille sont en général bien valorisés par la pluie.

> **Quel niveau de risque pour les apports en début de cycle?** Le cumul de pluviométrie au mois de mars peut être faible. Afin de limiter les risques de mauvaise efficacité, il est nécessaire de mettre en œuvre des pratiques d'apports adaptées : anticiper ou repousser de quelques jours les applications si une pluie est annoncée, fractionner l'apport pour réduire les risques, opter pour une forme d'engrais limitant les pertes, etc...

Jusqu'à Dernière Feuille Étalée, l'azote apporté est valorisé en quintaux et en protéines



IL EST POSSIBLE DE CORRIGER UNE CARENCE EN AZOTE JUSQU'À LA FIN DE LA MONTAISON DES CÉRÉALES

L'efficacité de l'azote est meilleure lorsque l'engrais est apporté durant la montée à épi plutôt qu'au tallage. À dose totale identique, comparé à une fertilisation apportée uniquement en sortie d'hiver, le bénéfice d'un dernier apport entre 2 noeuds et dernière feuille étalée est en moyenne de +2 à +3 q/ha et +0.2 à +0.3 % de protéines.

> Fractionner les apports pour coller au plus près des besoins

Apporter de l'azote au cours de la montaison permet d'accompagner la croissance de la culture, en phase avec ses besoins. En effet, ceux-ci sont soutenus durant toute la montaison. L'efficacité de l'engrais azoté est maximale à cette période.

> Jusqu'à gonflement, on gagne à la fois en rendement et en protéines

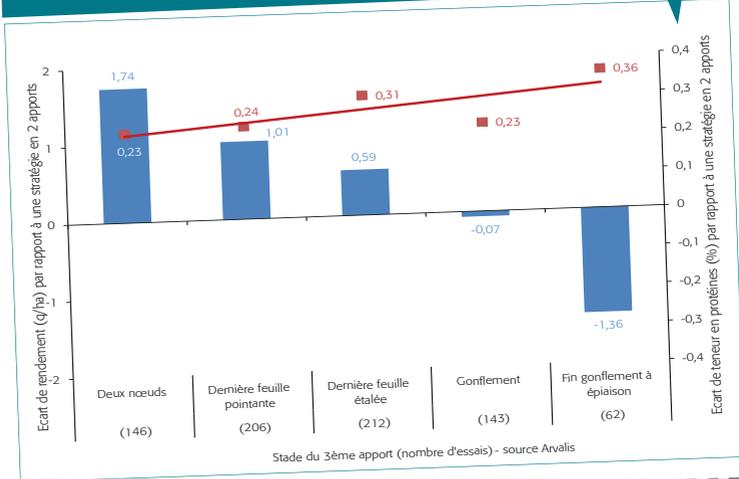
Nos essais révèlent la capacité de la céréale à valoriser un apport d'azote jusqu'à gonflement (lorsque l'épi commence à sortir de la gaine).

> A partir de l'épiaison, seule la protéine du grain augmente

Entre épiaison et floraison, la réponse à un apport d'engrais se traduit par une augmentation de la teneur en protéines des grains, mais le rendement ne progresse plus.

Après épiaison, en conditions favorables, la culture continue d'absorber de l'azote. À floraison, les composantes de rendement impactées par l'azote- nombre d'épis et nombre de grains- sont fixées. À dose totale identique, un dernier apport d'azote réalisé à partir de l'épiaison ne permettra pas de rattraper la perte de rendement en cas de carence avérée. Il ne contribuera qu'à augmenter la teneur en protéines du grain.

Enjeu du positionnement du 3^{ème} apport sur le rendement (q/ha) par rapport à une stratégie en 2 apports - réseau ARVALIS et partenaires.



Si mon pH est trop faible, mon azote sera mal valorisé

VRAI

EN pH ACIDE, LE FONCTIONNEMENT DES RACINES EST AFFECTÉ

L'abaissement du pH dans les sols acides contribue à rendre de plus en plus soluble certains composés minéraux contenant de l'aluminium. Cet élément devient toxique lorsque le pH_{eau} est inférieur à 5.5.

La toxicité de l'aluminium provoque une forte réduction de la croissance des racines. Les racines deviennent épaissies et peu ramifiées (photo 1). Elles ne sont plus capables d'assurer les alimentations minérale et hydrique des plantes.

> Les apports d'engrais azotés sont donc mal valorisés.

Lorsque le pH_{eau} est inférieur à 5.5, les plantes présentent des symptômes de carence en azote et phosphore (faible développement, pointe des vieilles feuilles jaunies, rougies ou desséchées) liés à une mauvaise assimilation de ces éléments (photo 2).

La préconisation de pH_{eau} optimal se situe entre 6 et 6.5 et favorise une bonne valorisation de l'azote.



Photo 1 : $\text{pH}_{\text{eau}} < 5.5$, les racines sont épaissies et présentent peu de radicelles



Photo 2 : $\text{pH}_{\text{eau}} < 5.5$, les plantes présentent des symptômes de carence en azote et phosphore (jaunissement-rougissement des vieilles feuilles).



L'ACTIVITÉ DES BACTÉRIES NITRIFIANTES EST PÉNALISÉE PAR L'ACIDITÉ

Les bactéries nitrifiantes (*Nitrosomonas* et *Nitrobacter*) permettent la réalisation du processus de nitrification qui se traduit par la transformation d'ammonium en nitrates selon la réaction :

$\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$. Un pH optimal et la présence d'oxygène dans le sol (conditions aérobies) conditionnent l'activité de ces bactéries. A l'inverse, une acidité du sol trop marquée (pH_{eau} inférieur à 5.5) inhibe leur activité et limitera ainsi le processus de nitrification.

Les microorganismes sont influencés par les modifications induites par les apports d'amendements minéraux basiques. Ainsi, la minéralisation de l'azote organique est momentanément accrue après un tel apport, d'autant plus que le sol est acide, a une teneur en matière organique élevée et que la dose d'amendement est élevée. Ce phénomène peut contribuer à accroître la fourniture d'azote par le sol de 20 à 60 kg N/ha l'année qui suit un apport d'amendement basique, mais reste difficile à prévoir.





ARVALIS

Institut du végétal

3, rue Joseph et Marie Hackin 75116 Paris
Tél. : 01 44 31 10 00 - Fax : 01 44 31 10 10
www.arvalisinstitutduvegetal.fr