

Raisonnement de la fertilisation azotée du maïs fourrage : un levier pour améliorer sa production et sa qualité

B. Soënen¹, A. Bouthier²

Le maïs fourrage est une culture essentielle dans nombre d'élevages. Sa fertilisation est un facteur de production décisif. Pour l'optimiser, de nombreux essais ont été conduits, dont les résultats sont ici synthétisés.

RÉSUMÉ

Le raisonnement de la fertilisation azotée du maïs est indispensable pour optimiser sa production en fourrage tout en limitant les risques de lixiviation de nitrate. Cette synthèse pluriannuelle d'essais confirme l'importance de l'effet de la fertilisation azotée sur la production et la teneur en MAT du maïs fourrage. Les teneurs en MAT sont en moyenne plus faibles qu'il y a une vingtaine d'années, en lien avec l'évolution variétale. Le mode de calcul des besoins a priori en azote est présenté. Le fractionnement de la dose d'azote cherchera à répondre au mieux à la cinétique d'absorption de l'azote par le maïs en prenant en compte la minéralisation de la matière organique du sol, qui est importante en fin de cycle. Les besoins en azote sont maximaux entre les stades 8 et 12 feuilles.

SUMMARY

Forage maize production and quality can be improved by a more reasoned approach to nitrogen fertilisation

Integrated nitrogen fertilisation is crucial for optimising forage maize production while simultaneously limiting the risks of nitrate leaching. This study summarises the results of a large number of experimental trials carried out over almost two decades. Its findings confirm that nitrogen fertilisation has a major effect on forage maize production and crude protein (CP) levels. Forage maize has lower mean CP values than it did 20 years ago, a trend that is linked to a change in the varieties bred. A method for estimating the plant's nitrogen needs is described. Splitting the dose of nitrogen fertiliser to be applied allows farmers to efficiently match the crop's nitrogen absorption kinetics, which is important at the end of its growth cycle. The need for nitrogen is greatest between the 8-leaf and 12-leaf stages.

La fertilisation azotée est l'un des premiers facteurs de production du maïs fourrage, aussi bien en quantité (tonnes de matière sèche produites) qu'en qualité (matière azotée totale du fourrage). Il convient donc d'apporter une attention toute particulière au raisonnement de la fertilisation azotée du maïs pour optimiser sa production en fourrage tout en limitant les risques de lixiviation des nitrates.

Cela passe par une démarche en deux temps : calcul des besoins en azote de la culture *a priori*, puis fractionnement de la dose prévisionnelle calculée en un, deux, voire trois passages en fonction des reliquats d'azote minéral du sol au semis et de la quantité totale à apporter. Afin d'aider à l'optimisation de la fertilisation du maïs, une synthèse pluriannuelle des essais de fertilisation azotée du maïs fourrage a été réalisée dont les résultats font l'objet de cet article.

1. La fertilisation azotée, un facteur de production du maïs fourrage de premier ordre

Cette synthèse des essais de fertilisation azotée du maïs fourrage a permis de regrouper **109 courbes de réponse à l'azote**, issues d'essais Arvalis - Institut du Végétal sur la période 1983-2012. Dans chacun des essais, plusieurs modalités étaient mises en place avec des doses croissantes d'azote apporté, constituant une courbe de réponse à l'azote (exemple en figure 2). La **dose optimale** pour le rendement en fourrage peut ainsi être déterminée grâce à une analyse statistique de la courbe de réponse à l'azote : c'est la dose qui **permet d'atteindre le rendement optimal**, égal par convention à 97 % du rendement maximal (LIMAUX, 1999). Des indices de rendement et de la

AUTEURS

1 : ARVALIS - Institut du végétal, Baziège (Haute-Garonne) ; b.soenen@arvalisinstitutduvegetal.fr

2 : ARVALIS - Institut du végétal, Le Magneraud (Charente-Maritime) ; a.bouthier@arvalisinstitutduvegetal.fr

MOTS CLÉS : Fertilisation azotée, fertilisation raisonnée, maïs fourrage, nutrition azotée, nutrition de la plante, production fourragère, valeur azotée.

KEY-WORDS : Forage maize, forage production, nitrogen fertilisation, nitrogen nutrition, nitrogen value, plant nutrition, rational fertilisation.

RÉFÉRENCE DE L'ARTICLE : Soenen B., Bouthier A. (2015) : "Raisonnement de la fertilisation azotée du maïs fourrage : un levier pour améliorer sa production et sa qualité", *Fourrages*, 224, 253-256.

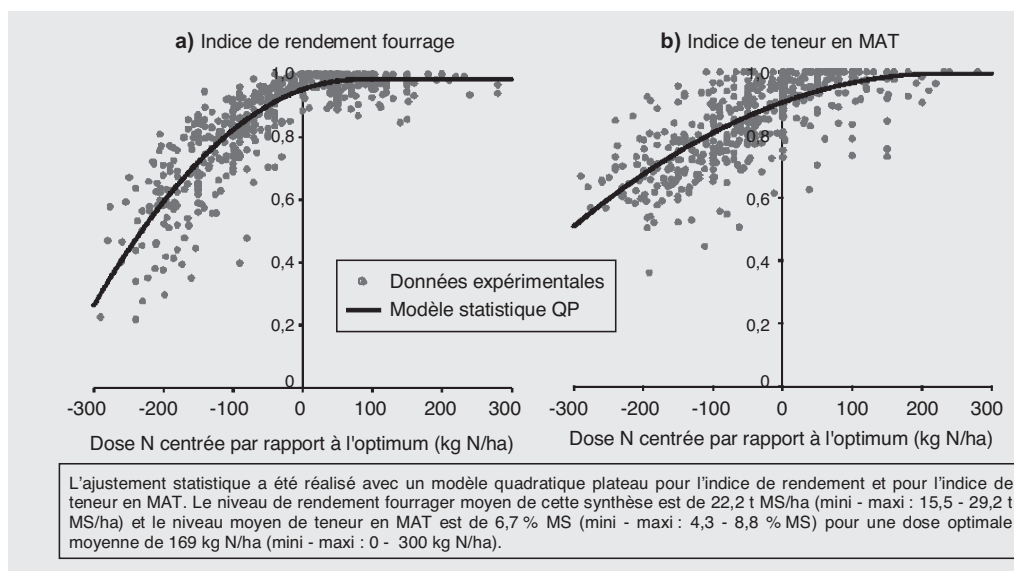


FIGURE 1 : Réponse du rendement en fourrage (a) et de la teneur en MAT (b) en fonction de la dose totale d'azote en écart à la dose optimale (109 essais dans toute la France, entre 1983 et 2012).

FIGURE 1 : How forage maize (a) yield and (b) CP content respond to relative fertilizer dose size (actual dose - optimal dose). Data from 109 experimental trials carried out throughout France from 1983 to 2012.

teneur en MAT ont ensuite été calculés pour chacune des doses de la manière suivante : rendement ou teneur en MAT à la dose considérée divisé par le rendement ou la teneur en MAT maximum de l'essai.

L'analyse de la relation entre l'indice de rendement et la dose totale d'azote apporté (figure 1a) montre que la fertilisation azotée du maïs fourrage est un facteur de production très important. Par exemple, dans les essais de cette synthèse, une dose totale inférieure de 50 kg N/ha à la dose optimale entraîne une perte moyenne de 5 % de rendement, perte qui augmente rapidement lorsqu'on s'éloigne de l'optimum.

Il existe aussi **une relation entre l'indice de teneur en MAT et le niveau de fertilisation azotée** du maïs fourrage (figure 1b), preuve que la fertilisation azotée est aussi un levier agronomique intéressant pour augmenter la teneur en MAT. Contrairement au rendement, cette relation ne plafonne pas à la dose optimale mais continue de croître pour des doses supra-optimales. Autrement dit, quand l'augmentation du niveau de fertilisation azotée du maïs fourrage ne permet plus de gagner du rendement, la plante valorise tout de même une partie de ce complément d'azote par un surplus d'absorption azotée à biomasse équivalente, augmentant ainsi la teneur en MAT.

Il a été constaté que **les teneurs en MAT moyennes sont en tendance plus faibles qu'il y a une vingtaine d'années**, ce qui s'explique notamment par une amélioration génétique permettant une augmentation de la productivité fourragère associée à des pratiques de fertilisation plus modérées (BAUMONT *et al.*, 2009). Ce phénomène de dilution, plus de biomasse produite pour un même niveau de fertilisation azotée entraînant une baisse de la teneur en MAT, peut être corrigé par une adaptation du niveau de fertilisation azotée. En effet, il a été démontré précédemment que la teneur en MAT était positivement corrélée avec le niveau de fertilisation azotée (exemple figure 2b). Cependant, il n'est pas conseillé de dépasser la dose optimale pour le rendement en vue d'enrichir le fourrage en MAT, car il est plus efficace de compléter la ration.

2. Les besoins en N du maïs fourrage

Les besoins en azote du maïs fourrage **peuvent se calculer à partir de l'équation de l'azote critique du maïs** (PLÉNÉT et LEMAIRE, 1999). Cette équation [E1] représente la relation entre la concentration minimale en azote des parties aériennes d'un maïs (%Nc en %) pour produire le maximum de biomasse aérienne (QMSpa en t MS/ha) :

$$[E1] \text{ Si } QMSpa < 1 \text{ t MS/ha, alors } \%Nc = 3,40 \\ \text{ Si } 1 \text{ t MS/ha} \leq QMSpa \leq 22 \text{ t MS/ha,} \\ \text{ alors } \%Nc = 3,40 \times QMSpa^{0,37}$$

A partir de cette relation, il est alors possible de déterminer la **quantité d'azote absorbé critique** par les parties aériennes (QNc, en kg N/ha) en fonction de la production de biomasse sèche aérienne (QMSpa, en t MS/ha), selon l'équation [E2]. D'après PLÉNÉT et LEMAIRE, cette équation est valable sur la période d'absorption azotée de la culture, c'est-à-dire de la levée au stade floraison + 30-40 jours soit environ le stade ensilage, et jusqu'à une production de biomasse de 24 t MS/ha.

$$[E2] \text{ } QNc = 34 \times QMSpa^{0,63}$$

En posant l'hypothèse qu'au stade ensilage l'azote dans la rhizosphère représente 15 % de l'azote absorbé par la plante entière, d'après les travaux sur le partitionnement des assimilats chez les céréales de SAVARY et WILLOQUET (2012), les **besoins en azote plante entière théoriques** d'un maïs (QNbesoinspe, en kg N/ha) peuvent être estimés en fonction de son rendement en fourrage (RDTfour, en t MS/ha) :

$$[E3] \text{ } QNbesoinspe = 40 \times RDTfour^{0,63}$$

Rendement du maïs (t MS/ha)	Besoins en azote (kg N/t MS/ha)
[0 - 14[14
[14 - 18[13
[18 - ...[12

TABLEAU 1 : **Besoins unitaires en azote du maïs fourrage** (Arvalis - Institut du végétal, 2012).

TABLE 1 : **Nitrogen required to produce one ton of dry matter per hectare** (Arvalis - Institut du végétal, 2012).

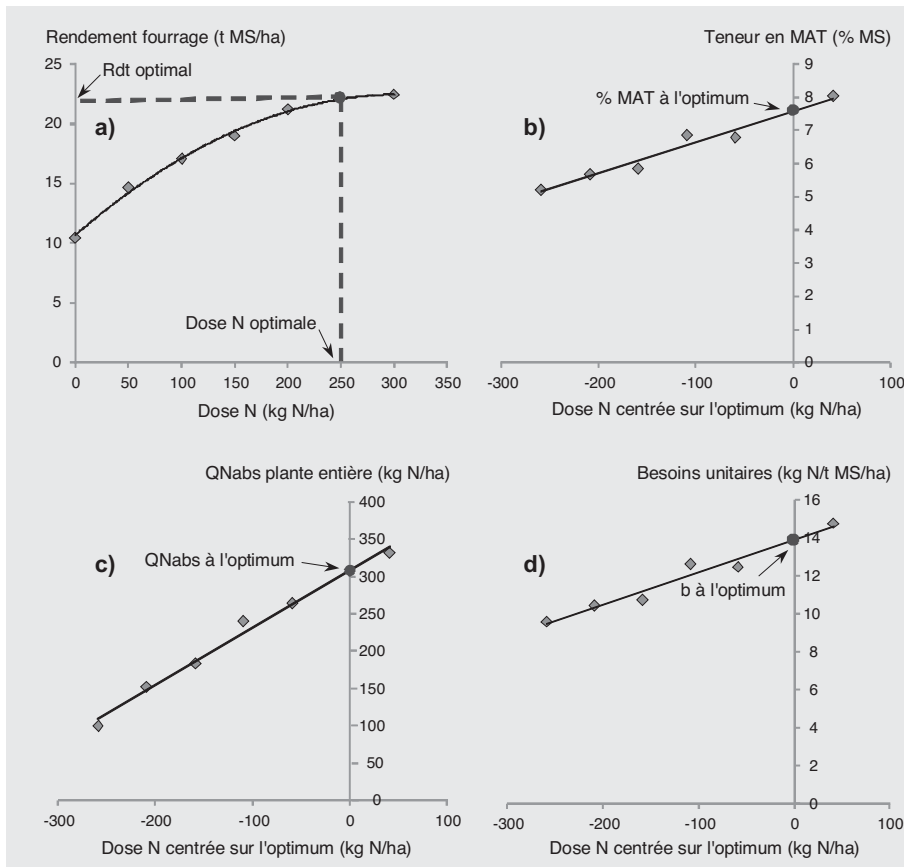


FIGURE 2 : Exemple du calcul du rendement (a), de la teneur en MAT (b), de l'azote absorbé (c) et des besoins unitaires (d) à la dose optimale sur un essai de courbe de réponse à l'azote (Montans - Tarn, 1999).

FIGURE 2 : Nitrogen response curve trial showing how estimates of (a) yield; (b) CP content; (c) absorbed nitrogen; and (d) per unit DM requirements relate to the optimal dose of fertilizer (Montans - Tarn, 1999).

Dans un souci de simplification, cette fonction continue a été mise en classes et exprimée en **besoins azotés unitaires du maïs** en fonction de son rendement en fourrage (tableau 1). Ces références publiées par Arvalis - Institut du Végétal, via le Comifer en 2012, sont utilisées lorsqu'il n'y a pas de références locales disponibles.

Il convient de valider ces besoins théoriques en azote du maïs fourrage (aussi appelés « b ») avec des données expérimentales, issues de courbes de réponse à l'azote. Il est ainsi possible de déterminer la quantité d'azote absorbé par le maïs fourrage à la dose optimale pour le rendement (figures 2a et 2c). Pour les doses totales sub-optimales, les besoins unitaires en azote pour produire une tonne de matière sèche augmentent avec le niveau de fertilisation (figure 2d). Pour pouvoir être comparés avec les besoins théoriques calculés à partir de la courbe de dilution de l'azote critique, il faut déterminer les besoins unitaires à la dose optimale.

La synthèse des essais Arvalis - Institut du Végétal réalisée ici rassemble 66 courbes de réponse sur maïs entre 1983 et 2014 avec des mesures d'azote absorbé, permettant ainsi d'estimer les besoins en azote à l'optimum. Comme cela a été démontré précédemment, il existe une relation entre la quantité d'azote absorbé par la plante entière (estimé à partir de l'azote absorbé par les parties aériennes divisé par 0,85) et le niveau de rendement en fourrage (figure 3). Cependant, comme cela a pu être mis en évidence sur d'autres espèces comme le blé, il existe une certaine variabilité autour de cette relation. Etant donné le nombre important de contextes pédoclimatiques et de variétés présents dans la synthèse, les

facteurs génétiques et environnementaux peuvent expliquer cette variabilité.

Si l'on compare les besoins en azote obtenus par expérimentation et **les besoins en azote calculés à partir de la mise en classe de l'équation de QNc** (tableau 1), le biais est de -6,3 kg N/ha soit seulement 2 % alors que la

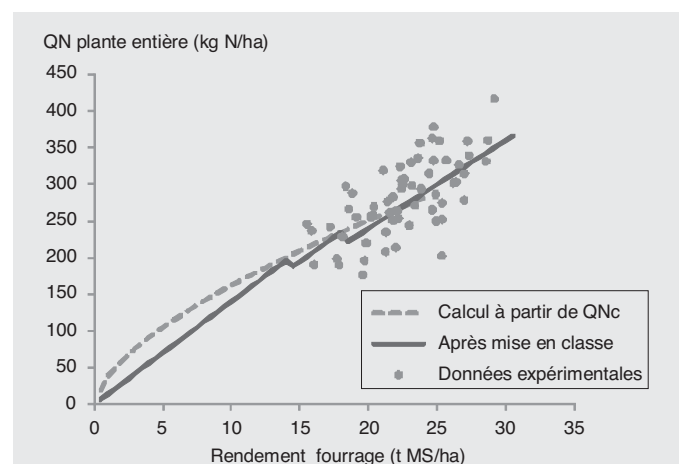


FIGURE 3 : Comparaison des besoins en azote du maïs fourrage, à partir du calcul théorique de l'azote critique (QNc), après mise en classe, et mesurés par expérimentation (66 essais dans toute la France, entre 1983 et 2012).

FIGURE 3 : Comparison of forage maize nitrogen requirements as estimated from experimental data, theory-based calculations of the critical level of nitrogen needed (QNc), and simplified theory-based calculations using ordinal classes (66 experimental trials carried out throughout France from 1983 to 2012).

RMSE (erreur quadratique moyenne, ou *Root Mean Squared Error*) est de 38,9 kg N/ha soit 14 %, liée à la variabilité génétique et environnementale. Le faible biais permet donc de **valider l'utilisation des valeurs proposées** par Arvalis - Institut du végétal en 2012.

Dans cette synthèse, il n'existe pas d'essais dont l'optimum était inférieur à 15 t MS/ha ; or les rendements en parcelle réalisés par les agriculteurs peuvent être inférieurs à 15 t MS/ha. Cela peut s'expliquer par le fait que les expérimentations sont souvent placées dans des contextes favorables, que le maïs y est conduit à l'optimum, afin qu'il n'y ait pas de facteur limitant, et que les besoins en azote sont déterminés à l'optimum de fertilisation azotée.

3. La cinétique d'absorption du maïs fourrage et le fractionnement des apports azotés

Lorsque la dose d'azote prévisionnelle a été calculée à partir des besoins en azote du maïs fourrage, un fractionnement *a priori* doit être choisi dans le but de rechercher l'adéquation entre la mise à disposition des engrais azotés et la cinétique d'absorption de l'azote du maïs fourrage. Les besoins précoces en azote d'un maïs sont faibles ; en effet, au stade 10 feuilles celui-ci n'aura absorbé que 50 à 60 kg N/ha (figure 4). A partir du stade 8-10 feuilles, l'absorption s'accélère et devient maximale autour de la floraison du maïs. L'absorption post-floraison sur cette espèce est loin d'être négligeable mais correspond à une période de forte minéralisation de l'azote humifié du sol (matière organique).

Pour les **premiers apports, entre le semis et 4 feuilles**, il faut donc **raisonner la dose à partir du niveau de reliquat en azote minéral** du sol selon l'équation [E4].

$$[E4] \text{ Dose}_{\text{semis} - 4F} = 60 - \text{Reliquats N}$$

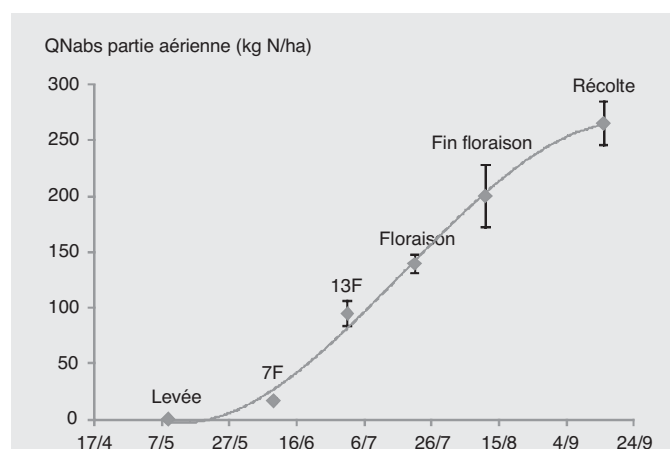


FIGURE 4 : Exemple de cinétique d'absorption azotée d'un maïs fourrage (Le Rheu, 2009).

FIGURE 4 : Depiction of nitrogen absorption kinetics in forage maize (Le Rheu, 2009).

Le solde de la dose prévisionnelle est à apporter entre le stade 8 feuilles, qui correspond au début de la phase d'absorption rapide de l'azote par le maïs, **et le stade 12 feuilles**, stade à partir duquel il devient difficile de rentrer dans le maïs en tracteur. Il a été montré sur maïs grain qu'en l'absence d'apport précoce il est conseillé d'apporter l'azote au stade 8 feuilles.

Des apports tardifs, entre 15 feuilles et floraison, **sont possibles** sur maïs car il absorbe 20 à 40 % de son azote sur la période post-floraison. Un apport à ce stade ne permet pas de déplaçonner le rendement maïs **permet de corriger une carence modérée** (DESIGNES, 2000). Ainsi, la quantité d'azote reportée pour cet apport tardif ne doit pas excéder 40-50 kg N/ha, au risque de créer une carence non corrigeable. **L'utilisation des outils de pilotage est fortement recommandée** pour décider de l'opportunité de cet apport (Jubil® ou le N-Tester® sont par exemple validés sur maïs). De plus, l'agriculteur doit être équipé pour pouvoir apporter de l'azote à ce stade compte tenu du gabarit des plantes : il existe aujourd'hui deux techniques, les enjambeurs ou la fertirrigation (ou fertigation, fertilisation par l'eau d'irrigation), mais elles sont peu utilisées.

Conclusions

Le raisonnement de la fertilisation azotée est un levier d'importance pour améliorer la production et la qualité (MAT) du maïs fourrage. L'estimation des besoins en azote de la culture nécessite l'utilisation des besoins unitaires (« b ») en azote du maïs fourrage. Ceux-ci ont été validés pour des rendements supérieurs à 15 t MS/ha. Il conviendrait de travailler cette variable pour des rendements plus faibles. Une fois la dose prévisionnelle calculée, il est nécessaire d'apporter l'azote au plus près des besoins de la plante soit pas plus de 50 kg N/ha avant le stade 4 feuilles, puis le reste entre 8 et 12 feuilles.

Intervention présentée aux Journées de l'A.F.P.F.,
"La fertilité des sols dans les systèmes fourragers",
les 8 et 9 avril 2015

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ARVALIS - Institut du végétal (2012) : *Besoins d'azote du maïs (grain et fourrage)*, Site Internet du Comifer : http://www.comifer.asso.fr/images/stories/pdf/Tableaux/besoin_mas_60712.pdf
- BAUMONT R., AUFRÈRE J., MESCHY F. (2009) : "La valeur alimentaire des fourrages : rôle des pratiques de culture, de récolte et de conservation", *Fourrages*, 198, 153-173.
- DESIGNES P. (2000) : "Optimiser les apports d'azote sur maïs", *Perspectives Agricoles*, 254, 36-37.
- LIMAUX F. (1999) : *Modélisation des besoins du blé en azote, de la fourniture du sol et de l'utilisation de l'engrais. Application au raisonnement de la fertilisation en Lorraine*, Travaux Universitaires - Thèse nouveau doctorat, INP de Lorraine.
- PLÉNÉT D., LEMAIRE G. (1999) : "Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Determination of critical N concentration", *Plant and Soil*, 216, 65-82.
- SAVARY S., WILLOCQUET L. (2012) : "Simulation Modeling in Botanical Epidemiology and Crop Loss Analysis. Chapter 7: Crop Growth Modeling - Introducing GENECROP as a Framework", *APS Journal Abstracts*.



Association Française pour la Production Fourragère

La revue *Fourrages*

est éditée par l'Association Française pour la Production Fourragère

www.afpf-asso.org



AFPF – Centre Inra – Bât 9 – RD 10 – 78026 Versailles Cedex – France

Tél. : +33.01.30.21.99.59 – Fax : +33.01.30.83.34.49 – Mail : afpf.versailles@gmail.com

Association Française pour la Production Fourragère