

PILOTAGE DE LA FUMURE AZOTEE DU BLE PAR
ANALYSES DE PLANTE

LA METHODE JUBIL®

G. THEVENET
Directeur Scientifique d'ARVALIS – Institut du végétal
Correspondant national de l'Académie d'Agriculture

Séance du 26 mars 2003

La question du pilotage de la fertilisation azotée des cultures s'est réellement posée après la 2^{ème} guerre mondiale, date à partir de laquelle se généralise l'usage des engrais azotés de synthèse, même si la production « d'azote agricole » a commencé en France en 1925 à l'usine de Toulouse.

Auparavant, la fertilisation azotée minérale se faisait essentiellement à partir du nitrate du Chili (400 000 tonnes importées en France en 1929, pratiquement plus d'importation après guerre).

La définition précise de la dose d'azote à apporter sur blé a -quant à elle – toujours constitué un défi pour les agronomes puisque correspondant à un optimum en deçà duquel le rendement est fortement pénalisé et au-delà duquel des problèmes apparaissent (risque de verse et de maladies dans une première période, risque de pollution des eaux par les nitrates de nos jours).

Les agronomes ont donc, par différentes méthodes, cherché à raisonner le calcul de la dose d'azote minéral à apporter.

En 1932, Demolon indiquait que « ... la fumure azotée (est) un problème d'agronomie générale où la nature du milieu et la nature de la plante sont les principaux facteurs ».

En 1947, Garrau signalait que « la fumure azotée doit être équilibrée et adaptée au sol et à la culture envisagée ».

Enfin, en 1967, Gros posait le problème en ces termes : « Elle (la fumure azotée) sera apportée au blé en fonction de ses besoins aux divers stades de son cycle végétatif, et compte tenu de ce que le sol est supposé fournir par la minéralisation de ses réserves organiques.... Trouver le juste milieu serait chose facile si l'engrais minéral contribuait seul à la nutrition azotée du blé ; mais le blé se nourrit en grande partie des réserves du sol, dont la minéralisation résulte d'une action microbienne dont le rythme est imprévisible, puisqu'il dépend étroitement des conditions climatiques de l'année (chaleur, pluie). Il restera donc toujours une inconnue : la quantité d'azote que le sol fournira au blé ».

BREF HISTORIQUE DES DIFFERENTES METHODES

1. La méthode des courbes de réponse : une approche empirique

Cette méthode consiste à construire à partir d'essais aux champs, la courbe de réponse (en terme de rendement) de la culture du blé à des doses croissantes d'engrais.

Mais, « la mise au point des recommandations en matière de fertilisation azotée des céréales se heurte à l'extrême variabilité des courbes de réponse du rendement à la fumure. Cette variabilité traduit celle des multiples conditions de milieu qui interviennent tant sur les besoins en azote de la culture que sur la dynamique de l'azote dans le sol. Dès lors, il est illusoire d'espérer obtenir des références fiables sur les fumures optimales par la méthode empirique consistant à établir des courbes de réponse dans les situations supposées typiques » (Sebillotte, 1978).

C'est pour éviter les écueils de la démarche des courbes de réponse à l'azote qu'Hébert (1969) adapta une démarche opposée, considérant que le rôle de l'engrais est de compléter la fourniture du sol pour satisfaire les besoins des plantes.

Dès 1969, il posa l'égalité suivante, dont on se sert encore à l'heure actuelle comme base de raisonnement :

Besoins en azote du blé = Dose d'engrais + Fournitures du sol

Et connue sous le terme de « méthode du bilan prévisionnel ».

2. la méthode du bilan = un concept opérationnel

2.1. Principe

Le raisonnement de la fumure azotée par la méthode du bilan prévisionnel (Hébert, 1969 – Rémy, 1974 – Rémy et Hébert, 1977) consiste à **équilibrer les besoins totaux** en azote

des plantes d'un peuplement végétal par un stock d'azote disponible constitué par les fournitures du sol, des déjections animales et de l'engrais.

Besoins du blé + Azote restant en terre à la récolte = Reliquat d'azote minéral en fin d'hiver + Azote minéralisé des résidus organiques récents + Azote minéralisé du sol + Engrais.

La prévision de la fumure azotée repose sur un bilan de l'azote minéral du sol (uniquement les formes nitrique et ammoniacale), réalisé sur la profondeur d'enracinement de la culture.

L'ouverture et la fermeture du bilan prévisionnel se situent dans les périodes de relative stabilité des quantités d'azote minéral dans le sol : à la sortie de l'hiver et à la récolte.

Il « suffit » alors d'équilibrer, sur le cycle cultural, les entrées et sorties d'azote minéral.

2.2. Mise en œuvre

La mise en œuvre suppose une connaissance aussi précise que possible de la valeur des différents paramètres de l'équation.

Des normes (besoins = 3 kg azote/quintal,...), des estimations (valeurs obtenues à partir de réseaux d'essais, rendement espéré,...), des mesures (dosage du reliquat d'azote dans le sol par analyse, ...), des modèles, permettent d'accéder à ces valeurs.

2.3. Limites

La méthode du bilan prévisionnel correspond à un modèle simplifié du fonctionnement du système « sol – peuplement végétal » et suppose que plusieurs hypothèses soient satisfaites :

- L'azote doit être facteur limitant du rendement.
- L'équation est purement additive (pas d'interaction entre les différents termes du bilan).
- L'engrais est considéré comme disponible en totalité.
- Les besoins sont constants (3 kg d'azote / quintal de grain produit ; ce qui correspond à l'azote des parties aériennes multiplié par 1,25 pour tenir compte de l'azote contenu dans les racines – Coïc – 1956 -, quels que soient le rendement et la variété).

2.4. Conclusion

La méthode du bilan prévisionnel, développée depuis plus de 25 ans, a constitué un outil d'aide à la décision pour le conseil de fumure azotée. Elle constitue encore aujourd'hui la base de la fixation des doses d'engrais. Mais son application pratique par l'agriculteur rencontre deux difficultés :

- Sa faible précision dans certains milieux ou pour certains systèmes de culture.
- L'absence de possibilité d'adaptation objective de la dose d'engrais apportée au regard d'une modification – en cours de végétation – du potentiel de rendement initialement prévu.

C'est entre autres pour pallier ces deux difficultés que les agronomes se sont tournés en particulier vers les indicateurs « plantes ».

3. Les indicateurs plantes : des indices de caractérisation de la nutrition azotée

La finalité de ces indicateurs peut-être :

- soit d'établir un diagnostic de carence en azote : on recherche un seuil de teneur au dessous duquel la carence en azote limite la croissance (Routchenko, 1967 – Papastylianou, 1982-)

- soit de faire un pronostic à court terme (Lecompt, 1959) : il s'agit de déterminer une teneur seuil en dessous de laquelle la réalisation d'un apport d'engrais à court terme (quelques jours) devient souhaitable sous peine de diminution de rendement
- soit de faire un pronostic à long terme (Justes, 1993) : il s'agit alors de déterminer un niveau minimal de teneur en nitrates permettant d'affirmer que la nutrition azotée sera satisfaisante pendant la période plus ou moins longue qui suit la mesure...

Plusieurs types d'indicateurs ont été utilisés. Nous reprendrons la classification proposée par Justes (1993).

3.1. Indices de stress en azote fondés sur la vitesse de croissance

Selon Greenwood et col. (1965), un indice de stress en azote correspond à une estimation quantitative de l'intensité d'un déficit instantané d'azote dans la plante ou pour une population végétale. En règle générale, ces indices sont bien adaptés à des conditions contrôlées de culture et permettent de mettre en évidence une carence temporaire en azote très vite après que l'absorption soit ralentie, mais sont peu adaptés à la pratique.

3.2. Indices de stress ou de statut azoté fondés sur la mesure de l'activité nitrate réductase

Quelques auteurs ont tenté d'utiliser la mesure de l'activité nitrate réductase (ANR) afin de juger du statut azoté d'une culture ou pour prédire le rendement en grains. La signification de cette mesure reste encore floue.

3.3. Indices de carence en azote fondés sur la biomasse ou le rendement

Certains auteurs caractérisent le niveau de satisfaction de la nutrition azotée par rapport à l'accumulation de biomasse aérienne (Gonzalez-Montaner, 1987) ou au rendement final en grain (Papastylianou, 1982).

Ce type de diagnostic ne peut être réalisé qu'à posteriori, donc une fois la carence installée, ce qui limite les possibilités d'application pour faire un diagnostic.

3.4. Indices de nutrition azotée fondés sur la teneur en azote total des parties aériennes

3.4.1. Le diagnostic foliaire

Le diagnostic foliaire (Lagate et Maume, 1929) visait à doser la teneur en éléments minéraux pour estimer l'état de nutrition minérale des plantes.

Le principal problème, en particulier pour l'azote, est la diminution de la teneur en azote de la plante entière, au fur et à mesure de son développement (Jonard et Odent, 1967).

3.4.2. Le rapport de la teneur en azote total à une teneur de référence

3.4.2.1. Relation entre croissance et teneur en azote d'une population végétale cultivée

Salette et Lemaire (1981) assimilent la diminution de la teneur en azote de la plante entière au fur et à mesure de sa croissance, c'est à dire en fonction de la matière sèche élaborée, à une « loi de dilution de l'azote » de la forme $N\% = \alpha \times MS (-\beta)$ avec

- $N\%$ = teneur en azote des parties aériennes (%N)
- α = coefficient potentiel de teneur en azote
- MS = matière sèche produite en t / ha
- β = coefficient de dilution

L'équation proposée au départ pour des peuplements mono-spécifiques de graminées fourragères a été validée pour l'ensemble des espèces végétales herbacées cultivées.

3.4.2.2. Courbe critique de la teneur en azote en fonction de la matière sèche

Lemaire *et al.* (1990) et Greenwood *et al.* (1990) ont mis en évidence qu'il existait une courbe critique reliant la croissance et la teneur en azote, - courbe en deçà de laquelle l'azote est facteur limitant de la croissance -, pour les graminées fourragères.

Justes (1993) a calculé la valeur des paramètres pour un peuplement de blé d'hiver à savoir :

$N\% = 5,32 \times MS^{-0,436}$ pour des biomasses aériennes comprises entre 1,55 t/ha et 12 t/ha.

3.4.2.3. Indices de nutrition azotée calculés à partir de la courbe critique

3.4.2.3.1. Concentration relative en azote

Angus et Moncur (1985) proposent de quantifier le niveau de nutrition azotée par le calcul de la concentration relative en azote (RNC)

$$RNC = \frac{(N\% \text{ mesurée} - N\% \text{ minimale})}{(N\% \text{ maximale} - N\% \text{ minimale})}$$

3.4.2.3.2. Indice de nutrition azotée

Lemaire et col. (1989) proposent d'utiliser un indice de nutrition azotée qui permettrait de quantifier le niveau de nutrition azotée d'un peuplement de graminées fourragères, reprenant l'idée de Agren (1985) et Greenwood (1981). Le calcul de l'indice de nutrition azotée (INN) correspond au rapport de la teneur en azote mesurée sur la teneur optimale, avec teneur en azote optimale $N\% = \alpha \times MS^{-\beta}$

Courbe de teneur critique en azote du blé tendre
(JUSTES *et al.*, 1994)

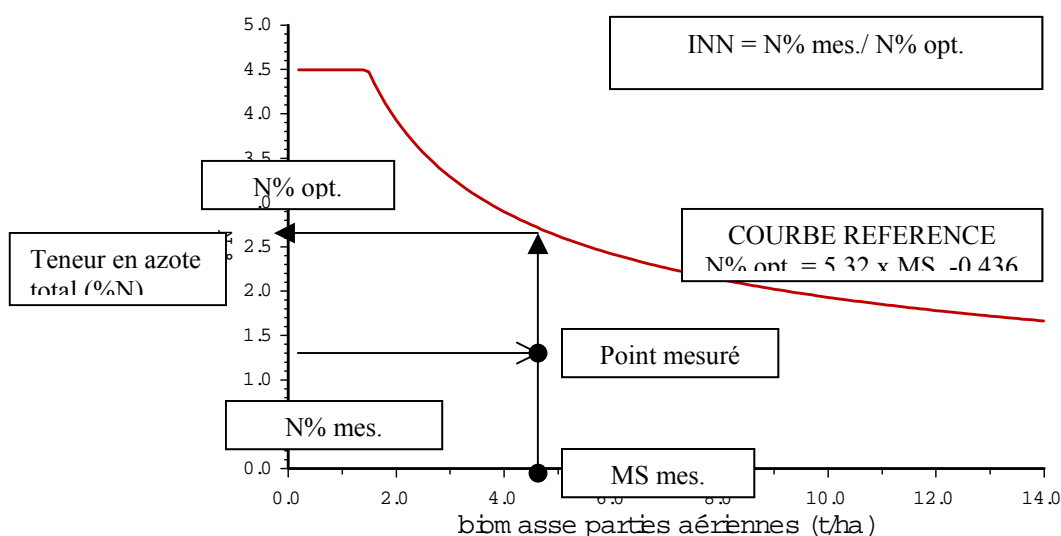


Figure 1

Cet INN constitue un outil de diagnostic de l'état de nutrition azotée de la culture.

LA METHODE JUBIL® : UN OUTIL OPERATIONNEL

1. Principe

La méthode JUBIL® - marque co-déposée INRA-ITCF – utilise comme son nom l'indique - la mesure de la teneur en nitrate du jus de base de tiges de blé (JU) en complément à la méthode du bilan prévisionnel (BIL). Elle est apparue en 1994-1995. Son lancement officiel est intervenu le 15 février 1996.

Elle vise à gérer la nécessité d'un éventuel 3^{ème} apport d'azote au sein d'une dose totale minimum calculée par la méthode du bilan prévisionnel.

Elle est mise en œuvre en 4 temps :

- Calcul de la dose d'engrais X par la méthode du bilan prévisionnel
- Application d'une dose d'engrais X-40 kg N/ha correspondant au cas de fourniture potentielle d'azote minéral du sol
- Suivi de la teneur en nitrate du jus de base de tige : utilisation de l'indicateur nitrate au cours de la montaison (stade Feekes 6 à 8 inclus) pour contrôler la nutrition azotée de la population de blé
- Dès que la teneur en nitrate descend en dessous du seuil d'intervention, décision et réalisation d'un troisième apport (mis en réserve à l'étape 2).

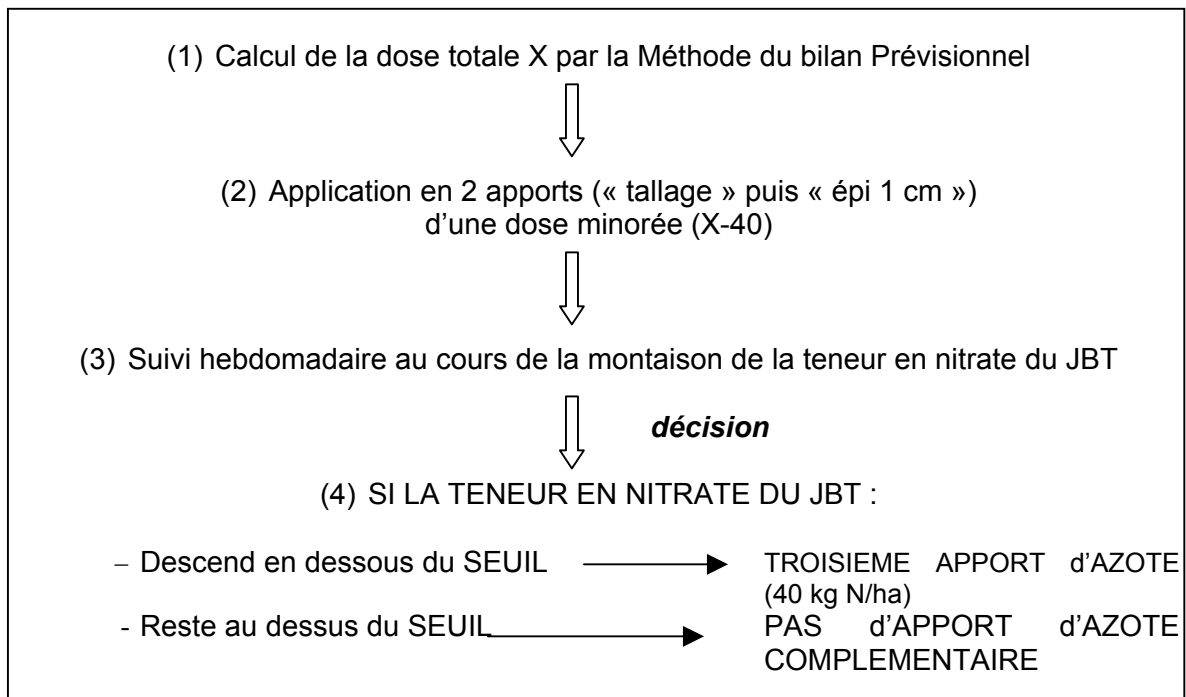
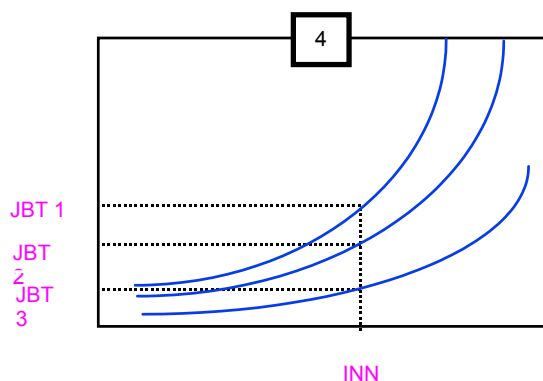
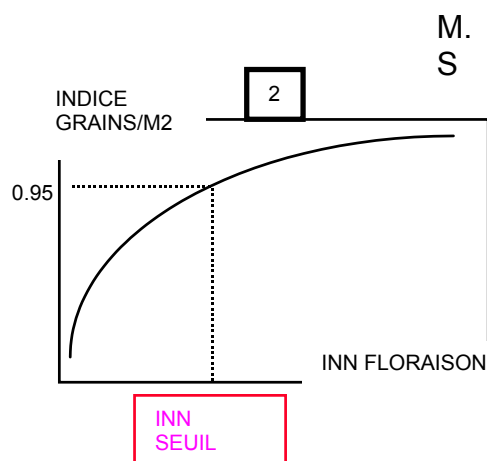
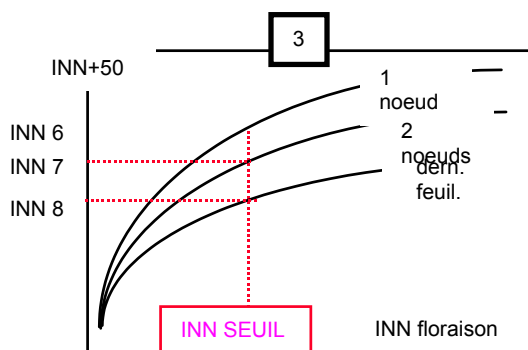
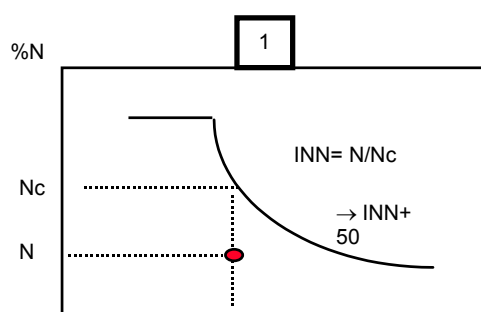


Figure 2 – Principe de la méthode « JUBIL » utilisée pour gérer le troisième apport d'azote

2. Calage des seuils d'intervention

Celui-ci se fait en deux temps :

- Tout d'abord définition du niveau d'indice de nutrition azotée (soit le degré de déficit d'absorption d'azote) susceptible d'entraîner une diminution significative du rendement (et plus particulièrement du nombre de grains / m²).
- Ensuite détermination, à partir de la relation entre l'INN et l'indicateur nitrate, de la teneur en nitrate du jus de base de tige définissant le seuil d'intervention pour l'apport d'engrais et correspondant à l'INN minimal nécessaire pour optimiser le nombre de grains / m².



CALAGE DES SEUILS D'INTERPRETATION

3. Bilan et limite

Mise en œuvre sur 300 000 ha en 1997 pour atteindre 500 000 Ha en 2002, la méthode JUBIL® a permis chaque année de gagner en moyenne 1,5 q/ha et 0,5 point de protéines par rapport à une conduite classique par la méthode du bilan. Par ailleurs, elle a permis de limiter les reliquats d'azote à la récolte à moins de 40 kg/ha dans 2 situations sur 3.

La méthode est aujourd'hui validée sur orge de brasserie, maïs et pommes de terre.

Le facteur limitant essentiel à son développement est la lourdeur de mise en œuvre : environ 1 heure pour faire le prélèvement, préparer l'échantillon et effectuer le dosage.

C'est la raison essentielle pour laquelle d'autres méthodes plus rapides sont actuellement développées.

1. La méthode des indicateurs visuels

Egalement appelée « méthode à double densité », cette technique consiste à semer, à double densité, une bande témoin de blé de la largeur d'un semoir. Les plants de cette bande manifesteront plus précocement une carence en azote avec un jaunissement caractéristique facilement détectable par l'agriculteur. Le premier apport peut ainsi être déclenché avant que les plantes semées à une densité normale ne soient pénalisées dans leur développement par une éventuelle carence.

2. Le Hydro N-Tester

S'inscrivant dans une logique de fractionnement de la fertilisation azotée en trois, voire quatre apports, cet outil de pilotage repose sur le couplage de la méthode du bilan prévisionnel avec l'analyse de l'état de nutrition azotée de la culture en cours de montaison. Pour cela, il mesure par réflectance la teneur en chlorophylle des feuilles. L'appareil vaut environ 1 500 euros. Plus de 1 000 sont actuellement utilisés.

3. Le Hydro N-Sensor

Un capteur, positionné sur la cabine du tracteur, mesure la lumière réfléchiée par les plantes et permet d'établir instantanément l'état de leur nutrition azotée. Après calibrage, il module directement les apports d'azote et permet des ajustements intra-parcellaires. Son coût de l'ordre de 19 000 euros explique que seulement 4 soient actuellement utilisés sur les exploitations françaises.

4. Le GPN

Commercialisé depuis janvier 2003 par la Société Grande Paroisse, cet appareil détermine les besoins en azote du blé par réflectance car l'intensité de la couleur traduit l'état de nutrition azotée de la culture. L'indice moyen mesuré, comparé à un référentiel établi par l'agriculteur sur une zone surfertilisée, permet de déterminer s'il faut ou non intervenir.

5. Analyses d'images aériennes ou satellites : FARMSTAR

A partir d'images satellites ou d'avions équipés de capteurs spéciaux, il est possible de porter un diagnostic sur le statut azoté de la plante et de générer un conseil de fertilisation azotée. Le service, proposé par ARVALIS- Institut du végétal en partenariat avec ASTRIUM et dénommé FARMSTAR – est utilisé sur 50 000 ha en 2003.

CONCLUSION

L'analyse de plante – au sens large – a donc permis aux agronomes, en s'affranchissant de la variabilité de la teneur en azote des sols, de résoudre le casse-tête de la fertilisation azotée et celle du blé en particulier. Les nouvelles technologies de l'information permettront à court terme de spatialiser le conseil et d'en assurer une diffusion quasiment en temps réel. D'ores et déjà, la pratique du fractionnement est définitivement entrée dans les mœurs : le nombre moyen d'apport sur blé est passé de 2,8 en 1999, à 3,2 en 2002. Seuls, 10 % des céréaliers maintiennent le rythme de deux apports. Par ailleurs, depuis quatre ans, les céréaliers décalent d'avril à mai le 3^{ème} apport d'azote.

Tout cela se traduit entre autres par une amélioration qualitative de la collecte (11,3 % de protéines en 2002 contre 10,7 % en 2001) et une progression des rendements.

L'utilisation de « l'analyse » du végétal sous toutes ses formes n'est pas étrangère à cette évolution.

Pour conclure, notre « vieille terre, rongée par les âges, rabotée de pluie et de tempêtes, épuisée de végétation, mais prête indéfiniment à produire ce qu'il faut pour que se succèdent les vivants », - Charles de GAULLE - , notre vieille terre mérite bien qu'on la soutienne, qu'on la défende, qu'on l'aime et qu'on la cajole .

L'analyse de plante en général et notre confrère Jean SALETTE en particulier ont ainsi contribué à la préserver !