

Raisonnement de la fertilisation azotée du maïs fourrage :

un levier pour améliorer sa production et sa qualité

B. Soënen¹, A. Bouthier²

1 : ARVALIS - Institut du végétal, Baziège (31) ; b.soenen@arvalisinstitutduvegetal.fr

2 : ARVALIS - Institut du végétal, Le Magneraud (17) ; a.bouthier@arvalisinstitutduvegetal.fr

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.

Cela passe par une démarche en deux temps : calcul des besoins en azote de la culture *a priori*, ensuite fractionnement de la dose prévisionnelle calculée en un, deux voire trois passages en fonction des reliquats en azote minéral du sol au semis dans un premier temps et des modalités d'apport dans un second temps. Un ajustement de la dose en cours de végétation est possible avec l'utilisation d'outils de pilotage, mais cela nécessite de pouvoir intervenir à des stades tardifs (après le stade 15 feuilles).

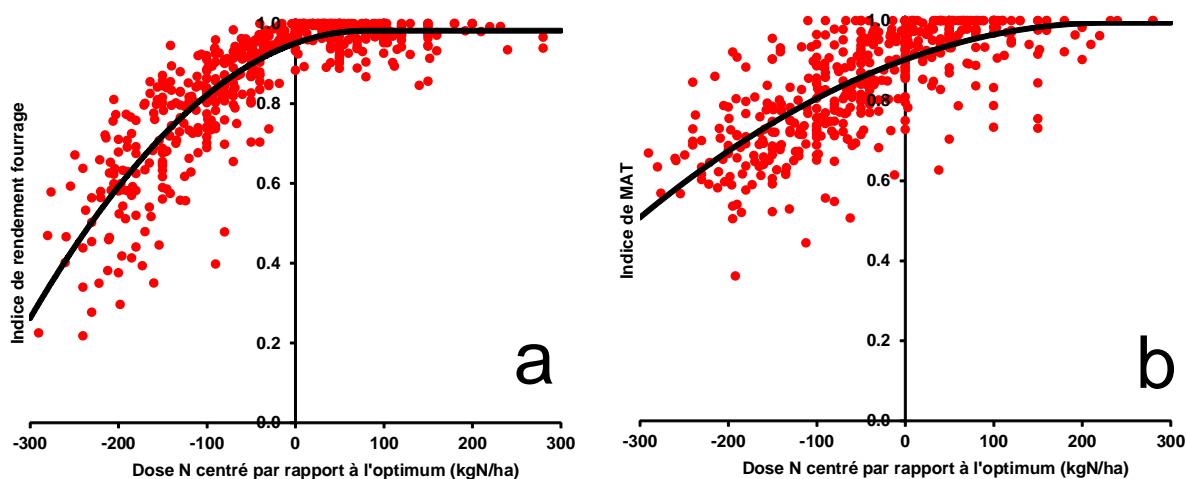
1. La fertilisation azotée, un facteur de production du maïs fourrage de premier ordre

Une synthèse pluriannuelle des essais de fertilisation azotée du maïs fourrage a été réalisée et a permis de regrouper 109 essais Arvalis-Institut du Végétal sur la période 1983-2012. Dans chacun de ces essais, la dose optimale pour le rendement en fourrage a été déterminée grâce à une analyse statistique de la courbe de réponse à l'azote : la dose optimale correspond à la dose d'azote permettant d'atteindre le rendement optimal, qui est égal par convention à 97 % du rendement maximal. Un indice de rendement et de MAT a ensuite été calculé pour chacune des doses, de la manière suivante : rendement ou MAT à la dose considérée divisé par le rendement ou la MAT maximum de l'essai.

D'après l'analyse de la relation entre l'indice de rendement et la dose totale d'azote apporté (Figure 1a), 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 10 % de rendement.

Il existe aussi une relation entre l'indice de 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 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 ce complément d'azote par un surplus d'absorption azotée à biomasse équivalente, augmentant ainsi la MAT.

Figure 1 : Réponse du rendement en fourrage (a) et de la MAT (b) en fonction de la dose totale d'azote en écart à la dose optimale (109 essais toute France, entre 1983 et 2012). L'ajustement statistique a été réalisé avec un modèle quadratique plateau pour l'indice de rendement et pour l'indice de MAT. Le niveau de rendement fourrage moyen de cette synthèse est de 22,2 tMS/ha (minimum de 15,5 tMS/ha et maximum de 29,2 t MS/ha) et le niveau moyen de MAT est de 6,7 %MS (minimum de 4,3 %MS et maximum de 8,8 %MS) pour une dose optimale moyenne de 169 kgN/ha (minimum de 0 kgN/ha et maximum de 300 kgN/ha).



2. Les besoins en azote du maïs fourrage

Les besoins en azote du maïs fourrage peuvent se calculer à partir de l'équation de l'azote critique du maïs (PLENET 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 (QMS_{pa} en t MS/ha), quel que soit le stade:

$$[E1] \quad \text{Si } QMS_{pa} < 1 \text{ t MS/ha} \text{ alors } \%Nc = 3,40$$

$$\text{Si } 1 \text{ t MS/ha} \leq QMS_{pa} \leq 22 \text{ t MS/ha} \text{ alors } \%Nc = 3,40 \times QMS_{pa}^{-0,37}$$

A partir de cette relation, il est alors possible de déterminer la quantité d'azote absorbé critique par les parties aériennes (QN_c, en kg N/ha) en fonction de la production de biomasse sèche aérienne (QMS_{pa}, en t MS/ha), selon l'équation [E2]. D'après PLENET 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.

$$[E2] \quad QN_c = 34 \times QMS_{pa}^{0,63}$$

En posant l'hypothèse qu'au stade ensilage l'azote dans la rhizosphère représente 15 % de l'azote absorbé par la plante entière, estimation 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 (QN_{besoins_{pe}}, en kg N/ha) peuvent être estimés en fonction de son rendement en fourrage (Rdt_{fourrage}, en t MS/ha) :

$$[E3] \quad QN_{besoins_{pe}} = 40 \times Rdt_{fourrage}^{0,63}$$

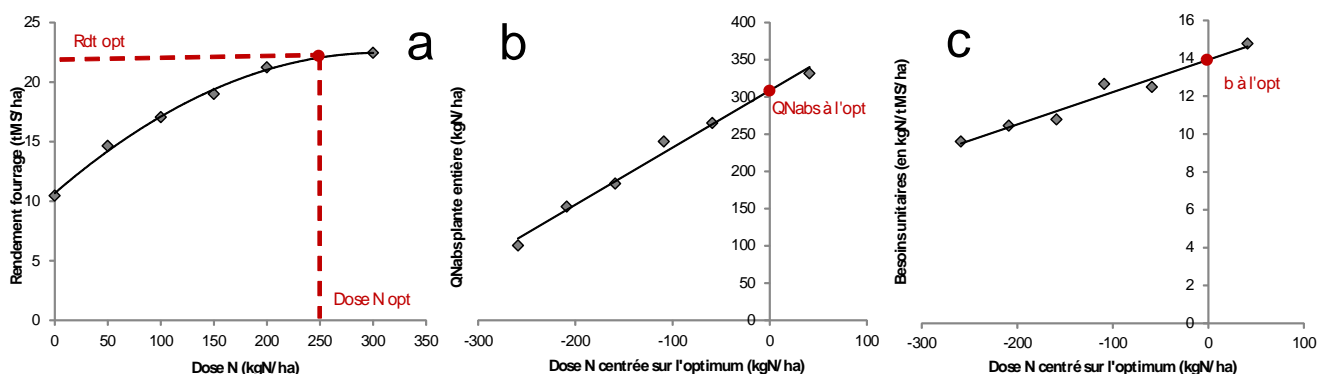
Dans un souci de simplification, cette fonction continue a été mise en classes et exprimée en besoins azotés unitaires du maïs en fonction de son rendement en fourrage (Tableau 1). Ces références publiées par Arvalis-Institut du Végétal, *via* le COMIFER en 2012, sont utilisées lorsqu'il n'y a pas de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

Tableau 1 : Besoins unitaires en azote du maïs fourrage (ARVALIS-Institut du végétal, 2012).

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

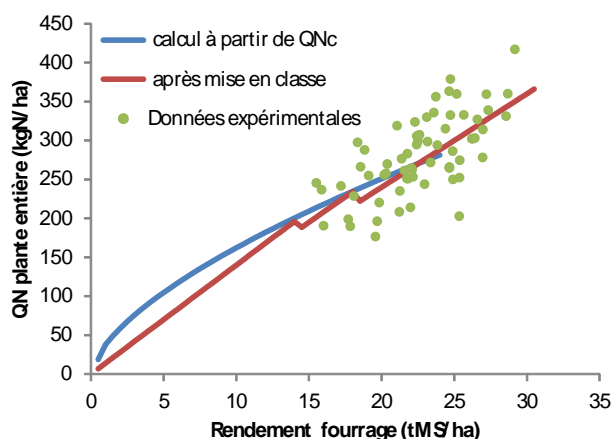
Il convient de valider ces besoins en azote théoriques du maïs fourrage avec des données expérimentales, issues de courbes de réponses à l'azote. Il est ainsi possible de déterminer la quantité d'azote absorbé par le maïs fourrage à la dose optimale pour le rendement (Figure 2a et b). La dose optimale correspond à la dose d'azote permettant d'atteindre le rendement optimal, qui est égal par convention à 97 % du rendement maximal de la courbe de réponse, si celle-ci plafonne. Pour les doses totales sub-optimales, les besoins unitaires en azote pour produire une tonne de matière sèche sont croissants avec le niveau de fertilisation (Figure 2c). Pour pouvoir être comparé avec les « b » théoriques calculés à partir de la courbe de dilution de l'azote critique, il faut déterminer les besoins unitaires à la dose optimale.

Figure 2 : Exemple du calcul du rendement (a) de l'azote absorbé (b) et des besoins unitaires (c) à la dose optimale sur un essai courbe de réponse à l'azote (Montans - 81, 1999). Le rendement est modélisé par une courbe de réponse en quadratique plateau. L'azote absorbé et les besoins unitaires sont modélisés par une courbe de réponse linéaire.



Une synthèse des essais Arvalis-Institut du Végétal a été réalisée, rassemblant ainsi 66 courbes de réponses 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 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.

Figure 3 : Comparaison entre les 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 toute France, entre 1983 et 2012).



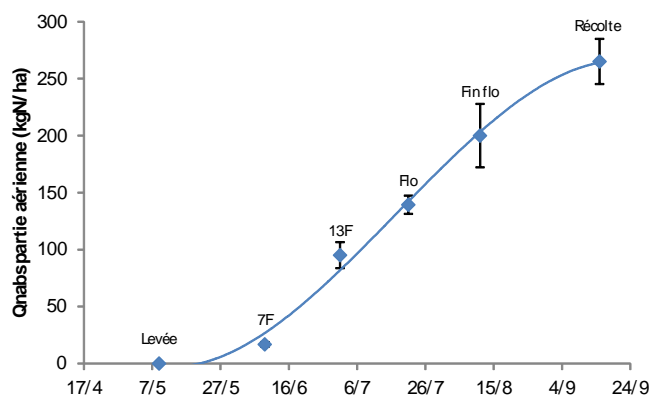
Si l'on compare les besoins en azote obtenus par expérimentation et les besoins en azote calculés à partir de la mise en classe de l'équation de QNC (Tableau 2), le biais est de - 6,3 kg N/ha soit seulement 2 % alors que la RMSE (erreur quadratique moyenne, ou *Root Mean Squared Error*) est de 38,9 kg 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 ces situations existent. Il convient donc de compléter cette synthèse avec des sites où le potentiel de production est moindre.

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.

Figure 4 : Exemple d'une cinétique d'absorption azotée d'un maïs (Le Rheu, 2009).



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].

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

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 que, s'il n'y a pas eu d'apport précoce, il est conseillé d'apporter l'azote à 8 feuilles.

Des apports tardifs, entre 15 feuilles et floraison, sont possibles sur maïs car il absorbe 20 à 40 % de l'azote sur la période post-floraison. Un apport à ce stade ne permet pas de dé plafonner le rendement mais permet de corriger une carence modérée (Desvignes, 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). Cependant, 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 fertigation, 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 en azote du maïs fourrage, ou « b ». 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 4 feuilles, puis le reste entre 8 et 12 feuilles.

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
- DESIGNES P., 2000. Optimiser les apports d'azote sur maïs. Perspectives Agricoles n°254 (p36-37)
- 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., WILLOQUET L., 2012. Simulation Modeling in Botanical Epidemiology and Crop Loss Analysis. Chapter 7: Crop Growth Modeling - Introducing GENECROP as a Framework. APS Journal Abstracts.