Les outils de pilotage intégral : l'avenir du raisonnement de la fertilisation azotée pour les céréales

Contexte et enjeux

Le premier enjeu de la fertilisation est d'assurer la production agricole en quantité et en qualité, tout en préservant l'environnement. L'azote est un élément indispensable à la croissance des plantes. Cependant qu'elle soit organique ou minérale, la fertilisation azotée, en plus d'avoir un coût non négligeable pour l'agriculteur, a des impacts négatifs sur l'environnement (pollution des eaux, acidification des sols, volatilisation, émission de gaz à effet de serre, etc..). Afin de les limiter et de raisonner cette fertilisation, un bilan prévisionnel d'azote est réalisé. Il consiste à comptabiliser l'apport total d'azote par culture sur la base d'un équilibre entre les besoins de la culture et les différentes fournitures d'azote dont elle peut bénéficier (méthode bilan du COMIFER). Cette méthode a été intégrée dans le cadre réglementaire de la Directive Nitrates (articles R.211-75 à R.211-84 du code de l'environnement). Cette méthode prévisionnelle est toutefois régulièrement questionnée au regard de la difficulté d'estimer différents critères (principalement l'objectif de rendement, et la non prise en compte des conditions climatiques de l'année sur les fournitures d'azote par le sol) au moment du calcul du bilan.

Depuis les années 95, des outils de pilotage des apports en azote en cours de culture ont été mis au point. Selon les outils, ils se basent sur l'analyse de jus en bas de tige ou encore sur des mesures de la teneur en chlorophylle par transmittance ou réflectance. Leur utilisation permet, en complément du bilan prévisionnel d'azote, d'ajuster les apports d'azote au besoin réels des plantes, en fonction du contexte agro climatique du printemps, et d'améliorer ainsi l'efficience de l'azote appliqué et de réduire les pertes.

Cependant, ces outils ne donnent pas entière satisfaction car ils se basent sur des hypothèses qui ne sont pas systématiquement vérifiées (hypothèse sur l'objectif de rendement, hypothèse que l'apport précédent est entièrement valorisé lors du diagnostic, non prise en compte de l'interaction eau-N).

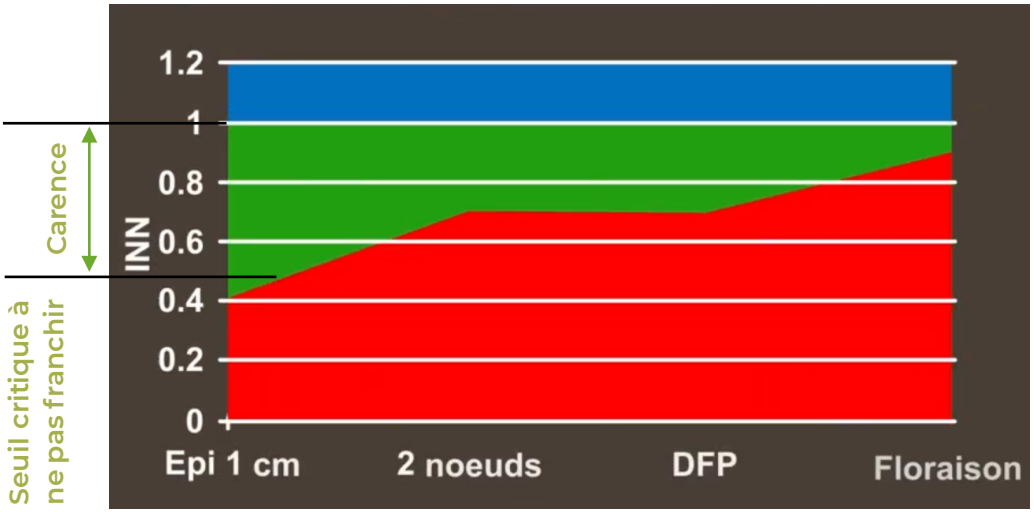
Au milieu des années 2000, des études ont montré qu'il était possible d'utiliser l'Indice de Nutrition Azotée (INN) pour piloter la fertilisation tout en tolérant des carences en azote sans que cela soit préjudiciable pour le rendement. De nouvelles perspectives se sont ouvertes sur une fertilisation azotée plus raisonnée.

Indice de Nutrition Azotée et Outils de pilotage intégral (OPI)

Les outils de pilotage intégral de l'azote se basent sur l'entretien de carences « tolérables » par la plante. Des observations, connues de longues dates, ont montré qu'une carence azotée sur le blé tendre n'était pas forcément préjudiciable au rendement et au taux de protéines et augmente l'absorption et la métabolisation de l'azote par la plante. La base du

raisonnement, qui a fait l'objet d'une thèse[1], consiste pour l'agriculteur à entretenir des carences « acceptables » en azote, surtout en début de cycle et à maximiser ainsi l'efficience de l'apport en azote tout en limitant les pertes avec un objectif de production quantitatif et qualitatif non dégradé.

Concrètement, l'état de nutrition de la plante est évalué grâce à l'indice de nutrition azoté (INN), calculé à partir de l'indice de chlorophylle. Celui-ci doit être mesuré, soit de manière directe grâce à des appareils de type « N-tester » (Appi-N), soit inférée par un modèle (CHN). L'apport d'azote se fait pour entretenir un INN inférieur à 1 (carence) mais supérieur à un INN critique, qui évolue en fonction du stade de développement du blé (voir graphique 1). L'épandage d'azote est ainsi considérablement réduit par rapport à la méthode du bilan. La mesure du reliquat en sortie d'hiver n'est plus nécessaire.



Graphique 1 : Trajectoire INN pour OPI - Chambre régionale Grand Est

L'INRAE et Arvalis travaillent sur cette nouvelle génération d'outils de raisonnement de la fertilisation azotée : Appi'N (INRAE) et, CHN-Conduite (Arvalis). Les deux outils ont été expérimentés dans des exploitations de 2017 à 2023 notamment dans le cadre du projet SOLINAZO[2] et, dans le cas d'Appi-N, grâce à deux réseaux d'expérimentation en Grand Est et Centre-Val-de-Loire. Les premiers résultats sont encourageants. Pour le moment ces outils ont été développés sur blé et CHN-conduite est en cours de paramétrage sur maïs, orge d'hiver et de printemps. Ils sont détaillés dans les parties suivantes.

CHN-conduite (Arvalis)

CHN-conduite est un modèle de culture dynamique qui a été développé par Arvalis et a pour objectif d'être utilisé comme outil d'aide à la décision en cours de campagne. Il possède trois compartiments, le sol, la plante et l'atmosphère, et est connecté aux bases de données d'Arvalis pour le sol (500 types de sol avec une description fine de de chacun des horizons), la météo, les fertilisants azotés et les variétés (modèles phénologiques d'Arvalis et 400 variétés de maïs, 350 de blé tendre et 50 de blé dur, mis à jour chaque année).

---

[1] Ravier, C. (2017). Conception innovante d'une méthode de fertilisation azotée : Articulation entre diagnostic des usages, ateliers participatifs et modélisation [These de doctorat, Université Paris-Saclay (ComUE)]. https://www.theses.fr/2017SACLA005

[2] Solution innovante pour une gestion optimisée de l'azote dans les systèmes de cultures

Il répond à des besoins de modélisation des flux de carbone (C), d'eau (H) et d'azote (N) au sein des systèmes de culture.

Pour le flux carbone, ce modèle permet de simuler l'évolution du stock de carbone organique du sol sur le long terme.

Pour le flux d'eau, ce modèle estime la transpiration maximale de la plante, évalue la pluie efficace, calcul l'évaporation et la transpiration réelle couche par couche du compartiment évaporant, estime la quantité d'eau extraite par le système racinaire, simule les transferts d'eau dans le profil du sol.

Pour les flux d'azote, quatre formes d'azote sont prises en compte : l'azote organique, l'urée, l'ammoniac et le nitrate. Chaque jour, le modèle actualise les stocks d'azote dans chaque tranche centimétrique du sol, en fonction :

- Des apports d'engrais azotés minéraux ou organiques renseignés par l'utilisateur,
- Des apports atmosphériques et des éventuels apports d'azote via l'eau d'irrigation,
- Des fournitures du sol (résidus culture précédente, culture intermédiaire, produits résiduaires organiques, retournement de prairies),
- De la fixation symbiotique des légumineuses,
- Des pertes aux dépens de l'engrais,
- Des pertes liées au fonctionnement hydriques des sols,
- Des flux entre tranches,
- Du prélèvement de l'azote par la plante.

Dans l'approche « CHN-conduite », l'INN est suivi avec le modèle CHN et permet de déterminer l'opportunité d'un apport d'azote. Ce modèle a été intégré dans le système d'information de l'institut afin de pouvoir bénéficier des modèles préexistants (ex : modèles phénologiques), du calcul fréquentiel automatisé, et de la connexion aux bases de données techniques internes (sols, variétés, engrais, météo).

Depuis 2017, un réseau expérimental associant une cinquantaine de partenaires (Chambres d'agriculture, coopératives, négoces, CETA…), animé par ARVALIS, vise à adapter l'approche « CHN – conduite » dans tous les contextes français de production de blé dur et de blé tendre. Les résultats de ces essais sont présentés ici.

Désormais, cette approche est opérationnelle sur blé tendre dans une large gamme de situations agropédoclimatiques et sera lancée commercialement dès cette campagne dans un produit FARMSTAR.

Pour soutenir l'amélioration continue de l'outil et élargir son domaine de validité, des expérimentations se poursuivent en parcelles d'agriculteurs sur blé. Il est possible d'intégrer ce réseau en prenant contact avec les ingénieurs régionaux référents d'Arvalis.

Appi'N (INRAE)

Tout comme CHN-conduite, le modèle Appi'N repose sur un raisonnement dynamique, depuis la sortie d'hiver jusqu'à la floraison grâce au suivi de l'indicateur INN avec une trajectoire seuil à ne pas franchir sous peine de perte de rendement. Cette méthode aussi ne fixe pas d'objectif de rendement et ne s'appuie pas sur la mesure du reliquat de sortie d'hiver.

Ce modèle se base sur deux piliers :

- Accepter et favoriser une période de carence, non préjudiciable au rendement et à la teneur en protéines, en début de cycle (le 1er apport peut être retardé jusqu'à 20 jours).
- Déclencher les apports lorsque les conditions d'humidité sont optimales, c'est-à-dire en définissant une notion de « jour favorable » à un apport : pas d'apport depuis plus de 15 jours et conditions d'humidité dans les 3 jours suivant l'apport, qui permettent de maximiser la valorisation de l'azote.

Les abaques régionaux définissent les doses d'azote à apporter en fonction de l'INN et de la date du contrôle à partir d'une analyse fréquentielle du climat local des 20 dernières années. Ils sont donc basés sur les stratégies viables les plus fréquentes sur ces 20 années testées et permettent de définir les doses d'azote recommandées. A l'heure actuelle ces abaques sont disponibles dans les régions Centre Val de Loire, Normandie et Grand-Est. Un travail est en cours pour la région Pays de la Loire.

Concrètement, pour déterminer l'INN deux méthodes sont possibles :

- Créer une zone étalon sur-fertilisée sur la parcelle. Après avoir réalisé 3*30 mesures avec l'appareil N-Tester dans la parcelle pilotée et 3*30 mesures dans la zone étalon, calculer le N-Tester relatif :

$$\textbf{N-Tester relatif} = \frac{\text{Valeur mesurée dans la bande}}{\text{Valeur mesurée dans l'étalon sur-fertilisé}}.$$

  Cette méthode réduit la marge d'erreur.
  Grâce à un tableau de correspondance il est possible d'interpréter ce rapport vis-à-vis d'un INN. L'abaque recommande ensuite de réaliser ou non un apport avec la dose optimale.

- L'INRAE a développé une application qui permet de calculer directement l'INN et d'estimer les besoins en azote de la culture avec préconisation d'apport.

Lors de tests sur les parcelles situées en Centre-Val de Loire auxquelles ont participé deux coopératives, Appi-N, a permis une économie d'azote de l'ordre de 16 kg N/ha, sans avoir d'impact significatif sur la marge partielle à l'hectare, ni sur le taux de protéines du blé. Le 1er apport a été retardé d'une vingtaine de jours en moyenne.

Cette économie d'azote a eu un impact conséquent sur la performance environnementale des parcelles. Dans le détail, les émissions de gaz à effet de serre ont été réduites de 627 kg CO_2eq/ha soit 8,6 kg CO_2eq/q récoltés.

D'autres expérimentations ont été menées de 2019 à 2021 par la Chambre d'Agriculture de la région Grand Est[3]. Le 1er apport a été retardé de 15 à 25 jours, et comme pour les tests en Centre Val-de-Loire, le nombre d'apports a été réduit. Les émissions de GES en kg CO_2eq./ha, (la fabrication des engrais, pertes à l'épandage, émissions liées aux passages de tracteur), sont réduites de 39% pour la modalité « méthode APPI-N » comparativement à la modalité « méthode du bilan ».

[3] LEBRETON Pierre et al. (2021). Pilotage intégral de la fertilisation azotée du blé dans les régions centre-val de loire et grand est : Plus d'efficience pour moins de pertes - Lien

Pour ce qui est des économies d'azote, elles sont de 25 unités au total, sans différence de rendement, ni de taux de protéines. Cela peut s'expliquer par le CAU (coefficient d'utilisation de l'azote) amélioré par la « méthode APPI-N » avec une valeur moyenne de 74% contre 59% pour la « méthode du bilan » soit une réduction des pertes moyenne de 36 kg N/ha.

Enfin, le blé carencé résiste mieux aux maladies (oïdium, septoriose) et à la verse, ce qui a induit une baisse de la consommation de produits phytopharmaceutiques.

Pour aller plus loin, les vidéos suivantes présentent plus en détail la méthode Appi'N :

- https://youtu.be/VjF7CQadpho?si=xC80-L4Ki8GfkrkM
- https://youtu.be/pIat8tCEw8o?si=VUoPwKyJyndipomh
- https://youtu.be/PIakoZ0Torg?si=98f9s5bzxV9fLejb
- https://youtu.be/Q0S9hcmNPg8?si=A9UXj-wUx5eJ8yy_

Des freins restent à lever

Plusieurs freins restent à lever pour développer les outils de pilotage intégral :

- **Sur la maturité technique** : pour le moment, les moyens de connaître l'INN sont restreints. Pour Appi-N, par exemple, il faut pincer les feuilles d'au moins 30 individus avec un « N-Tester » tous les quinze jours, ce qui nécessite de la main d'œuvre et peut être compliqué en début de cycle. L'INRAE travaille à rendre l'estimation de l'INN possible par mesure satellitaire comme CHN. Les abaques permettant d'en tirer l'apport d'azote correspondant sont en cours de rédaction au niveau régional.
- **Sur l'adaptation de la réglementation** : la méthode du pilotage intégral permettrait de s'émanciper de la méthode bilan et de l'estimation du reliquat en sortie d'hivers.
- **Sur la perception de l'outil par les agriculteurs** : le pilotage intégral est un changement de paradigme concernant le raisonnement de la fertilisation. Les carences du blé peuvent changer temporairement son apparence (apparitions de tâches, …). Les apports sont plus tardifs (premier apport décalé d'une vingtaine de jours en moyenne), ce qui est contre-intuitif pour l'agriculteur. Le pilotage intégral exige de nouveaux repères et de nouvelles pratiques qui engendre de nouvelles réflexions et de la formation des utilisateurs.

Perspectives

Les coopératives possèdent des moyens d'actions sur les freins exposés ci-dessus :

- Grâce aux coopératives et à leurs adhérents, il est possible d'accélérer la pertinence technique de ces outils en multipliant des expérimentations et de massifier ensuite ces innovations techniques afin de réduire l'empreinte environnementale de l'agriculture tout en maintenant les capacités à produire.
- En tant qu'interlocuteur des pouvoirs publics, La Coopération Agricole peut solliciter des dérogations à la réglementation, comme le montre le projet Innov'Azote, qui

permet de s'émanciper des obligations de moyens en matière de fertilisation en l'échange du respect d'objectifs de résultats sur la qualité des cours d'eau.

- Enfin, le réseau de conseillers des coopératives peut permettre de lever certaines barrières psychologiques à l'adoption de cette nouvelle méthode.

Vous êtes intéressés par ces outils ?

N'hésitez pas à contacter :

- **Pour Appi'N (INRAE) :**

  Raphaël Paut : Raphael.paut@inrae.fr et
  Marie-Hélène Jeuffroy : marie-helene.jeuffroy@inrae.fr

- **Pour CHN conduite (Arvalis)**

  Pour participer à la phase expérimentale : **François Taulemesse** F.TAULEMESSE@arvalis.fr

- **Pour découvrir le modèle au FARMSTAR (Airbus)**

  intelligence-serviceclient-agrienv@airbus.com

Avec la contribution financière du compte d'affectation spéciale développement agricole et rural CASDAR

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA SOUVERAINETÉ ALIMENTAIRE
Liberté
Égalité
Fraternité

LA COOPÉRATION AGRICOLE
MÉTIERS DU GRAIN