




comifer

Groupe Azote



# Calcul de la fertilisation azotée

---

Guide méthodologique  
pour l'établissement des prescriptions locales

---

*Cultures annuelles et prairies*

Édition 2013

## **Calcul de la fertilisation azotée**

Brochure éditée par le

**c o m i f e r**



Le Diamant A  
92909 Paris La Défense Cedex  
Tél. : 01 46 53 10 75

Dépôt légal : Avril 2011  
ISBN 978-2-910393-09-0

# Calcul de la fertilisation azotée

---

Guide méthodologique  
pour l'établissement des prescriptions locales

---

*Cultures annuelles et prairies*

**La réalisation de l'actualisation de ce guide méthodologique a été encouragée par les Ministères en charge de l'Agriculture et de l'Écologie.**

**Liste des membres du « groupe azote » ayant participé à la rédaction :**

Sophie AGASSE	APCA
Alain BOUTHIER	Arvalis Institut du Végétal
Marie-Line BURTIN	ARAA
Fabienne BUTLER	ACTA
Alain CANARD	Soufflet Agriculture
Michel CARIOLLE	Institut technique de la Betterave
Pierre CASTILLON	Arvalis Institut du Végétal
Luc CHAMPOLIVIER	CETIOM
Jean-Pierre COHAN	Arvalis Institut du Végétal
Nathalie DAMAY	Laboratoire Départemental d'Analyses et de Recherche - Laon
Marie-Laure DECAU	INRA - UMR 950 EVA Caen
Bertrand DECOOPMAN	Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne
Philippe DUGAST	GPN
Rémy DUVAL	Institut Technique de la Betterave
Philippe EVEILLARD	UNIFA
Sylvain FORAY	Institut de l'Élevage
Julien GALLIENNE	APCA
François GASTAL	INRA - URP3F Lusignan
Bernard GODDEN	Centre Wallon de Recherches Agronomiques
Olivier GOUJARD	K+S Kali France
Jean GRALL	Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne
Marc HERVÉ	Eurochem Agro France
Marie-Hélène JEUFFROY	INRA Grignon
Stéphane LAFERTÉ	Groupe SAS Laboratoire / Agro-Systemes
Marc LAMBERT	Yara France
François LAURENT	Arvalis Institut du Végétal
Caroline LE ROUX	Laboratoire Départemental d'Analyses et de Recherche - Laon
Christine LE SOUDER	Arvalis Institut du Végétal
Nathael LECLECH	Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine
David LEDUC	Chambre d'Agriculture de Loire Atlantique
François LIMAUX	
Jean-Marie MACHET	INRA - Unité Agro Impact Laon Mons
Bruno MARY	INRA - Unité Agro Impact Laon Mons
Philippe MORIN	Institut technique du Lin
Jean-François RIBOUCHON	Capinov
Carole ROCCA	InVivo
Patrick SOUCHAY	K+S Nitrogen France
Jean-Claude TAUREAU	
Jérôme THIBIERGE	InVivo
Robert TROCHARD	Arvalis Institut du Végétal
Bernard VERBEQUE	Chambre d'Agriculture du Loiret
Françoise VERTES	INRA - UMR Sols, Agro- et Hydrosystèmes, Spatialisation
Philip WORTHAM	Chambre d'Agriculture de la Marne
Prune ROSENGARTEN	COMIFER

**Remerciements à :**

Marie-Madeleine CABARET	Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne
Isabelle DIOMARD	Chambre d'Agriculture du Calvados
André LE GALL	Institut de l'Élevage
Pierre-Vincent PROTIN	Arvalis Institut du Végétal
Jean-Marc SEURET	Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne

pour leur suggestions et conseils avisés dans la rédaction du chapitre Prairies.

**Le comité de lecture est composé de :**

Jacques DECROUX  
Jean-Claude IGNAZI  
Gilles THÉVENET



# Préambule

## Un raisonnement simple pour un calcul complexe

Les plantes sont autotrophes en carbone et en azote. A part les légumineuses fixatrices d'azote atmosphérique, elles prélèvent l'azote dans le sol par leur racines préférentiellement sous sa forme nitrate, pour fabriquer les acides aminés et les protéines indispensables à leur croissance et au bon fonctionnement de la photosynthèse. Les fournitures d'azote minéral par le sol étant rarement suffisantes pour répondre aux besoins des plantes, déterminées par des objectifs de productivité et de qualité des récoltes, l'agriculteur doit apporter des fertilisants minéraux et/ou organiques pour ajuster l'offre aux besoins. L'objectif de cette brochure est de le guider dans le raisonnement de la fertilisation azotée, basé sur la méthode du bilan prévisionnel.

Ce guide méthodologique est utilisable dans tous les systèmes de production (raisonné, biologique, intégré...) parce qu'il appréhende toutes les sources d'azote possibles (azote issu de la fixation symbiotique chez les légumineuses, azote organique des cultures intermédiaires ou des résidus du précédent et azote minéral des engrais). De nouveaux moyens d'analyse et des indicateurs sont à présent disponibles pour caractériser l'offre d'azote et l'ajuster aux besoins des plantes. C'est pourquoi ce nouveau guide méthodologique vient utilement actualiser la 1ère édition de 1996. Il est applicable aux cultures annuelles et aux prairies et sera complété avec des fiches par espèce téléchargeables sur le site du COMIFER.

Ce guide COMIFER s'adresse aux agriculteurs et à tous les acteurs de la formation et du conseil. Les prescripteurs peuvent décliner la méthode dans leur contexte régional ou selon les spécificités de certaines cultures. L'expérimentation doit toujours valider les paramètres et estimations nécessaires pour proposer un conseil opérationnel. Les agronomes, membres du « groupe azote » du COMIFER ont mené à terme ce travail d'actualisation du guide méthodologique. Il convient de les remercier ici de leur professionnalisme.

Le « groupe azote » est le lieu privilégié où s'échangent les nouvelles connaissances scientifiques et les expériences de terrain entre chercheurs, prescripteurs, formateurs et acteurs économiques dans une boucle de progrès permanent. La gestion plus précise des flux d'azote qu'ils soient d'origine minérale ou organique est un enjeu essentiel d'une « agriculture durable » qui poursuit à la fois un objectif économique (productivité, qualité des récoltes), environnemental (réduction des transferts d'azote vers l'eau ou l'air et des émissions de gaz à effet de serre) et sociétal (performance énergétique, sécurité alimentaire).

Philippe EVEILLARD  
Président du COMIFER

---

<sup>1</sup> Comité français d'étude et de développement de la fertilisation raisonnée.



# Sommaire

## INTRODUCTION

Introduction au raisonnement de la fertilisation azotée .....9

## PARTIE 1

### Chapitre 1

Les flux d'azote dans un sol cultivé .....15

### Chapitre 2

Le bilan de masse prévisionnel d'azote et ses adaptations .....21

### Chapitre 3

La détermination des postes du bilan prévisionnel d'azote .....25

### Chapitre 4 : Les apports d'azote et les modalités d'application

Les apports d'azote et les modalités d'application .....55

### Chapitre 5 : Le fractionnement et les outils de pilotage

Le fractionnement et les outils de pilotage .....67

### Chapitre 6 : Calcul d'un bilan prévisionnel sur prairie

Calcul d'un bilan prévisionnel sur prairie .....71

### Chapitre 7

L'origine des références, une clarté nécessaire .....89

## PARTIE 2

### Annexes

Annexe 1 : Référence Mr : Pour la cas d'une culture précédée d'une culture légumière dans la même année .....94

Annexe 2 : Notice d'utilisation des abaques d'ajustement du terme L et Tables d'ajustement du terme L en fonction de la lame drainante .....95

Annexe 3 : Exemple tableau Rf .....100

Annexe 4 : Exemples régionaux de fournitures d'azote par les sols sous prairie .....101

Fiches cultures .....103

Glossaire .....159

Pour des références actualisées et plus d'informations, consultez le site  
[www.comifer.asso.fr](http://www.comifer.asso.fr)

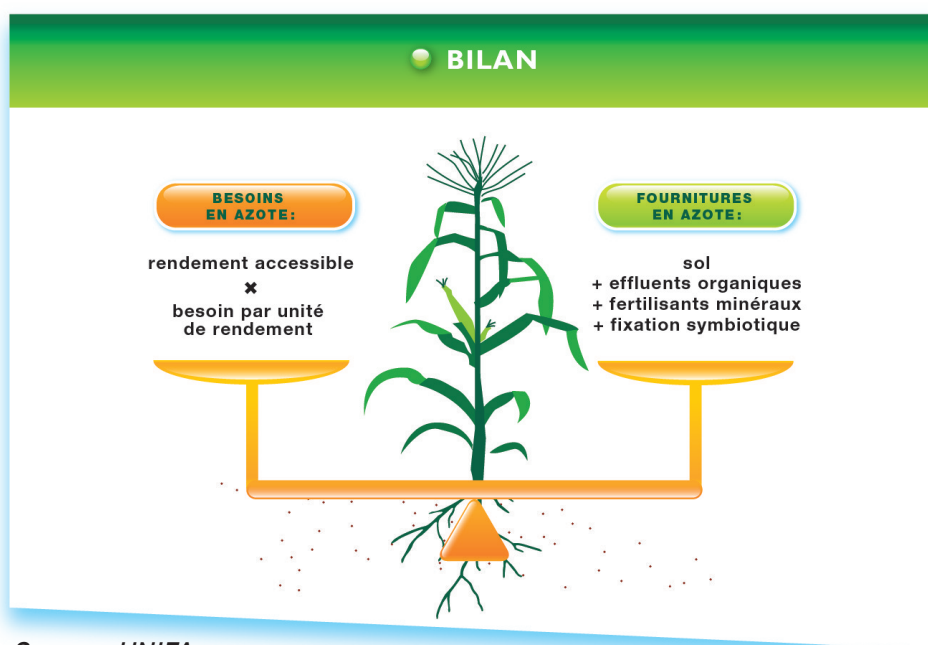


# Introduction au raisonnement de la fertilisation azotée

Ce document traite du raisonnement de la fertilisation azotée pour les grandes cultures, les légumes de plein champ et les prairies. Il s'adresse tout spécialement aux experts des groupes de travail départementaux chargés de définir des règles locales de raisonnement de la fertilisation compréhensibles et applicables. Il pourra notamment servir de base à l'élaboration des prescriptions concernant les calculs de dose d'engrais à apporter incluses dans les programmes d'action relatifs à la Directive Nitrates dans les zones vulnérables. Le sujet traité étant de nature assez complexe, cette brochure pourra, à certains endroits, paraître d'un abord assez ardu. Cependant, les informations « opérationnelles » sont bien identifiées pour permettre d'aller à l'essentiel.

On peut définir le **raisonnement de la fertilisation azotée** comme une méthode permettant d'ajuster les apports d'engrais minéraux ou organiques aux besoins de la culture pour atteindre un objectif de production donné en prenant en compte les autres fournitures d'azote par le sol. Cet ajustement de la dose entre les besoins et les fournitures contribue à la maîtrise technico-économique de la production (et en partie à la bonne gestion des produits organiques sur l'exploitation) et à la limitation des transferts d'azote dans l'environnement.

## Bilan



Source : UNIFA

La fertilisation azotée est au centre de cinq enjeux majeurs :

## 1<sup>er</sup> enjeu : la productivité

La nutrition azotée des plantes est, avec l'eau, un des plus importants facteurs de production des grandes cultures, des légumes de plein champ et des prairies. Localement, d'autres facteurs limitants comme les moyens de protection contre les bio-agresseurs (maladies, ravageurs, adventices...) ou la disponibilité d'autres éléments nutritifs (phosphore, potassium, soufre, magnésium, oligo-éléments) peuvent devenir prépondérants mais la disponibilité en azote demeure primordiale dans la plupart des contextes agro-climatiques. La figure 1 montre l'impact des apports d'engrais azotés sur le **potentiel de production** de plusieurs grandes cultures en France. On constate en 1<sup>er</sup> lieu qu'en situation sans apport d'engrais, les pertes peuvent aller de 0 à 90 % de la production maximale. En second lieu, même après un apport de 200 kgN/ha, la production oscille entre 80 et 100 % de la production maximale. Ainsi, la réponse aux engrais, bien qu'importante, est affectée d'une grande variabilité due en grande partie aux autres fournitures d'azote minéral pour la culture. Un des enjeux du raisonnement de la fertilisation est d'estimer correctement ces fournitures afin de déterminer la dose d'engrais nécessaire et suffisante pour assurer la production visée. Cette dose représente l'optimum technique.

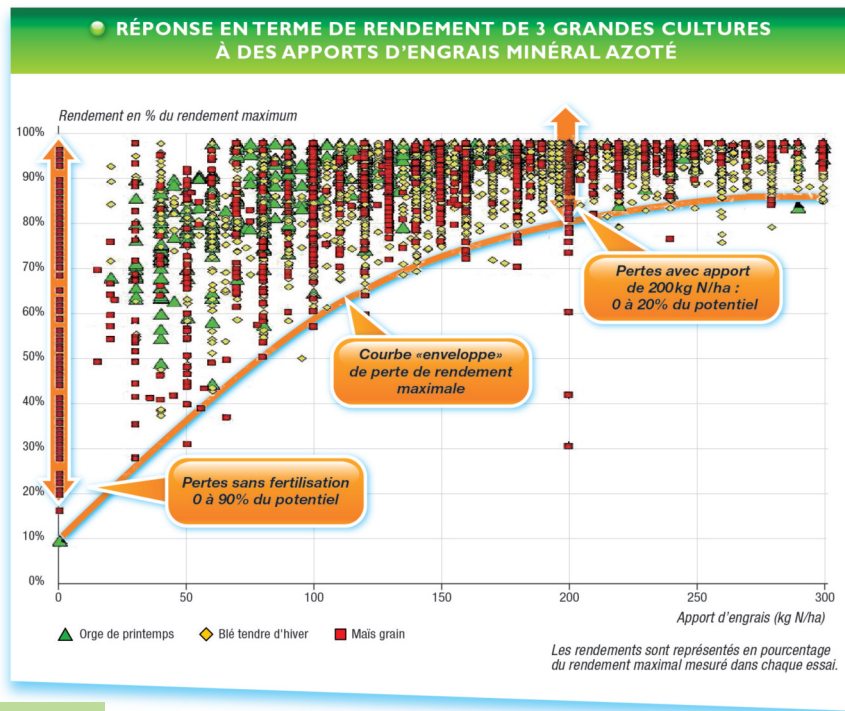


Figure 1

Figure 1 : Les rendements sont représentés en pourcentage du rendement maximal mesuré dans chaque essai. La dose d'azote est représentée en kgN/ha (toutes formes d'engrais minéral confondues). La courbe noire représente « l'enveloppe » basse du nuage de points, c'est-à-dire le niveau de perte de rendement maximale pour chaque dose d'azote. Les flèches représentent les amplitudes de pertes de rendement en cas d'absence de fertilisation ou d'un apport de 200 kgN/ha. Sources : organismes économiques et de développements agricoles [Blé tendre d'hiver (BTH) - expérimentations France entière 1991-2002 / Maïs grain (MG) - expérimentations France entière 1991-2007 / Orge de printemps (OP) - expérimentations dans les bassins de production d'OP 1993-2003]



Si on ne prend en compte que les aspects production quantitative, la dose qui correspond à l'optimum économique est inférieure à l'optimum technique et dépend du rapport du prix de l'engrais avec le prix de vente de la culture (figure 2). La présente brochure s'attache à la définition de la dose optimale technique car c'est la base de toute approche économique ultérieure.

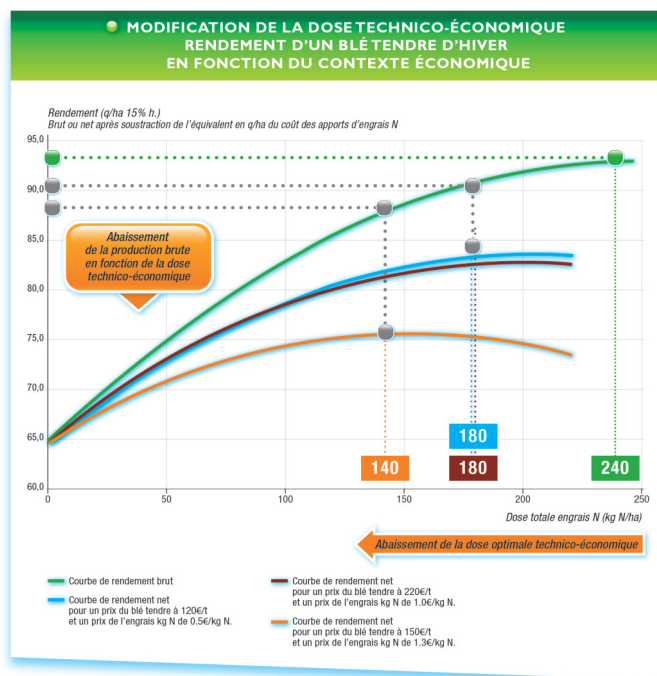


Figure 2

Figure 2 : La courbe verte représente la production brute en fonction de la dose d'engrais azoté appliquée. Les autres courbes représentent pour les mêmes doses d'engrais la production nette, c'est-à-dire le rendement brut auquel on a retranché « l'équivalent en quintaux » du coût de l'engrais apporté. Les courbes de rendements nets varient donc en fonction du rapport prix du blé/prix de l'engrais azoté. On remarque 1) que les doses optimales technico-économiques sont logiquement inférieures à la dose optimale technique ; 2) que des contextes économiques différents peuvent engendrer la même dose technico-économique (cas des courbes bleues et roses); 3) qu'au-delà de la dose technico-économique, il y a pertes économiques ; 4) que l'application d'une dose technico-économique engendre une baisse de la production brute par rapport à l'optimum technique.

Sources : essai blé tendre d'hiver ARVALIS - Institut du végétal (dpt 27, récolte 2007, variété CAPHORN), apports d'engrais azotés fractionnés en 2 apports (Z30, Z39) sous forme de solution azotée 39%.

## 2ème enjeu : la qualité des récoltes

La teneur en azote ou en protéines des récoltes peut être une condition d'accès au marché ou de valeur de la production. Parallèlement à d'autres facteurs comme le choix variétal, le raisonnement de la fertilisation azotée (dose et modalités d'apports) est primordial pour assurer les niveaux de qualités requis par les filières de transformation. Notons que si la plupart des cultures visent des teneurs en azote ou en protéine élevées, d'autres comme l'orge brassicole ou la betterave sucrière ont, a contrario, des plafonds de teneurs à ne pas dépasser pour pouvoir correspondre aux critères industriels de transformation ou de valorisation.

L'accès à des critères exigés par les marchés peut amener à définir une dose d'azote différente de la dose d'azote technico-économique déterminée sur le seul rendement.

## 3ème enjeu : la qualité de l'eau et celle de l'air

Le cycle de l'azote dans une parcelle agricole n'est pas cloisonné aux limites de la parcelle : des transferts de composés azotés se produisent entre le sol, l'air et l'eau. Les conséquences de ces transferts sur l'équilibre des écosystèmes naturels et/ou sur la santé humaine dépendent de l'importance des flux d'azote concernés, les deux plus importants étant :

- **La lixiviation<sup>1</sup> du nitrate** dans les eaux est le transfert le plus étudié depuis 25 ans. Le stock d'azote minéral restant dans le sol après la récolte des cultures est l'une des composantes de la quantité d'azote potentiellement soumis à la lixiviation pendant la période d'interculture. La figure 3 illustre le fait que, pour une situation agronomique donnée, ce stock (aussi appelé reliquat post-récolte) n'augmente de façon significative qu'à partir du moment où on applique des doses supérieures à la dose optimale technique. Le raisonnement de la fertilisation azotée est donc un des leviers de diminution du risque de lixiviation du nitrate. La Directive européenne sur le nitrate de 1991<sup>2</sup> a pour objectif de limiter la présence de nitrate dans les eaux. Son application en France prend la forme de programmes d'action successifs évalués et révisés tous les quatre ans dans les zones vulnérables.

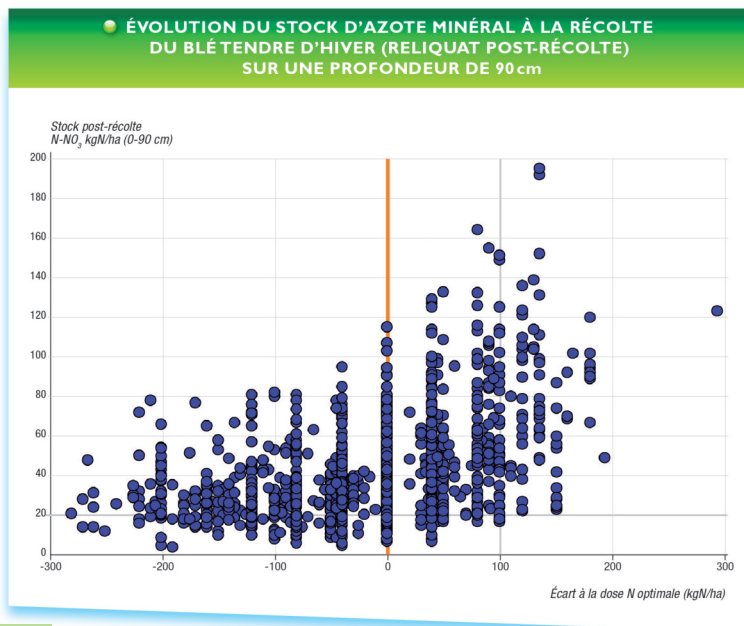


Figure 3

Figure 3 : évolution du stock d'azote minéral à la récolte du blé tendre d'hiver (reliquat post-récolte) sur une profondeur de 90 cm en fonction de l'écart de dose d'azote appliquée par rapport à la dose optimale technique. Source : étude COMIFER 1997 (1271 données élémentaires).

- **La volatilisation de l'ammoniac** à partir des apports d'engrais minéraux et organiques est, après la lixiviation, le 2ème poste de pertes d'azote le plus étudié. La Directive européenne des plafonds d'émission<sup>3</sup> fixe aux états membres des objectifs de réduction des émissions de NH<sub>3</sub> pour 2010 et 2020. L'impact environnemental des émissions d'ammoniac dans l'atmosphère est entre autre lié au fait que ce composé est un précurseur de particules fines reconnues pour leurs effets négatifs sur la santé.

<sup>1</sup> Le transfert d'un élément dissous dans la solution du sol par transfert vertical de l'eau en profondeur (drainage) est désigné sous le terme de lixiviation. Le terme lessivage, plus commun, est néanmoins abusivement employé car il désigne le transfert d'un élément en suspension.

<sup>2</sup> Directive n° 91/676/CEE du 12/12/91 concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles.

<sup>3</sup> Directive 2001/81/CE du Parlement européen et du Conseil, du 23 octobre 2001, fixant les plafonds d'émission nationaux pour certains polluants atmosphériques.

**4ème enjeu : la performance énergétique**

Les principaux engrais azotés minéraux sont fabriqués à partir de l'ammoniac synthétisé à partir de l'azote présent dans l'air et de l'hydrogène fourni par le gaz naturel. Il faut un peu plus d'une tonne d'équivalent pétrole (TEP) sous forme de gaz naturel pour produire une tonne d'azote (N). Cette dépense énergétique indirecte représente 60 à 70% de l'énergie consommée dans l'itinéraire technique des grandes cultures loin devant les autres postes : engrais (P, K, S, Mg...), consommation de carburant, phytosanitaires et semences.

**5ème enjeu : le changement climatique**

Au cours de certaines étapes du cycle de l'azote dans le sol (nitrification et dénitrification), des composés azotés autres que l'ammoniac sont émis dans l'atmosphère. Parmi ceux-ci, le protoxyde d'azote est un gaz à effet de serre qui a un très fort impact sur le changement climatique. De plus, la production industrielle des engrais azotés est à l'origine d'émissions de dioxyde de carbone et de protoxyde d'azote. Enfin, les apports d'engrais azotés sont un des facteurs explicatifs des émissions de protoxyde d'azote par les sols. Ainsi, jusqu'à 90% des émissions de gaz à effet de serre liées à la production végétale peuvent être imputés à la fertilisation azotée (toutes sources d'azote comprises).

**Le guide aborde successivement les grands points suivants :**

**Le chapitre 1** fixe les ordres de grandeur des flux dans le cycle de l'azote et des transferts potentiels vers les milieux eau, air ou sol.

**Le chapitre 2** présente les principes de la méthode du bilan et de ses adaptations possibles.

**Le chapitre 3** détaille tous les postes de la méthode du bilan qui peuvent être examinés, il donne aussi des exemples d'application avec les hypothèses ou les estimations prises sur certains postes du bilan pour le rendre opérationnel pour le conseil aux agriculteurs.

**Le chapitre 4** se rapporte aux différents types d'engrais azotés (organique et minéral) et aux modalités d'apport qui influencent l'efficacité de l'azote épandu.

**Le chapitre 5** traite du fractionnement des apports et des méthodes d'ajustement de la dose en cours de culture fondées sur l'observation et l'utilisation d'outils de pilotage.

**Le chapitre 6** considère le cas spécifique des prairies

**Le chapitre 7** aborde la question de la régionalisation des références et de l'adaptation de la méthode du bilan à des conditions pédoclimatiques particulières ou à de nouvelles cultures permettant l'élargissement de son champ d'application. Un glossaire est fourni en fin d'ouvrage.

Les références de calcul et de gestion de la fertilisation azotée spécifiques des cultures (besoins, modalités d'apport...) fournies dans des fiches cultures seront progressivement mises en ligne en complément de ce guide méthodologique.





## 1

# Un flux d'azote dans un sol cultivé

## Les formes d'azote dans le sol

Les sols contiennent 2 à 10 tonnes d'azote par hectare, essentiellement sous forme organique située dans la couche labourée comprise entre 0 et 25/30 cm de profondeur. La matière organique du sol, souvent qualifiée d'«humus», est formée de composés carbonés et azotés résultant de la décomposition et des transformations dans le sol des débris organiques d'origine animale ou végétale (résidus de culture, produits résiduaux organiques, exsudats racinaires...). La stabilité de ces composés non vivants, est liée soit à leur nature complexe, soit à leur association avec les particules minérales (argile, calcaire, ions métalliques). La partie vivante, qui ne représente que 5 à 10% de la matière organique totale, regroupe les êtres vivants du sol, organismes très divers (vers de terre, arthropodes, bactéries, etc...) et nombreux. Les bactéries et les champignons, regroupés sous le terme de « biomasse microbienne », constituent la fraction la plus abondante et active, et jouent des rôles essentiels dans les transformations entre formes organiques et minérales de l'azote.

Dans le sol, l'azote minéral est présent sous trois formes : l'**ion ammonium** ( $\text{NH}_4^+$ ), l'**ion nitrite** ( $\text{NO}_2^-$ ) et l'**ion nitrate** ( $\text{NO}_3^-$ ). La forme nitrique qui provient de la nitrification de l'ammonium est prépondérante dans les sols cultivés. En dehors des périodes consécutives aux apports d'azote par les engrais et amendements organiques, l'azote minéral présent dans le sol ne représente généralement que quelques dizaines de kg par hectare.

A l'exception des légumineuses qui bénéficient de la fixation symbiotique, les plantes absorbent l'azote principalement sous forme minérale, aussi bien nitrique ( $\text{NO}_3^-$ ) que ammoniacale ( $\text{NH}_4^+$ ). Toutefois, la prédominance du nitrate au cours de l'année dans les sols cultivés conduit les plantes à absorber l'essentiel de leur azote sous cette forme.

## Les principaux flux d'azote dans un sol cultivé

Le cycle de l'azote dans une parcelle cultivée (figure 4) peut être représenté par les flux qui alimentent le stock d'azote minéral dans le sol :

- la **minéralisation** de l'humus, de la biomasse microbienne, des résidus de culture et des produits résiduaux organiques
- la **fixation symbiotique** des légumineuses et la fixation libre de diazote  $\text{N}_2$ ,
- les **apports d'azote** minéral des engrais et des fertilisants organiques (fumiers, lisiers ....)
- les dépôts atmosphériques par voie sèche ou humide

et les flux qui contribuent à le diminuer :

- L'exportation par les récoltes
- L'**organisation** de l'azote minéral dans la biomasse microbienne
- Les pertes par **volatilisation** de l'azote ammoniacal
- Les pertes gazeuses au cours des processus biologiques de **dénitrification** et de **nitrification**
- Les pertes par **lixiviation**<sup>4</sup> de l'azote nitrique

<sup>4</sup> Le transfert d'un élément dissous dans la solution du sol par transfert vertical de l'eau en profondeur (drainage) est désigné sous le terme de *lixiviation*. Le terme *lessivage*, plus commun, est néanmoins abusivement employé car il désigne le transfert d'un élément en suspension.

Certains de ces processus se déroulent tout au long de l'année avec une intensité variable (minéralisation, organisation...), d'autres sont limités à certaines périodes de l'année ou correspondent à des interventions culturales (volatilisation, lixiviation...) ou à certaines conditions climatiques.

Les processus qui déterminent la disponibilité de l'azote minéral dans le sol sont pour la plupart sous le contrôle de la biomasse microbienne. L'activité de celle-ci dépend fortement des conditions du milieu sol (oxygène, température, humidité du sol). La prise en compte de ces facteurs (particulièrement la température et l'humidité du sol) est donc primordiale pour estimer les flux d'azote qui résultent de l'activité microbienne. D'autres processus qui conditionnent les pertes par volatilisation ou par lixiviation sont sous la dépendance de facteurs pédoclimatiques.

Il faut également ajouter d'autres flux tels que i) la fixation symbiotique et la fixation libre de diazote  $N_2$ , ii) les apports atmosphériques par voie sèche ou humide qui constituent des entrées d'azote organique ou minéral dans le sol.

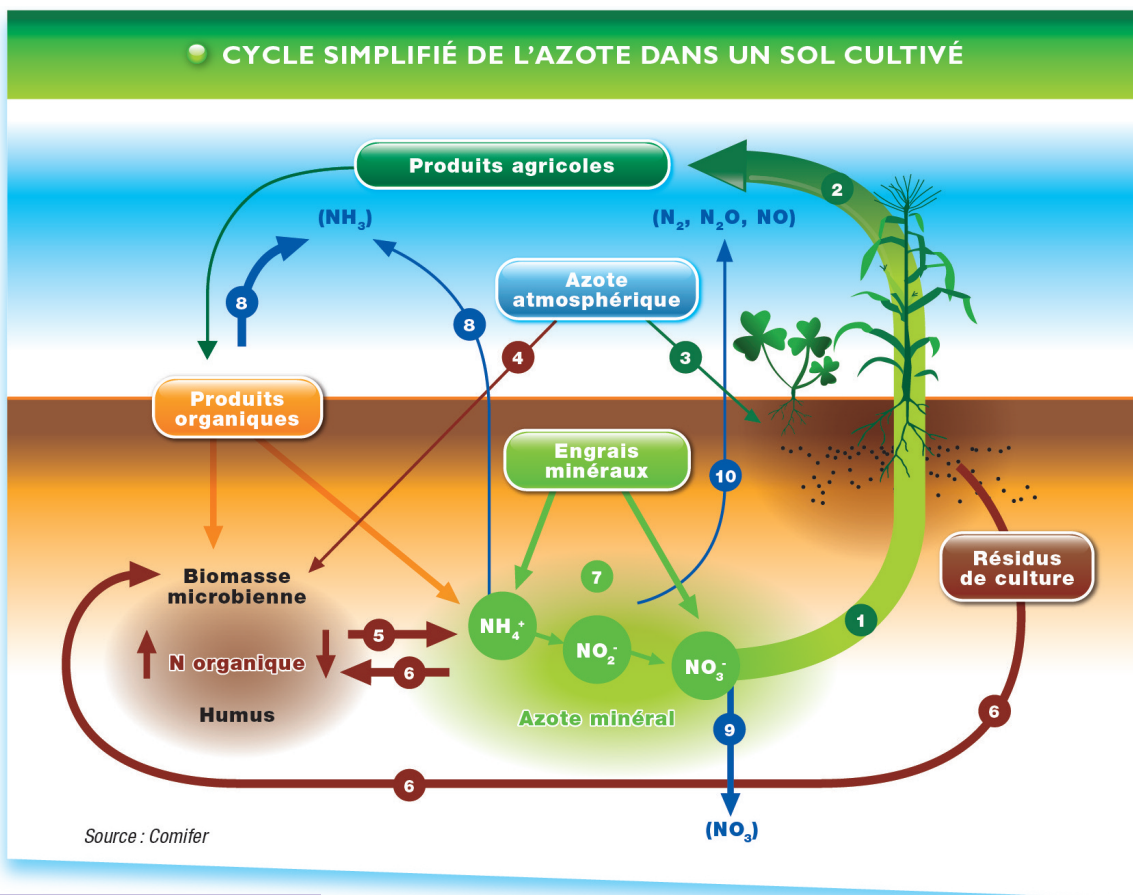


Figure 4

- |    |                              |     |                 |
|----|------------------------------|-----|-----------------|
| 1. | absorption racinaire         | 6.  | organisation    |
| 2. | exportation par les récoltes | 7.  | nitrification   |
| 3. | fixation symbiotique         | 8.  | volatilisation  |
| 4. | fixation libre               | 9.  | lixiviation     |
| 5. | minéralisation               | 10. | dénitrification |



## Les « transformation et fourniture d'azote »

### La minéralisation de l'azote organique et l'organisation de l'azote minéral

La minéralisation de la matière organique du sol, qu'elle soit endogène (humus et biomasse microbienne) ou exogène (résidus de culture, produits résiduels organiques) conduit à la production d'azote ammoniacal ( $N-NH_4$ ), puis d'azote nitrique ( $N-NO_3$ ) par le processus biologique de nitrification. On parle de **minéralisation brute**. Selon la teneur en azote de la matière organique décomposée (rapport C/N), tout ou partie de cet azote est consommé par les microorganismes dans leur processus d'assimilation du carbone en vue d'assurer leurs besoins énergétiques et structuraux. On parle d'**organisation brute**. La résultante de ces 2 processus concurrents peut conduire soit à une accumulation d'azote minéral dans le sol, on parle alors de **minéralisation nette** (cas des matières organiques à rapport C/N bas comme l'humus), soit à une diminution du stock d'azote minéral dans le sol, on parle alors d'**organisation nette** (cas des matières organiques à rapport C/N élevé comme des pailles de céréales) (figure 5).

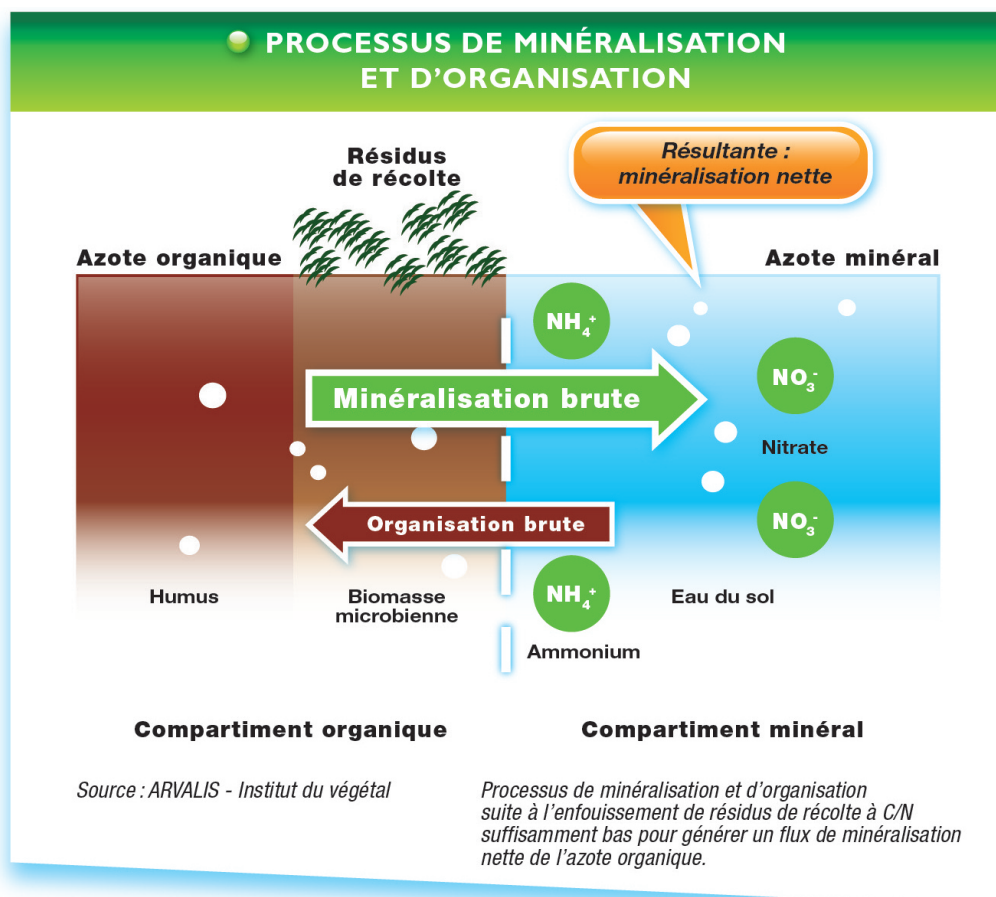


Figure 5

Les processus de minéralisation et d'organisation sont soumis aux conditions d'aération, d'humidité et de température du sol.

## Apports par la fixation de l'azote atmosphérique et par la déposition

La fixation est la transformation de l'azote moléculaire gazeux en azote ammoniacal, qui est ensuite incorporé dans des composés organiques. Deux types de processus sont rencontrés :

- la fixation libre (non symbiotique) réalisée par des bactéries aérobies ou anaérobies très spécifiques, ainsi que par des cyanophycées. Les quantités d'azote ainsi fixées sont estimées entre 10 et 30 kg N/ha/an.
- la fixation symbiotique qui résulte de l'association entre les espèces légumineuses et les bactéries du genre *Rhizobium*. Elle peut représenter quelques dizaines à plusieurs centaines de kg N/ha/an.

Les dépositions atmosphériques peuvent se produire par voie sèche ou par voie humide. Dans ce dernier cas, il s'agit des apports par les pluies qui peuvent représenter annuellement 5 à 15 kg N/ha/an.

## Les pertes d'azote minéral

Outre l'organisation dans le sol, plusieurs flux concourent à faire diminuer le stock d'azote minéral. Ce sont des processus qui se déroulent de manière plus discontinue et dont l'intensité varie en fonction de nombreuses conditions agro-pédo-climatiques.

### La dénitrification

La dénitrification est le processus biologique de transformation de l'azote nitrique en azote gazeux  $N_2$ . Dans certaines conditions (faibles valeurs de pH du sol par exemple), l'enchaînement des réactions chimiques est incomplet et conduit à la production de formes intermédiaires d'oxyde d'azote dont le protoxyde d'azote  $N_2O$  (puissant gaz à effet de serre). Faibles dans les sols bien drainés (0 à 20 kgN/ha/an), les pertes d'azote par dénitrification peuvent être beaucoup plus importantes lorsque les conditions du sol sont favorables à ce processus : anoxie (défaut d'oxygène) liée à un excès d'eau temporaire, abondance d'azote sous forme nitrique et présence de matières organiques labiles.

Fugaces pendant des épisodes favorables (pluies abondantes après un apport de fertilisant, pissat,...) ces pertes sont difficiles à mesurer et elles sont le plus souvent estimées grâce à des modèles biophysiques.

### Les pertes gazeuses lors de la nitrification

La nitrification est le processus aérobie de transformation de l'azote ammoniacal en azote nitrique. Le processus libère de l'azote gazeux sous forme de  $N_2O$  et de  $NO$  par un processus non complètement identifié actuellement.

### La volatilisation de l'azote ammoniacal

La volatilisation d'ammoniac est le processus physico-chimique de passage du  $NH_4^+$  adsorbé sur le complexe argilo-humique ou dissous dans la solution du sol vers sa forme gazeuse  $NH_3$  libérée dans l'atmosphère. Elle s'opère à la surface du sol à partir d'une source d'azote ammoniacal : engrais minéral ou produit résiduaire organique. Ce phénomène se produit rapidement après l'apport (quelques heures à quelques jours). Les pertes par volatilisation

peuvent dépasser 20 % des apports d'engrais minéral selon les formes et les conditions d'apport et 70% de la fraction ammoniacale des lisiers. L'intensité du phénomène dépend des propriétés du sol (pH, pouvoir tampon, humidité de surface) et des conditions climatiques (température, vent, pluviométrie) dans les heures et les jours qui suivent l'épandage.

### La lixiviation du nitrate

La lixiviation est l'entraînement d'éléments minéraux dissous par la percolation de l'eau vers la profondeur. Contrairement à l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) énergiquement fixé par les charges négatives de la phase solide du sol, l'ion nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) est facilement entraîné. La quantité de nitrate entraînée au-delà de la zone accessible aux racines dépend en particulier de la lame d'eau drainante, de la quantité d'azote nitrique présente et de sa répartition dans le profil de sol, du type et de la profondeur du sol. Pour une lame d'eau drainante de 200 mm, la concentration en nitrate de 50 mg/l de l'eau drainée est atteinte pour une perte de 22 kg N/ha.

Les quantités d'azote minéral présentes dans le profil de sol (reliquats) en début de drainage, résultant des différents flux d'azote du bilan de masse, sont dans une certaine mesure indicatrices du risque de lixiviation de nitrate.

#### Pour en savoir plus :

**Cellier P., Bethenod O., Castell J.F., Germon J.C., 2008.** Contribution de l'agriculture à l'effet de serre - Importance de l'azote et interactions avec l'ozone. OCL, 15(5), 317-323.

**Nicolardot B., Mary B., Houot S., Recous S., 1997.** La dynamique de l'azote dans les sols cultivés. in Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes - Annales colloques INRA 83 - Reims (France) 19-20 nov. 1996 - INRA Ed., 87-103.



## 1

# Le bilan de masse prévisionnel et ses adaptations

## Les équations du bilan prévisionnel

Le concept de bilan d'azote minéral du sol prévisionnel développé par Hébert en 1969 puis Rémy-Hébert en 1974 s'est progressivement imposé en France comme la méthode de raisonnement de la fertilisation azotée des cultures. De nombreux travaux lui ont été consacrés en vue d'améliorer sans cesse son paramétrage.

## Le bilan de l'azote minéral dans le sol, résultante des flux d'azote

Sur une période de temps donnée, le bilan de masse du stock d'azote minéral du sol sur la profondeur explorée par les racines de la culture s'écrit :

**État final - État initial = Entrées - Sorties**

$$[1] : R_f - R_i = [M_h + F_s + F_{ns} + M_{hp} + M_r + M_{rCi} + M_{pro1} + M_{pro2} + A + N_{irr} + X + X_{pro}] - [P_f - P_i + I_x + G_s + G_x + L]$$

Avec :

États initial et final	
R <sub>f</sub>	Quantité d'azote minéral dans le sol à la fermeture du bilan
R <sub>i</sub>	Quantité d'azote minéral dans le sol à l'ouverture du bilan
Entrée d'azote dans le système sol-plante	
M <sub>h</sub>	Minéralisation nette de l'humus du sol*
F <sub>s</sub>	Fixation symbiotique d'azote atmosphérique par la culture
F <sub>ns</sub>	Fixation non symbiotique d'azote atmosphérique
M <sub>hp</sub>	Minéralisation nette due à un retournement de prairie
M <sub>r</sub>	Minéralisation nette de résidus de récolte
M <sub>rCi</sub>	Minéralisation nette de résidus de culture intermédiaire
M <sub>pro1</sub>	Minéralisation nette de l'azote organique d'un PRO n°1 apporté avant l'ouverture du bilan
M <sub>pro2</sub>	Minéralisation nette de l'azote organique d'un PRO n°2 apporté après l'ouverture du bilan
A	Apports atmosphériques (apports météoriques = dépôts secs ou humides)
N <sub>irr</sub>	Azote apporté par l'eau d'irrigation
X	Apport d'azote sous forme d'engrais minéral de synthèse
X <sub>pro</sub>	Azote de la fraction minérale d'un PRO apporté après la date d'ouverture du bilan
Sorties d'azote du système sol-plante	
P <sub>f</sub>	Quantité d'azote absorbé par la culture à la fermeture du bilan
P <sub>i</sub>	Quantité d'azote absorbé par la culture à l'ouverture du bilan
I <sub>x</sub>	Organisation par voie microbienne aux dépens de l'azote minéral apporté sous forme d'engrais de synthèse ou de fraction minérale du PRO
G <sub>s</sub>	Pertes du sol par voie gazeuse (dénitrification pour l'essentiel)
G <sub>x</sub>	Pertes par voie gazeuse (volatilisation, dénitrification) aux dépens de l'engrais minéral (X) et de la fraction minérale du PRO apporté après l'ouverture du bilan (X <sub>pro</sub> )
L	Pertes par lixiviation du nitrate pendant l'ouverture du bilan

Le poste Ri intègre la quantité d'azote minéral présent dans le sol avant l'ouverture du bilan, quelle qu'en soit l'origine.

**\*Remarque :** Par rapport à la précédente édition de ce document, le terme **Mha** (Minéralisation supplémentaire par arrière-effet due à l'apport régulier de produits résiduels organiques) n'est plus utilisé dans l'écriture du bilan de masse. En effet, la notion d'arrière-effet d'un apport organique suppose que l'azote organique résiduel de cet apport soit minéralisé les années ultérieures à son apport à un rythme spécifique du produit, différent de la dynamique de minéralisation de l'humus. Ces dernières années, il a été démontré, qu'après un temps de résidence dans le sol d'environ 1 an et demi à 3 ans, la vitesse de minéralisation de cet azote n'est pas différente de celle de l'azote de l'humus. C'est donc à présent le terme Mh qui intègre l'arrière-effet des apports réguliers de produits résiduels organiques à travers l'utilisation d'un facteur système (cf. chapitre 3).

Ce bilan est d'une grande souplesse, pouvant être appliqué à la totalité ou seulement à certaines étapes d'un cycle cultural. En effet, il est généralement réalisé sur la partie du cycle de développement au cours de laquelle s'exprime l'essentiel des besoins de la culture, par exemple pour les cultures d'hiver du milieu de l'hiver à la récolte. Mais il peut être réalisé aussi sur une partie seulement du cycle de développement pouvant ainsi participer au raisonnement du fractionnement des apports.

## Les écritures opérationnelles du bilan prévisionnel d'azote

Plusieurs simplifications sont usuellement apportées à l'équation [1] sur une période correspondant à un cycle cultural en situation de prélèvement intense d'azote par la culture :

- On considère que les pertes du sol par voies gazeuses et la fixation non symbiotique sont des phénomènes de faible ampleur et du même ordre de grandeur d'où le postulat :  
 $G_s = F_{ns}$
- La méthode du bilan prévisionnel s'applique dans la quasi-totalité des situations à des cultures non-légumineuses, d'où  $F_s = 0$ .

Grâce à ces simplifications, on obtient l'équation [2] qui permet un calcul opérationnel de la dose d'azote (X) sur le cycle cultural.

$$[2] \quad R_f - R_i = [M_h + M_{hp} + M_r + M_{rCi} + M_{pro1} + M_{pro2} + A + N_{irr} + X + X_{pro}] - [P_f - P_i + I_x + G_x + L]$$

Par transformation, on obtient l'équation suivante :

$$[3] \quad P_f = P_i + R_i + M_h + M_{hp} + M_r + M_{rCi} + M_{pro1} + M_{pro2} + A + N_{irr} + X + X_{pro} - I_x - G_x - L - R_f$$

Le terme Pf correspond aux besoins de la culture, qui sont assurés par les fournitures d'azote par le sol, complétées des apports d'engrais, aux pertes près.



**Et sur le terrain ?**

L'équation [3] représente la forme du bilan de masse diffusée par certains outils actuellement disponibles, outils qui nécessitent un paramétrage important pour estimer tous les postes.

Les différents postes sont à évaluer selon une procédure qui va être passée en revue dans le chapitre 3. Précisons toutefois qu'à part les termes  $R_i$  et  $P_i$  qui peuvent être mesurés tous les ans pour certaines cultures dans certaines conditions, les autres termes sont estimés à partir de tables, d'abaques ou de modèles dynamisés, élaborés à partir de références dérivées de résultats expérimentaux au champ ou au laboratoire et, si possible, validées régionalement.

**Rappel important :**

Plusieurs difficultés de paramétrage liées aux références disponibles peuvent amener à des écritures opérationnelles plus pratiques dans les outils. **Les écritures présentées reflétant les mêmes flux d'azote avec un nombre variable de postes, les différents termes doivent être évalués conjointement en cohérence avec l'écriture choisie.**

En premier lieu, la difficulté de différencier les effets des termes  $M_{pro1}$  et  $M_{pro2}$  et de déterminer les pertes attribuables à  $X_{pro}$  peut conduire à globaliser l'effet azote « direct » d'un produit organique dans un terme « équivalent engrais minéral efficace »  $X_a$ . Deuxièmement, la valeur du terme  $A$  est généralement faible (autour de 10 kg N/ha sur l'année soit moins de 5 kg N/ha sur la période d'ouverture du bilan d'un blé cf Croisé et al (2002), ainsi on néglige généralement le terme  $A$  dans un bilan simplifié. Enfin, si on ne les estime pas directement, les pertes aux dépens de l'azote apporté sous forme minérale dans les engrais de synthèse ou dans les PRO ( $G_x$  et  $I_x$ ) peuvent être traitées de 2 façons (cf. chapitre 3) :

- Postes non estimés car l'application de la méthode du bilan prévisionnel s'accompagne de conditions d'emploi des produits qui minimisent ces pertes.
- Postes intégrés dans un « coefficient apparent d'utilisation » de l'engrais (CAU), multiplicateur de la dose d'engrais sous forme minérale apportée. Cette approximation est faisable tant que le régime de fertilisation se situe à l'optimum technique ou en dessous. En régime de sur-fertilisation, une diminution du CAU peut être en partie attribuée à une augmentation du stock d'azote minéral à la fermeture du bilan ( $R_f$ ).

En intégrant tout ou partie de ces hypothèses, on peut aboutir à des écritures du type :

 **$I_x$  et  $G_x$  non estimés :**

$$[3'] \quad P_f = P_i + R_i + M_h + M_{hp} + M_r + M_{rCi} + N_{irr} + X + X_a - L - R_f$$

**Et sur le terrain ?**

L'équation [3'] représente la forme la plus diffusée du bilan de masse.

 **$I_x$  et  $G_x$  pris en compte par le CAU :**

$$[4] \quad P_f = P_i + R_i + M_h + M_{hp} + M_r + M_{rCi} + N_{irr} + (X+X_a) \times CAU - L - R_f$$

**Et sur le terrain ?**

L'équation [4] est diffusée notamment en Poitou-Charentes et dans le Sud-Ouest de la France.

Selon les contraintes agro-climatiques, la difficulté d'estimer séparément tous les termes de fournitures d'azote par le sol peut conduire à estimer un terme générique de fourniture du sol PO. On obtient alors l'équation suivante :

$$[4'] \quad Pf = PO + (X+Xa) \times CAU$$

#### Et sur le terrain ?

L'équation [4'], aussi appelée « équation d'efficacité » représente la forme utilisée dans certaines régions ayant développé les référentiels adaptés de CAU et de PO. Citons par exemple l'Alsace et la Lorraine.

Les progrès des recherches agronomiques pourront amener à l'avenir à proposer d'autres variantes de ces écritures en estimant, par exemple, de façon opérationnelle certains postes difficilement accessibles dans l'état actuel des connaissances.

## Autres méthodes de calcul prévisionnel de dose d'azote

Si les méthodes décrites précédemment ne sont pas disponibles localement, d'autres méthodes (courbes de réponse à l'azote, modulation de doses pivot...), pouvant être partiellement basées sur le principe du bilan, peuvent être utilisées sous la réserve expresse de satisfaire aux conditions de validation décrites dans cette brochure. Citons comme exemples possibles d'autres approches de calculs :

- Utilisation comme base de raisonnement d'une dose pivot déterminée par situation culturale type et par espèce cultivée par analyse fréquentielle de collections de courbes de réponse à l'azote. Cette dose pivot à valeur inter-annuelle est corrigée en plus ou en moins en fonction des conditions particulières de la saison culturale (écarts des reliquats mesurés en réseau par rapport aux moyennes, évaluation du potentiel installé de la culture, ...).
- Utilisation de doses moyennes calculées par situation culturale type et espèce cultivée suite à des campagnes de mesure ou d'évaluation des reliquats azotés.

#### Pour en savoir plus :

**Meynard J.M., Justes E., Machet J.M., Recous S., 1997.** Fertilisation azotée des cultures annuelles de plein champ. in Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes - Annales colloques INRA 83 - Reims (France) 19-20 nov. 1996 - INRA Ed., 183-199.

**Croise, L., Ulrich, E., Duplat, P., et Jaquet, O. (2002).** RENECOFOR : Deux approches indépendantes pour l'estimation et la cartographie des dépôts atmosphériques totaux hors couvert forestier sur le territoire français, Office National des Forêts, Département Recherche et Développement, Fontainebleau, France. ISBN 2-84207-258-8.

**Sicard, P. (2006) :** Caractérisation des retombées atmosphériques en France en zone rurale sous forme de précipitations, gaz et aérosol. Analyse des tendances spatio-temporelles et des séries chronologiques. Thèse présentée à l'Université des Sciences et Technologies de Lille 425.

## 1

# Détermination des postes du bilan prévisionnel d'azote

Les références de calcul et de gestion de la fertilisation azotée spécifiques des cultures (besoins, modalités d'apport...) seront regroupées dans des fiches cultures à paraître ultérieurement.

## Rappel important :

Plusieurs difficultés de paramétrage liées aux références disponibles peuvent amener à des écritures opérationnelles plus pratiques dans les outils. **Les écritures présentées reflétant les mêmes flux d'azote avec un nombre variable de postes, les différents termes doivent être évalués conjointement en cohérence avec l'écriture choisie.**

Les termes sont traités dans l'ordre d'apparition dans les équations à partir de l'équation [3] du chapitre 2. Tous les postes sont exprimés en kg N/ha.

## Préambule sur le bilan dynamique

Les différents processus physiques ou biologiques à l'origine des flux d'azote dans une parcelle cultivée sont sous la dépendance de facteurs pédo-climatiques (pluie, température, humidité du sol...) (cf. chapitre 1). Ainsi, en toute rigueur, les différents termes du bilan prévisionnel d'azote pour une situation agricole « constante » (même type de sol, même période d'implantation et de récolte, même précédent...), varient d'une année sur l'autre. Les progrès des connaissances agronomiques et des capacités de calculs informatiques permettent depuis quelques années à certains outils de calculer plus précisément les termes du bilan en prenant en compte le climat passé, et de prévoir leur évolution en utilisant des projections climatiques fréquentielles. Cette nouvelle génération d'outil propose donc un bilan dit « dynamique » à la différence des outils classiques proposant un bilan « statique » avec des termes constants d'une année sur l'autre pour une même situation agricole.

Le principe de la dynamisation repose sur l'utilisation d'une échelle de temps qui n'est plus calendaire mais fonction des conditions de températures et d'humidité de l'horizon minéralisant. C'est le concept de **Jours Normalisés**.

En pratique, un jour normalisé se calcule à l'aide des équations suivantes :

Pour une période de calcul de d jours calendaires,

$$JN = \sum 1 \rightarrow d[f(T_i) \times g(H_i)]$$

### "Fonction température"

$$f(T_i) = e^{[0,115 \times (T_i - T_{ref})]}$$

Avec :  $T_i$  = température moyenne du jour calendaire  $i$  en °C

$T_{ref}$  = température de référence fixée ici à 15°C

### "Fonction humidité"

$$g(H_i) = 0,2 + 0,8 \times (H_i - H_{min}) / (H_{cc} - H_{pF})$$

Avec :  $H_i$  = humidité moyenne de la couche minéralisante du jour calendaire  $i$

$H_{cc}$  = humidité à la capacité au champ de la couche minéralisante

$H_{pF}$  = humidité au point de flétrissement de la couche minéralisante

A priori, tous les postes du bilan peuvent être traités selon une approche dynamique en utilisant des équations exprimées en fonction des jours normalisés. En pratique, les principaux termes concernés sont :

- **Les termes de minéralisation des différents types de matières organiques (Mh, Mr, MrCl, Mpro1...)** : La prise en compte de ces facteurs passe par l'emploi d'équations décrivant les cinétiques de minéralisation de l'azote contenu dans la matière organique en fonction des **Jours Normalisés**.
- **Les pertes par lixiviation du nitrate (L)** qui peuvent être calculées en associant l'estimation des flux de minéralisation à un modèle de drainage du sol.

L'emploi du bilan dynamique permet en théorie de disposer d'une estimation plus pertinente de la dose d'engrais azoté par rapport à l'utilisation d'un bilan prévisionnel « statique ». Son développement est néanmoins encore loin d'être généralisé en France pour 3 raisons principales :

- Les nombreux modèles utilisés ont besoin de références pédo-climatiques nombreuses et précises qui ne sont pas encore formalisées pour toutes les régions françaises
- Plusieurs cultures ne sont pas encore suffisamment paramétrées
- Enfin, de par la nécessité de recourir à des modèles complexes et d'être connecté à des référentiels météorologiques, la diffusion des outils de bilan dynamique n'est pas aussi aisée que des grilles de bilan statique sous format papier ou informatique facilement accessibles.

Pour toutes ces raisons, les méthodes de bilans statiques sont encore majoritairement utilisées en France. Les années à venir verront sans doute cette répartition évoluer au fur et à mesure des travaux agronomiques et de la diffusion des outils correspondants. Les références présentées dans ce guide seront donc essentiellement celles « du bilan statique ». Cependant, afin de préparer l'avenir et d'éclairer les opérateurs qui seraient confrontés aux outils de bilan dynamique qui tournent déjà de façon satisfaisante sur certaines cultures dans quelques régions, un certain nombre d'indications sur l'état actuel des connaissances « dynamiques » seront fournies le cas échéant.

## **Pf : Quantité d'azote absorbé par la culture à la fermeture du bilan = besoins d'azote de la culture**

Etant donné que l'importance des besoins en azote conditionne la nécessité ou pas de compléter les fournitures du sol par un apport d'engrais, la détermination de ce poste pèse très lourd dans le calcul de la dose totale d'azote à apporter.

Outre les besoins intrinsèques liés à la mise en place d'une biomasse non limitante, les besoins en azote des cultures sont aussi conditionnés par **les objectifs de production d'un point de vue quantitatif et/ou qualitatif**. Selon la nature de la culture concernée on se situe dans l'un ou l'autre des deux cas suivants pour déterminer les besoins en azote :

- **Prendre en compte un objectif de rendement**, éventuellement révisé en cours de culture, assorti d'un besoin par unité de production. C'est le cas des cultures pour lesquelles l'absorption d'azote est proportionnelle au rendement. Dans plusieurs cas, un objectif qualitatif devra être pris en compte en modifiant à la baisse ou la hausse les besoins liés au rendement.

- **Utiliser directement un besoin d'azote par unité de surface.** C'est le cas des cultures pour lesquelles la connaissance des potentialités du milieu a permis d'établir ces besoins prévisionnels, que ce soit par des valeurs moyennes de production, ou par l'utilisation de modèles de croissance liés à des caractéristiques du cycle de culture.

**Remarque n°1 :** Les légumineuses fixent de façon symbiotique l'azote atmosphérique. Ainsi, elles ne nécessitent aucun apport d'engrais azoté, à l'exception de certaines espèces (exemple des haricots) pour lesquelles un apport précoce ou tardif d'azote permet de pallier soit le démarrage trop tardif, soit l'arrêt trop précoce de la fixation symbiotique.

### **Prendre en compte un objectif de production**

Quelle que soit l'unité de production considérée, deux choses sont absolument indispensables : **une bonne évaluation de l'objectif** (noté **y**) et l'existence de références sur le **besoin par unité de production** (noté **b**). On utilise alors la relation suivante :

$$[5] \quad Pf = b \times y$$

Avec : **b** = besoin par unité de production

**y** = objectif de rendement

Compte tenu de la relation étroite entre l'objectif de production et le niveau du besoin à satisfaire - donc de façon indirecte la dose d'engrais à apporter- il est indispensable de se fixer des objectifs de rendement réalistes par rapport aux potentiels permis par le milieu. La difficulté tient à la variabilité interannuelle des potentiels de production observés sur chaque parcelle cultivée. Ceci impose une stratégie cohérente et rigoureuse dans la fixation des objectifs.

Selon les cultures, la détermination du terme **b** prend en compte un ou plusieurs facteurs (variété, potentiel de production...). De plus, il peut être nécessaire de prendre en compte des critères qualitatifs de la récolte dans la détermination des besoins, et ceci indépendamment des objectifs de production en terme quantitatif, ce besoin s'appelle **bq** (*cf. fiches cultures et site du COMIFER [www.comifer.asso.fr](http://www.comifer.asso.fr)*).

**Remarque n°2 :** Toute détermination de potentiels de rendement en fonction de zonage local ou d'un facteur limitant doit permettre une révision régulière de ces potentiels (à la baisse ou la hausse) en fonction, entre autres, des évolutions climatiques et parasitaires du milieu et en fonction de l'évolution du potentiel génétique des variétés cultivées.

**Remarque n°3 :** Certaines cultures permettent un ajustement du potentiel de production en cours de végétation et donc des doses d'azote en cours de campagne.

**Note bilan dynamique :** certains outils proposent pour quelques cultures de recalculer le potentiel de rendement en fonction des conditions climatiques de la campagne (prise en compte de la réserve hydrique par exemple).

### **Utiliser directement un besoin prévisionnel d'azote par unité de surface**

On se reportera aux fiches culturales de la betterave sucrière et de la pomme de terre pour des exemples.

## Pi : Quantité d'azote absorbé par la culture à l'ouverture du bilan

En général, il y a une liaison étroite entre **Pi** et la quantité de biomasse végétale produite à l'ouverture du bilan. Ce terme dépend donc de l'état de croissance du peuplement au moment où le calcul de la dose d'engrais azoté est effectué. Pour les cultures d'hiver, il s'agit de l'azote absorbé en automne qui peut représenter des quantités non négligeables d'azote et doit venir au moins en partie en déduction du besoin d'azote total **Pf**. Par exemple, **Pi** peut représenter jusqu'à 50-60 kg N/ha pour le blé tendre d'hiver et varie de 25 à plus de 150 kg N/ha pour le colza d'hiver. Certains outils proposent pour quelques cultures d'estimer **Pi** par le biais de mesure du couvert en place (mesure in situ ou par capteur). Ces points seront détaillés dans les fiches cultures.

### Exemple de mise en place de référentiel de mesure de Pi : le colza d'hiver par le CETIOM

Depuis 1997, le colza d'hiver bénéficie de recherches constantes pour mettre à la disposition des techniciens et des agriculteurs des outils pratiques d'estimations de **Pi**. En effet, de par le potentiel de croissance de cette culture à l'automne, l'estimation de **Pi** est capitale pour réaliser un calcul correct de dose d'azote à apporter. De plus, dans les régions où le risque de gel de feuilles vertes est élevé pendant l'hiver, il est recommandé de réaliser une détermination à l'entrée de l'hiver (avant le gel) et à l'ouverture du bilan (sortie hiver). C'est la moyenne des deux mesures qui sera utilisée pour le calcul de **Pi**. En effet, des travaux ont montré qu'environ la moitié de l'azote contenu dans les feuilles vertes gelées était minéralisé et réabsorbé par la culture au printemps. 4 méthodes ont successivement été élaborées et diffusées par le CETIOM et ses partenaires en vue de réaliser des mesures à la parcelle ou de constituer des réseaux de références annuelles :

**La méthode complète**, consistant à réaliser de véritables mesures de biomasses sèches et de teneurs en azote dans les parcelles. Elle est précise mais particulièrement lourde à appliquer en situation réelle (hors parcelles expérimentales). Son développement est donc très limité.

**La méthode légère**, issue de la réglette colza et consistant à réaliser des pesées de biomasses fraîches converties en quantité d'azote prélevé par la culture. Elle est moins précise mais aussi plus facile à mettre en œuvre. Elle est appliquée sur 29 % des surfaces de colza (source : enquête nationale culture CETIOM 2008).

**La méthode très légère**, issue elle aussi de la réglette colza et consistant à estimer visuellement la biomasse fraîche et à la convertir en quantité d'azote prélevé par la culture. Elle est encore moins précise, en particulier pour des valeurs de **Pi** supérieures à 80 kgN/ha, mais rapide à mettre en œuvre. Elle est appliquée sur 54 % des surfaces de colza (source : enquête nationale culture CETIOM 2008).

**La méthode satellitaire**, permettant une estimation de l'azote absorbé par le biais de la télédétection. Elle est précise et facile à mettre en œuvre mais soumise aux contraintes logistiques de l'utilisation d'images satellitaire. Appliquée depuis 2000, elle représente actuellement 9 % des surfaces de colza (source : enquête nationale culture CETIOM 2008).

**Cf. méthode détaillée sur le site du COMIFER [www.comifer.asso.fr](http://www.comifer.asso.fr)**



Exemple de référentiel Pi :

Quantité d'azote absorbé par les céréales d'hiver à l'ouverture du bilan

Nombre de talles	Pas de talle	1	2	3	4	5
Pi (en kg d'N/ha)	10	15	20	25	30	35

5 kg d'N/ha par talle supplémentaire.

En cas de fort tallage, la valeur est plafonnée à 50 kg d'N/ha

Source : ARVALIS - Institut du végétal, Azobil / Azofert, INRA / LDAR, 2012

**Note bilan dynamique :** Certains outils proposent d'estimer Pi pour différentes cultures par le biais de modèles de croissance prenant en compte les conditions météorologiques précédant la date d'ouverture du bilan prévisionnel.

## Ri : Quantité d'azote minéral dans le sol à l'ouverture du bilan

La pratique agronomique a consacré le vocable « Reliquat Azoté » pour désigner le terme Ri. Si le bilan est ouvert à la fin de l'hiver (pratique classique pour une céréale d'hiver par exemple), il prend souvent le nom de Reliquat Sortie Hiver.

### Mesure de Ri sur chaque parcelle

**La fraction nitrique** du reliquat est à prendre en compte sur la profondeur d'enracinement maximale de la culture (en proportion à moduler en fonction de la densité d'enracinement pour certaines cultures affichant des profils racinaires très hétérogènes). **La fraction ammoniacale** est à prendre en compte sur les 40 premiers centimètres de sol uniquement, épaisseur représentant approximativement la zone d'activité microbiologique. Par exemple, pour un reliquat mesuré par horizon de 30 cm d'épaisseur, on prend en compte la totalité du 1er horizon plus un tiers du 2<sup>ème</sup> horizon (si il a été exploré). Attention, des valeurs élevées de la fraction ammoniacale peuvent avoir des origines non agronomiques (mauvaise conservation des échantillons, pollution lors de l'échantillonnage par exemple). Leur prise en compte doit être validée par l'un ou l'autre des événements suivants :

- apport organique récent.
- retournement récent de prairie, jachère ou culture intermédiaire.
- anoxie du sol (le manque d'oxygène ne bloquant pas la minéralisation de l'azote organique mais inhibant la nitrification, on assiste alors à une accumulation de la forme ammoniacale).

Pour être valables, tous les termes du bilan doivent être calculés/mesurés/évalués à la même date. Ainsi, la date de prélèvement et donc de mesure de **Ri** est aussi la date d'ouverture du bilan. **Pour les cultures d'hiver**, il est recommandé d'ouvrir le bilan avant tout apport minéral ou organique sur la culture et de préférence après la phase de drainage la plus importante. **Pour les cultures de printemps**, il est recommandé d'ouvrir le bilan avant le semis et aussi avant les apports organiques ou minéraux.

La date de mesure de **Ri** doit être prise en compte dans la détermination de tous les autres termes de minéralisation afin de ne pas compter des fournitures d'azote en doublon.

La mesure du reliquat azoté doit être réalisée sur la profondeur potentielle d'enracinement. Celle ci dépend de la culture et du type de sol. De plus, il faut souligner que **Ri** se calcule à partir de teneurs mesurées en laboratoire sur un prélèvement ramené au volume global de sol analysé terre fine + éléments grossiers (cailloux, graviers). Ainsi, un bon calcul de **Ri** doit prendre en compte la densité apparente globale des horizons explorés. En l'absence de mesure, des référentiels de densités apparentes sont disponibles pour les principaux types de sols en France. Les formules [6] et [6bis] fournissent les éléments de calcul pour passer d'une teneur en azote minéral mesurée sur la terre fine en laboratoire au stock d'azote minéral calculé pour la couche de terre correspondante :

**[6] Stock Nmin = Teneur Nmin x Ep x DaG / 10**

Avec : Stock Nmin en kgN/ha

Teneur Nmin en mg/kg Terre Sèche

Ep = épaisseur de la couche explorée en cm

DaG = densité apparente globale de la couche de sol considérée (t/m<sup>3</sup>)

**[6bis] DaG = Da x (100 - % vol EG) / 100**

Avec : Da = densité apparente de la terre fine (t/m<sup>3</sup>)

% vol EG = % volumique d'éléments grossiers (cailloux) de l'horizon considéré

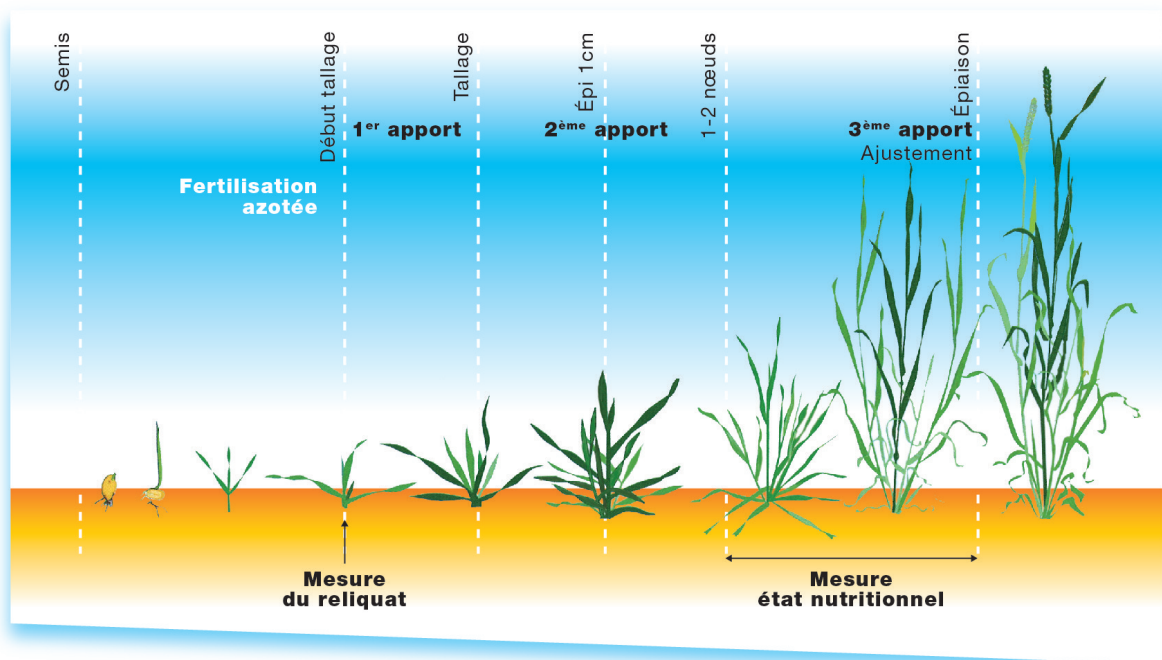
Le tableau 1 fournit des exemples de calculs de stock d'azote.

		Situation 1 : 1er horizon d'un sol limoneux sans cailloux		Situation 2 : 1er horizon d'un sol limoneux avec cailloux	
Da terre fine		1,4		1,4	
% volumique cailloux		0		20	
DaG		1,4		1,12	
Teneur en mg/kg Terre Sèche		Stock en kgN/ha sur une couche de 30 cm		Stock en kgN/ha sur une couche de 30 cm	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
3,2	2,5	13	11	11	8
2,6	0,9	11	4	9	3
5,8	0,2	24	1	19	1

**Tableau 1** : exemple de calcul de stock d'azote sous 2 hypothèses de DaG pour une couche de sol de 30 cm.

## Constitution d'un observatoire de Ri

Ils sont souvent établis par un organisme disposant localement de réseaux de parcelles analysées constituant un observatoire suffisant. Il s'agit de constituer des références valables pour les principaux types de situations locales (culture, précédent, type de sol, restitutions organiques...).



Les parcelles correspondant à des situations complexes non représentées dans la typologie (parcelles atypiques comme celles précédées d'un retournement de prairie, avec apports de PRO inhabituels...), doivent de préférence faire l'objet d'une mesure.

Exemple d'un observatoire de Ri (LDAR, Chambre d'Agriculture de l'Aisne)

Synthèse des reliquats azotés moyens mesurés sur le département de l'Aisne en sortie hiver 2013

Attention, ces valeurs sont des moyennes indicatives. Des écarts importants peuvent être observés entre les parcelles.



CRANETTES ET CRAIES

culture en place / précédent	nombre parcelles	reliquat d'azote minéral (kg N/ha)		TOTAL
		0-30 cm	30-60 cm	
bié / pailles enlevées	6	19	15	17
bié / betteraves	31	24	17	14
bié / pois protéagineux	5	12	9	26
bié / colza	17	19	12	18
bié / maïs grain	3	18	11	17
labour / pailles enlevées + CIPAN	16	23	24	20
labour / pailles enlevées + fumier + CIPAN	16	25	26	20
labour / pailles enfouies	5	19	16	12
labour / pailles enfouies + CIPAN	31	22	17	12
labour / pailles enfouies + vinasses août-sept + CIPAN	23	24	25	18
labour / pailles enfouies + fientes + CIPAN	5	23	21	17
labour / pailles enfouies + MOF* + CIPAN	44	24	24	19
labour / pailles enfouies + type humocal + CIPAN	8	22	19	19

\* MOF = Matière organique fermentescible (vinasses, lisier, fientes, boues urbaines)

SOLS FILTRANTS (sables profonds, sables limoneux profonds, sables calcaires, matériaux sableux sur grève et sur calcaire dur)

culture en place / précédent	nombre parcelles	reliquat d'azote minéral (kg N/ha)		TOTAL
		0-30 cm	30-60 cm	
bié / betteraves	10	16	8	7
bié / maïs grain	6	11	6	14
bié / colza	19	14	8	14
bié / pois protéagineux	6	14	11	16
bié / tourmesol	4	10	5	6
escourgeon / pailles enfouies	4	16	7	8
labour / pailles enfouies + CIPAN	5	19	10	8
labour / pailles enfouies + CIPAN	24	13	11	9
labour / pailles enfouies + MOF* + CIPAN	6	18	15	14

Synthèse réalisée par la Chambre d'Agriculture de l'Aisne, l'INRA et le Laboratoire Départemental d'Analyses et de Recherche avec le financement du Conseil Général et du projet Interreg SUN



Synthèse des reliquats azotés moyens mesurés sur le département de l'Aisne en sortie hiver 2013

Attention, ces valeurs sont des moyennes indicatives. Des écarts importants peuvent être observés entre les parcelles.



SOLS PROFONDS

culture en place / précédent	nombre parcelles	reliquat d'azote minéral (kg N/ha)		TOTAL
		0-30 cm	30-60 cm	
bié / betteraves	241	15	9	8
bié / lin fibre	13	12	9	13
bié / maïs grain	72	14	11	14
bié / pois protéagineux	13	15	11	14
bié / céréales pailles enfouies	46	15	11	15
bié / feverole résidus enfouis	41	15	11	15
bié / pomme de terre féculé	17	16	11	16
bié / maïs fourrage	43	16	13	15
bié / céréales pailles enlevées	40	15	13	18
bié / colza résidus enfouis	160	18	12	16
bié / pomme de terre consommation	45	16	16	23
bié / oignon	7	18	15	27
bié / pois et haricots de conserve	14	17	18	31
escourgeon / pailles enlevées	17	17	11	12
escourgeon / pailles enfouies	19	16	11	11
colza / pailles enlevées	20	21	10	10
colza / pailles enfouies	22	15	8	8
orge de printemps / betterave	9	15	12	10
labour / pailles enlevées	18	14	12	14
labour / pailles enlevées + CIPAN	156	18	17	13
labour / pailles enlevées + fumier bovins	8	19	21	21
labour / pailles enlevées + fumier bovins + CIPAN	134	23	19	15
labour / pailles enfouies	38	15	15	16
labour / pailles enfouies + CIPAN	277	16	15	13
labour / pailles enfouies + vinasses août-sept + CIPAN	110	20	21	18
labour / pailles enfouies + vinasses août-sept + écumés + CIPAN	27	22	24	17
labour / pailles enfouies + écumés + CIPAN	20	20	18	14
labour / pailles enfouies + fientes + CIPAN	63	18	16	13
labour / pailles enfouies + compost déchets verts + CIPAN	46	18	17	14
labour / pailles enfouies + compost déchets verts + CIPAN	25	19	21	15
labour / pailles enfouies + MOF* + CIPAN	329	20	19	16
labour / pailles enfouies + type humocal + CIPAN	76	21	20	16
labour / maïs grain	45	14	12	13
maïs / maïs grain	33	17	13	13
maïs / maïs fourrage	32	21	13	15
maïs / maïs fourrage + fumier	8	21	17	20

\* MOF = Matière organique fermentescible (vinasses, lisier, fientes, boues urbaines)

Synthèse réalisée par la Chambre d'Agriculture de l'Aisne, l'INRA et le Laboratoire Départemental d'Analyses et de Recherche avec le financement du Conseil Général et du projet Interreg SUN



### Utilisation d'un modèle d'estimation de Ri

Plusieurs outils disponibles sur le territoire français proposent d'estimer le terme **Ri** par le biais de modèles agro-climatiques. Ils font généralement appel à une estimation du drainage et des sources d'azote minéral disponibles (stock d'azote minéral à la récolte du précédent, minéralisation des matières organiques...). Le recours à de tels modèles peut être une solution pour estimer le poste Ri dans des milieux où une mesure n'est pas aisément réalisable, ou en cas d'absence d'observatoire permettant d'extrapoler quelques mesures ponctuelles à l'ensemble des situations culturales.

Pour la conception d'un tel modèle, on se reportera au chapitre 7 afin de respecter la rigueur nécessaire à la conception d'un outil robuste.

### Minéralisation nette de l'humus du sol Mh

Le terme Mh dépend du stock d'azote organique humifié du sol dont une partie se minéralise à une vitesse qui dépend des conditions climatiques (température et humidité du sol) et de caractéristiques du sol.

Dans sa plus simple expression, Mh peut être représentée sous la forme de l'équation [7] :

$$[7] \quad Mh = TNorg \times Km \times JN$$

Avec : **TNorg** = stock d'azote organique humifié de la couche minéralisante (tNorganique/ha)

**Km** = taux de minéralisation de l'azote organique humifié  
(kg Nminéral/(tNorganique x JN))

**JN** = nombre de jours normalisés sur la période de calcul du bilan

Not. : **Vp** = **TNorg** x **Km** = vitesse potentielle de minéralisation exprimée en kgNmin/ha/JN

#### Estimation de TNorg

En toute rigueur, le stock d'azote organique humifié de la couche minéralisante du sol **TNorg** (tN/ha) est calculé à partir d'une analyse de sol récente (5 ans maximum) à l'aide de l'équation [8] :

$$[8] \quad TNorg = \%Nt \times Prof \times Da \times (100 - \% Vol EG) / 100$$

Avec : **%Nt** = teneur en azote organique<sup>5</sup> de la terre fine de la couche de sol minéralisante exprimée en %, directement déterminée par l'analyse de sol.

**Prof** = profondeur de la couche de sol minéralisante en cm. Elle correspond approximativement à la profondeur de labour. Pour les situations en non labour différenciées depuis plus de 10 ans, on prendra par défaut la profondeur équivalente à un labour dans le type de sol correspondant.

**Da** : densité apparente (de la terre fine) de la couche minéralisante

**% Vol EG** : volume de la couche de sol minéralisante occupé par les éléments grossiers (taille > 2 mm), exprimé en %. On peut remplacer l'expression contenant Da et % Vol. EG par DaG (cf. équation [6bis]).

Si on ne dispose pas d'analyse de sol récente comportant Nt, on peut :

- Soit estimer Nt à partir de la teneur en carbone (C en %) ou, à défaut, en matière organique (MO en %) si cette analyse est récente, en considérant un rapport C/N de la matière organique humifiée de 9 et en connaissant le taux de conversion de C en MO (1.72 ou 2 selon les laboratoires).

<sup>5</sup> Une analyse de sol classique (méthode Kjeldahl) mesure la teneur en azote total (organique+minéral). Etant donné la faible proportion relative de l'azote minéral dans le volume de terre de l'horizon minéralisant, on assimile cette mesure à la teneur en azote organique.



- Soit se référer à un référentiel de type de sol local. Cette dernière option est bien entendue la plus imprécise, surtout si le système de culture pratiqué sur la parcelle est particulier en terme de dynamique de la matière organique (présence de prairie dans l'assolement, apports massifs de PRO...).

### Estimation de Km

Le taux de minéralisation de l'azote organique humifié Km a fait l'objet de nombreux travaux.

$$[9] \quad Km = Km_{standard} \times F_{syst}$$

Avec :  $Km_{standard}$  = taux de minéralisation de l'azote organique humifié standard (kg Nminéral/(tNorganique x JN))

$F_{syst}$  = facteur d'augmentation du pool d'azote organique rapidement minéralisable sous l'effet du régime de restitution organique du système de culture.

Dans les systèmes de culture à fortes restitutions organiques stabilisés depuis au moins 10 ans, la minéralisation basale est plus importante. Les apports réguliers de produits organiques contribuent à augmenter la quantité d'azote organique humifiée du sol. Cette augmentation est variable, notamment selon la quantité et la nature de ces apports : les produits qui se minéralisent rapidement (faible rapport C/N) contribuent peu au stockage d'azote, contrairement aux produits plus riches en carbone. Quelque soit le régime des apports organiques sur la parcelle, l'effet azote ne peut s'appréhender qu'au travers d'une modification de la taille et de la qualité du pool organique humifié c'est-à-dire une augmentation de la fraction d'azote organique humifié facilement minéralisable. On prend en compte ce phénomène en appliquant un facteur multiplicatif supplémentaire, le facteur système **FSyst**. Des valeurs de **FSyst** sont proposées dans le tableau 2. Notons que l'avancée des études sur l'impact à long terme de l'implantation de couverts intermédiaires sur les fournitures d'azote par le sol pourrait, à l'avenir, amener à introduire ce critère dans le tableau de détermination de **FSyst**. De même, la prise en compte des retournements de prairie sur **Mh** (cf. paragraphe sur le **Mhp**) peut être considérée comme un cas particulier de **FSyst**.

Fréquence des apports organiques Résidus exogènes de récolte	Jamais	5-10 ans		3-4 ans		1-2 ans		Facteurs multiplicateurs en +	
		A	BC	A	BC	A	BC	Retourne-ment prairie	CI
Enlevés-brûlés	0,80	0,95	0,90	1,00	0,95	1,05	1,00	1,1	En cours d'étude
Enfouis 1 an sur 2	0,90	1,00	0,95	1,05	1,00	1,10	1,02	1,1	
Enfouis tous les ans	1,00	1,05	1,00	1,10	1,02	1,20	1,05	1,1	

Types de produits : A = fumiers et composts (décomposition lente) ; B et C = autres, ainsi que les fumiers de volaille (décomposition rapide). Dans le cas où plusieurs types de produits sont apportés (des A et des BC), alors on privilégie les types A. CI = couverts intermédiaires.  
**Tableau 2** : Valeurs du facteur système **FSyst** selon différents systèmes de cultures.  
 Source : Azofert, 2005 (INRA)



**ATTENTION** : par rapport à la précédente brochure, l'utilisation du facteur système **FSyst** remplace l'utilisation du terme de minéralisation spécifique lié à des arrière-effets d'apports de PRO (le terme **Mha**). Néanmoins, dans les régions n'ayant pas encore développé de référentiel de **FSyst**, l'utilisation d'un référentiel de type **Mha** paramétré localement reste pertinente. La détermination des valeurs de **Mha** doit toutefois avoir bénéficié de l'apport des travaux récents en termes d'ordre de grandeur à donner aux arrière-effets d'apports répétés de PRO sur une parcelle.

$Km_{standard}$  est calculé à l'aide de l'équation [10] :

$$[10] \quad Km_{standard} = 22750 / [(110+A) \times (600+CaCO_3)]$$

Avec : A = teneur en argile après décarbonatation de l'horizon minéralisant (g/kg)

CaCO<sub>3</sub> = teneur en calcaire de l'horizon minéralisant (g/kg)

En référence aux travaux historiques de Hébert et Rémy-Hébert, cette équation est connue sous le terme de « formule du K2 ». La détermination de  $Km_{standard}$  est aisée car les informations sur la granulométrie sont pérennes à l'échelle du temps agricole et sont facilement accessibles par l'analyse de sol ou par le recours à des référentiels de types de sols locaux.

**Remarque n°4** : Du fait de la linéarité de la relation  $Mh = f(TNorg)$ , il est utile de borner le résultat du produit  $TNorg * Km$  dans les sols à forte teneur en azote organique et pour des valeurs extrêmes d'argile et/ou de CaCO<sub>3</sub>.

### Estimation de JN

**JN** représente la durée sur laquelle est calculée **Mh** (entre l'ouverture et la fermeture du bilan) établie en fonction de conditions de températures et d'humidité de l'horizon minéralisant du sol. En toute rigueur, c'est le nombre de Jours Normalisés (cf. préambule du chapitre sur le bilan dynamique) cumulés entre l'ouverture et la fermeture du bilan. Pour réaliser une estimation de **JN** dans un bilan prévisionnel statique, on procède de deux façons selon les références à disposition :

- Si on dispose de références de **JN** moyen ou médian en fonction des cultures dans des situations pédo-climatiques données, on utilise directement ces valeurs dans les calculs. De telles valeurs sont utilisées dans les calculs détaillés plus bas (tableau 3).
- Si on ne dispose pas de telles références, on peut estimer **JN** en faisant l'hypothèse que les conditions d'humidité du sol dans l'horizon minéralisant ne sont pas limitantes et en calculant uniquement un effet température  $Ft$  à partir de la fonction températures des jours normalisés sur la période de présence de la culture représentée par un **CoefTemps**. La prise en compte de l'irrigation (cf. remarque 5) est possible par l'emploi d'un terme **Firr**. La production d'abaques de valeurs médianes ou moyennes est alors possible. L'hypothèse d'humidité non limitante fait néanmoins courir le risque de surestimer **JN** et donc de surévaluer le poste **Mh** par rapport à la réalité de la situation agronomique considérée.

**Remarque n°5** : quel que soit le mode de calcul de **JN**, il doit prendre en compte les pratiques d'irrigation qui modifie l'humidité de la couche minéralisante.

**Exemples pratiques de calculs de Mh** --> Retrouvez l'outil de calcul Mh sur [www.comifer.asso.fr](http://www.comifer.asso.fr)

Prenons l'exemple d'une parcelle de blé tendre d'hiver en régions Picardie ou Pays de La Loire, dont le bilan s'ouvre le 15 février (date du prélèvement du reliquat sortie hiver Ri) et se ferme le 01 juillet (fin de la période d'absorption d'azote par la culture). On constate que, toute chose égale par ailleurs, le climat local influence de façon significative les quantités d'azote minéralisées.

	Limon sain Poste météo ABBEVILLE			Limon sain Poste météo LA JAILLIERE	
	Situation 1	Situation 2		Situation 1	Situation 2
	1,7% MO	3% MO		1,7% MO	3% MO
%Nt	0,11	0,174	%Nt	0,11	0,174
Prof	30	30	Prof	30	30
DaG	1,5	1,5	DaG	1,5	1,5
<b>TNorg</b>	<b>4,95</b>	<b>7,83</b>	<b>TNorg</b>	<b>4,95</b>	<b>7,83</b>
A	170	170	A	170	170
CaCO3	0	0	CaCO3	0	0
Fsyst	1,1	1,1	Fsyst	1,1	1,1
<b>Km standard</b>	<b>0,14</b>	<b>0,14</b>	<b>Km standard</b>	<b>0,14</b>	<b>0,14</b>
Km	0,15	0,15	Km	0,15	0,15
<b>JN</b>	<b>44</b>	<b>44</b>	<b>JN</b>	<b>54</b>	<b>54</b>
<b>Mh</b>	<b>32</b>	<b>51</b>	<b>Mh</b>	<b>40</b>	<b>63</b>

**Tableau 3** : valeurs de Mh pour la culture de blé tendre d'hiver sur un limon sain en région Picardie et Pays de La Loire. Sources données météo : METEO France (ABBEVILLE) et ARVALIS - Institut du végétal (LA JAILLIERE).

**Note bilan dynamique** : selon les formalismes retenus, **Mh** est relié linéairement à l'échelle de temps en **Jours Normalisés**. Ainsi, les outils utilisant un bilan dynamique peuvent calculer **JN** de façon prévisionnelle à l'ouverture du bilan (voir l'actualiser en cours de campagne) pour estimer le terme **Mh** conformément aux conditions d'humidité du sol et de température de l'année.

## Mhp : Minéralisation nette supplémentaire due aux retournements de prairies

La destruction de prairies s'accompagne d'une minéralisation intense d'azote provenant des "résidus des plantes" (> 2 mm) et de "matières macro-organiques" (0,2 à 2 mm) qui représenteraient 80 % de l'azote du système sol-plante à la destruction des couverts (soit beaucoup plus que le compartiment représenté par les résidus de prairie). Cet effet correspond dans le bilan d'azote au terme **Mhp** dont la valeur dépend de la conduite et l'âge de la prairie au moment de sa destruction.. Des études récentes ont permis d'établir une estimation de **Mhp** (tableaux 4a et 4c).

Les tableaux 4a à 4c permettent une estimation du poste **Mhp** en quatre étapes :

- **Situer la période de destruction** : printemps (tableau 4a) ou automne (tableau 4b). Dans le premier cas, nous faisons l'hypothèse que le maïs est la culture suivante la plus fréquente alors que dans le second, c'est le blé d'hiver qui est le plus représenté.
- **Prendre en compte l'âge de la prairie et le rang de la culture sur laquelle porte l'estimation de Mhp**. L'âge de la prairie à sa destruction est l'élément déterminant de la quantité d'azote minéralisée. Les études récentes au champ ont permis de montrer que ce supplément de minéralisation n'est effectif que pendant une durée ne dépassant pas 1 an et demi après la destruction de la prairie.
- **Considérer l'espèce et le mode de conduite** : l'augmentation de la part de fauche dans le calendrier d'exploitation de la prairie diminue la minéralisation post-destruction. Cependant cet effet n'est sensible que sur les prairies de graminées pures : le tableau 4c propose un coefficient modérateur de la quantité précédemment estimée.
- **Affecter le poste "Mh" d'un facteur multiplicatif 1.1**. Ceci permet de rendre compte de l'hypothèse d'une plus grande fraction active de l'humus dans les systèmes incluant fréquemment des prairies temporaires. Notons qu'une analyse de terre permettant de mesurer %Nt dans les années suivant le retournement est nécessaire pour estimer convenablement **Mh**.

Bien évidemment, ce poste **Mhp** ne constitue pas la totalité de l'effet azote lié à la destruction de prairie. Celle-ci influence également la quantité d'azote minéral présent dans le sol à l'ouverture du bilan (**Ri**). Il est recommandé de réaliser la mesure de **Ri** dans les parcelles concernées.

**Attention**, il n'y a pas à prendre en compte un effet précédent prairie au titre du poste **Mr** (Minéralisation des résidus de culture précédent). **Mhp** représente le supplément global de minéralisation dû à la fois aux résidus de culture et aux autres compartiments organiques plus ou moins bien identifiés.

#### Remarque n°6 :

- Les valeurs des tableaux 4 intègrent la prise en compte de JN, en particulier pour la culture de rang 1.
- Les luzernières ne sont pas considérées comme des prairies : l'évaluation de leur effet azote est pris en charge par le poste **Mr**.

a - Destruction de printemps			Age de la prairie				
			< 18 mois	2-3 ans	4-5 ans	6-10 ans	> 10 ans
Rang de la culture post destruction	1	maïs	20	60	100	120	140
	2	maïs ou blé	0	0	25	35	40
	3	maïs ou blé	0	0	0	0	0

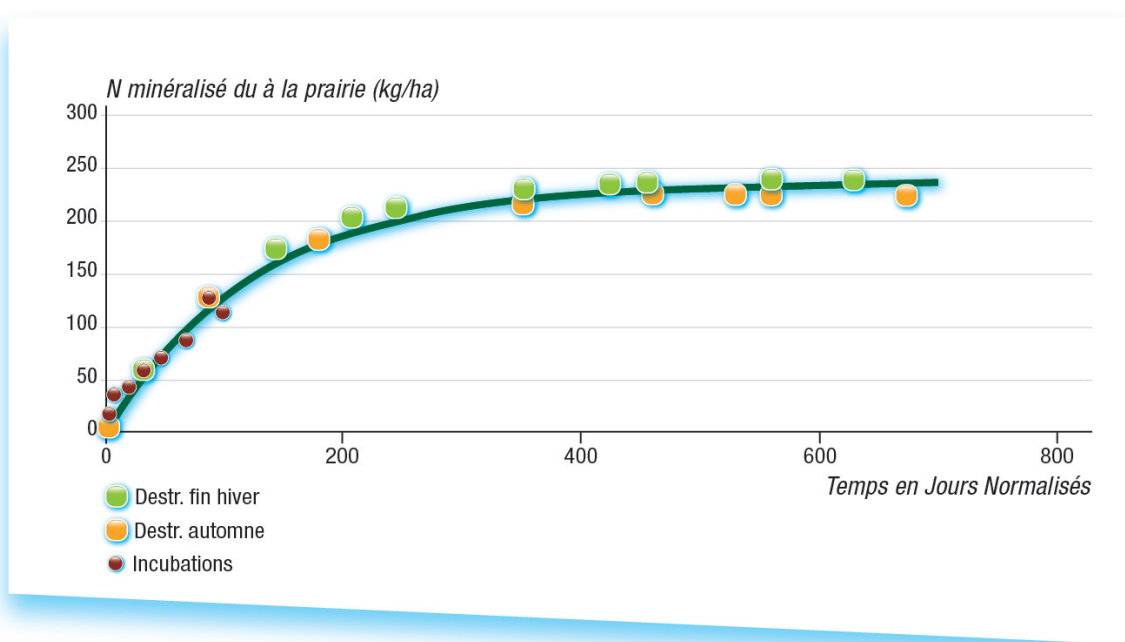
b - Destruction d'automne			Age de la prairie				
			< 18 mois	2-3 ans	4-5 ans	6-10 ans	> 10 ans
Rang de la culture post destruction	1	blé	10	30	50	60	70
	2	maïs ou blé	0	0	0	0	0
	3	maïs ou blé	0	0	0	0	0

**Tableaux 4a et 4b** : effets azote prairie sur le supplément de minéralisation (Mhp en kg N/ha). Les valeurs représentent le supplément de minéralisation pour la période d'établissement du bilan azoté prévisionnel de chaque culture (semis - récolte pour le maïs, 15 février - récolte pour le blé). Sources : ARVALIS - Institut du végétal, INRA, CRAB.

Les valeurs mentionnées dans les tableaux 4a et 4b sont à multiplier par les valeurs suivantes selon la proportion de fauches dans le mode d'exploitation de la prairie de RGA pur :	Effet du mode d'exploitation	
	RGA pur	Association RGA - TB
Pâturage intégrale	1,0	1,0
Fauche + pâturage	0,7	1,0
Fauche intégrale	0,4	1,0

**Tableau 4c** : prise en compte du mode d'exploitation dans le calcul de Mhp. Sources : ARVALIS - Institut du végétal, INRA, CRAB.

**Note bilan dynamique** : certains outils proposent de calculer Mhp à partir d'équations de minéralisation des prairies retournées exprimées en fonction de JN. Un exemple du type de relation mathématique utilisable est fourni dans la figure ci-contre :



## Mr : minéralisation des résidus de culture du précédent

Mr est le poste qui permet de prendre en compte le supplément de minéralisation lié à la décomposition des résidus de culture du précédent cultural (racines, tiges, feuilles). Les valeurs négatives correspondent aux résidus ayant un rapport C/N élevé qui entraînent une organisation importante de l'azote minéral du sol. Les tableaux 5 et 6 fournissent des valeurs standard de ce poste pour une ouverture du bilan en février-mars.

Les valeurs doivent être minorées ou majorées selon que le bilan serait ouvert plus tard ou plus tôt (plus ou moins grande partie des quantités d'azote minéralisé déjà prise en compte dans le poste Ri).

Nature du précédent	Mr (kgN/ha)	
	Ouverture du bilan en sortie hiver	Ouverture du bilan en Avril*
Betterave	20	10
Carotte	10	0
Céréales pailles enfouies	-20	-10
Céréales pailles enlevées ou brûlées	0	0
Colza	20	10
Endive	10	0
Féverole	30	20
Lin fibre	0	0
Luzerne (retournement fin été/début automne): année n+1	40	30
Luzerne (retournement fin d'été/début automne): année n+2	20	20
Luzerne (retournement printemps)		
Maïs fourrage	0	0
Maïs grain	-10	0
Pois protéagineux	20	10
Prairie	0	0
Pois, Haricots de conserve	20	10
Pomme de terre	20	10
Tournesol	-10	0
Ray-Grass dérobé	-10	0
Soja	20	10

\* Date d'ouverture du bilan dans certains cas pour des cultures d'été (Maïs, Pomme de Terre...)

**Tableau 5 :** Poste Mr (kgN/ha) en fonction de la nature des résidus de la culture précédente. Sources : ARVALIS - Institut du végétal, INRA, 2012.

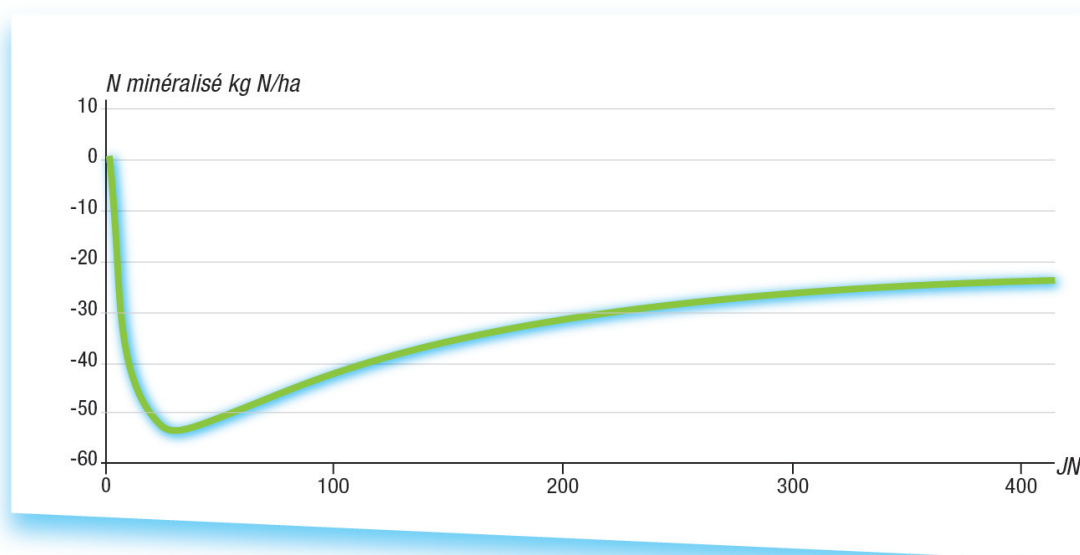
**Cf annexe 1 référence Mr : Minéralisation des résidus de culture du précédent (cas d'une culture précédée d'une culture légumière dans la même année)**

Type de jachère (espèce dominante)	âge	Période de destruction/ Culture suivante		
		Fin été/ hiver	Fin été/ printemps	Fin hiver/printemps
Graminée	Moins de 1 an	10	5	10
	Plus de 1 an	20	15	20
légumineuse	Moins de 1 an	20	15	20
	Plus de 1 an	40	30	40
Graminée + légumineuse	Moins de 1 an	15	10	15
	Plus de 1 an	30	25	30

**Tableau 6 :** Mr en fonction de la nature des résidus de jachère précédente (kgN/ha)

**Source :** D'après la Brochure Calcul de la fertilisation azotée des cultures annuelles, COMIFER, 1996, modifié par l'INRA et ARVALIS.

**Note bilan dynamique** : certains outils proposent de calculer  $M_r$  à partir d'équations de minéralisation des résidus de cultures exprimées en fonction de  $JN$ . Un exemple du type de relation mathématique utilisable est fourni dans la figure ci-contre :



Source : modèle issu de Justes et al. 2009 (modèle issu de Justes et al. 2009 (5 tMS/ha de pailles de blé enfoui avec un C/N = 85)).

## MrCi : minéralisation des résidus de culture intermédiaire

La minéralisation des résidus de cultures intermédiaires est rapide et est quasi-achevée au bout d'une période allant de quelques semaines à quelques mois. Cette vitesse de minéralisation est d'autant plus élevée que le résidu est riche en azote. Il est donc nécessaire de prendre en compte le niveau de croissance (qui joue sur la quantité d'azote absorbé et la teneur en azote de la biomasse à décomposer), ainsi que le délai séparant la date de destruction de la date d'ouverture du bilan prévisionnel. En effet, si ce délai est important (cas d'une destruction précoce) la décomposition de la CI sera déjà très avancée à la date d'ouverture du bilan : le supplément de minéralisation  $M_{rCi}$  sera donc plus faible. Bien évidemment ceci sera compensé par un accroissement plus sensible de la quantité d'azote minéral présent dans le sol à la même date ( $R_i$ ), objet d'un autre poste du bilan prévisionnel.

Les critères retenus pour estimer la contribution des cultures intermédiaires à la nutrition azotée de la culture suivante sont (tableau 7) :

- l'espèce (graminées, crucifères,...)
- le niveau de croissance ; Cf site du COMIFER [www.comifer.asso.fr](http://www.comifer.asso.fr) : *Outil visuel d'estimation de la biomasse des couverts intermédiaires.*
- la date de destruction ;
- la date d'ouverture du bilan.



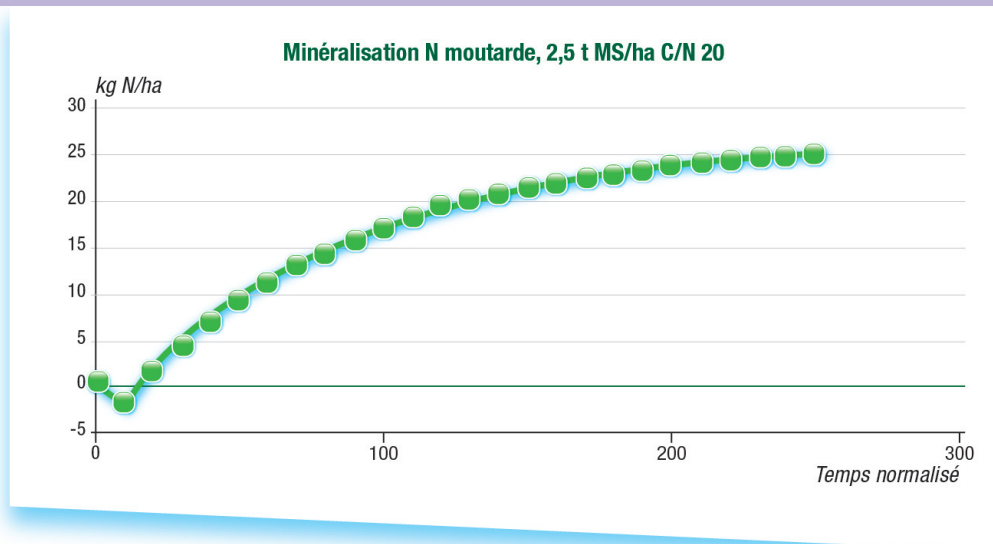
	Production de la CI (tMS/ha)	Ouverture du bilan en sortie hiver		Ouverture du bilan en Avril*	
		Destruction Nov/dec	Destruction>Janv	Destruction Nov/dec	Destruction>Janv
CRUCIFERES (moutarde, radis, ...)	<= 1	5	10	0	5
	2 (>1 et <3)	10	15	5	10
	>= 3	15	20	10	15
GRAMINÉES DE TYPE SEIGLE, AVOINE,...	<= 1	0	5	0	0
	2 (>1 et <3)	5	10	0	5
	>= 3	10	15	5	10
GRAMINÉES DE TYPE RAY-GRASS	<= 1	5	10	0	5
	2 (>1 et <3)	10	15	5	10
	>= 3	15	20	10	15
LÉGUMINEUSES	<= 1	10	20	5	10
	2 (>1 et <3)	20	30	10	20
	>= 3	30	40	20	30
HYDROPHYLLACEES (Phacélie)	<= 1	0	5	0	0
	2 (>1 et <3)	5	10	0	5
	>= 3	10	15	5	10
MÉLANGES GRAMINÉES - LÉGUMINEUSES	<= 1	5	13	3	5
	2 (>1 et <3)	13	20	5	13
	>= 3	20	28	13	20
MÉLANGES CRUCIFÈRES - LÉGUMINEUSES	<= 1	8	15	3	8
	2 (>1 et <3)	15	23	8	15
	>= 3	23	30	15	23

\* Date d'ouverture du bilan dans certains cas pour des cultures d'été (Maïs, Pomme de Terre)

Source: Brochure "Cultures Intermédiaires - Impacts et Conduite", ARVALIS/CETIOM/ITB/ITL, août 2011 (chapitre 17)

**Tableau 7** : Poste MrCi (kgN/ha) en fonction de la nature des résidus de la culture intermédiaire. (1) un niveau de croissance élevé se caractérise par une biomasse des parties aériennes supérieure à environ 3,0 t ms/ha. Sources : ARVALIS - Institut du végétal, INRA.

**Note bilan dynamique** : certains outils proposent de calculer MrCI à partir d'équations de minéralisation des résidus de cultures exprimées en fonction de JN. Un exemple du type de relation mathématique utilisable est fourni dans la figure ci-contre :



Source : AZOFERT - INRA

## Fournitures d'azote par les PRO

Selon l'équation du bilan prévisionnel utilisée (cf. chapitre 2), on utilisera soit les termes  $M_{pro1}$ ,  $M_{pro2}$  et  $X_{pro}$ , soit le terme d'effet direct  $X_a$ . En pratique, l'utilisation du terme  $X_a$  est la plus répandue. L'utilisation des termes  $M_{pro1}$ ,  $M_{pro2}$  et  $X_{pro}$  est pour l'instant cantonnée à certains outils de calculs.

**Remarque n°7 :** compte tenu de la forte variabilité des valeurs observées autour des compositions moyennes des produits (cf. chapitre 4), il est toujours préférable de disposer de mesures réalisées sur le produit épandu sous réserve d'un bon échantillonnage de celui-ci. Au minimum, les paramètres nécessaires à sa caractérisation sont les suivants :

- teneur en matière sèche
- teneur en carbone
- teneur en azote total
- teneur en azote minéral (azote ammoniacal essentiellement). Pour les PRO issus d'élevages avicoles, la teneur en azote uréique, intégré dans l'azote organique est rarement dosé spécifiquement. Or, cette forme présente aussi un intérêt car, tout comme la fraction ammoniacale, elle est immédiatement disponible.

Le calcul de  $X_a$  s'opère à l'aide de l'équation suivante :

$$[11] \quad X_a = \%N_{pro} \times Q \times KeqN$$

Avec :  $\% N_{pro}$  = teneur en azote total du produit (% par unité de volume ou de masse),  
*Cf tableau 13 page 60.*

$Q$  = volume ou masse de produit épandue par hectare

$KeqN$  = coefficient d'équivalence engrais N minéral efficace

Pour ces produits le calcul de l'effet direct est toujours envisagé en tant que contribution restant à venir à partir de la date d'ouverture du bilan d'azote, et ceci reste vrai que le calcul du bilan soit effectué par une méthode statique ou dynamique. En effet, si le PRO est apporté avant la date d'ouverture du bilan, la fraction minérale ou la fraction organique qui s'est minéralisée entre la date d'apport et la date d'ouverture du bilan, peut être disponible. Cet azote est en partie contenu dans le reliquat d'azote minéral (terme  $R_i$ ), dans l'azote absorbé par la culture (terme  $P_i$ ), ou contribue aux pertes par lixiviation ou par voie gazeuse.

Les tableaux 8 et 9 proposent une valeur moyenne de coefficients d'équivalence engrais minéral efficace ( $KeqN$ ) selon le produit épandu, la culture réceptrice et la période d'épandage, avec une indication d'amplitude des valeurs de références ou un écart-type.

$KeqN$  représente le rapport obtenu entre la quantité d'azote apporté par un engrais minéral de synthèse de type ammonitrate et la quantité d'azote total apporté par le PRO qui permet la même absorption d'azote par la culture. C'est en fait le rapport entre le CAU du PRO et le CAU de l'engrais minéral de synthèse. Les valeurs de  $keqN$  proviennent de mesures de CAU dans des expérimentations au champ. Ces mesures ont principalement été réalisées sur des effluents d'élevages dans le grand ouest de la France et sont plus rares pour d'autres types de produits, certaines modalités d'apports (par exemple avant l'implantation d'une CIPAN) ou conditions pédoclimatiques. Aussi, en vue de proposer des références sur une large gamme de situations et de produits, un rattachement à des produits référencés de la base a été réalisé, à partir soit de références de cinétiques de minéralisation par incubation au laboratoire ou plus rarement au champ, soit de simulations via un modèle dynamique en vue de prendre en compte une diversité pédoclimatique, soit par expertise.

La variabilité des valeurs du  $KeqN$ , illustrée par l'amplitude ou l'écart-type présenté dans le tableau, est dans certains cas élevée. Elle résulte :

- **De la variabilité des caractéristiques au sein d'un même type de PRO** : conditions d'élevage (litière, alimentation), processus d'obtention, composition, condition de stockage... Pour les PRO compostés, le mode de compostage et tout particulièrement sa durée de maturation, ont un effet important sur l'effet azote court terme : plus la durée est longue, plus l'azote se réorganise sous des formes stables, et plus son effet direct azote sur la culture réceptrice diminue.

- **Des conditions pédoclimatiques** qui vont impacter la minéralisation de l'azote organique du PRO, le risque de lixiviation de l'azote, la croissance de la culture réceptrice et sa capacité à absorber l'azote du PRO.

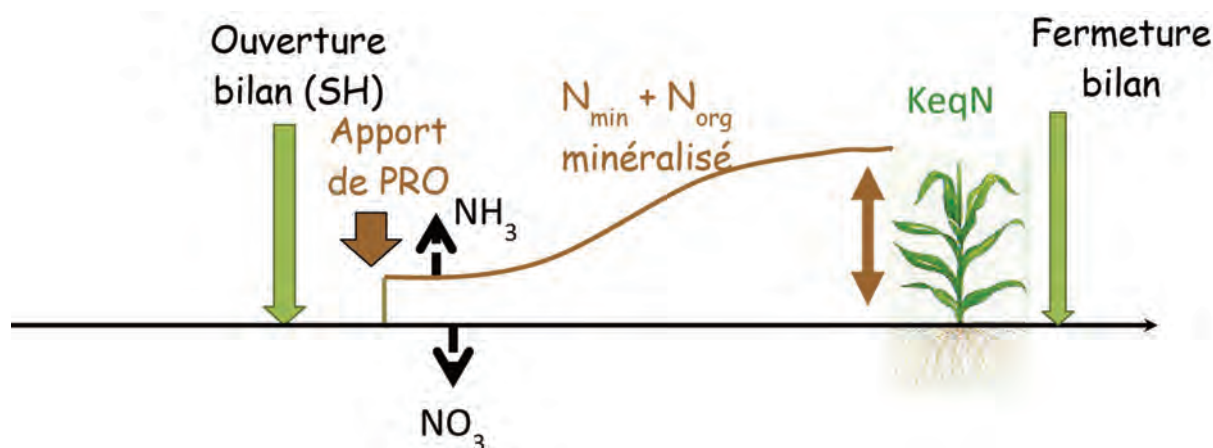
- **Des modalités d'apport** : dans la plupart des essais, les apports ont été réalisés de manière à minimiser les pertes par voie gazeuse pour les produits contenant une part significative d'azote ammoniacal, avec une incorporation du PRO dans un délai ne dépassant généralement pas 1 jour après l'apport. Elles sont définies comme étant réalisées selon une pratique d'épandage optimal (date, incorporation, type de sol représentatif, dose...). Toutefois, compte tenu de la rapidité du processus de volatilisation, des pertes ont pu se produire si l'incorporation n'a pas été immédiate ou si le PRO a été apporté sur la culture sans possibilité d'incorporation (cas d'apport de lisier de porc sur blé au tallage). Ainsi, pour les PRO riches en  $N-NH_4$ , une part de la variabilité du  $KeqN$  peut être liée aux pertes par volatilisation.

**KeqN Cycle** : c'est le  $KeqN$  le plus souvent référencé (à partir de mesures réalisées à la récolte de la culture). Il globalise l'effet azote à l'échelle du cycle entier de la culture quelle que soit la période d'apport du PRO.

**KeqN bilan** : part de l'effet azote du PRO pendant la période du bilan, après la date d'ouverture.

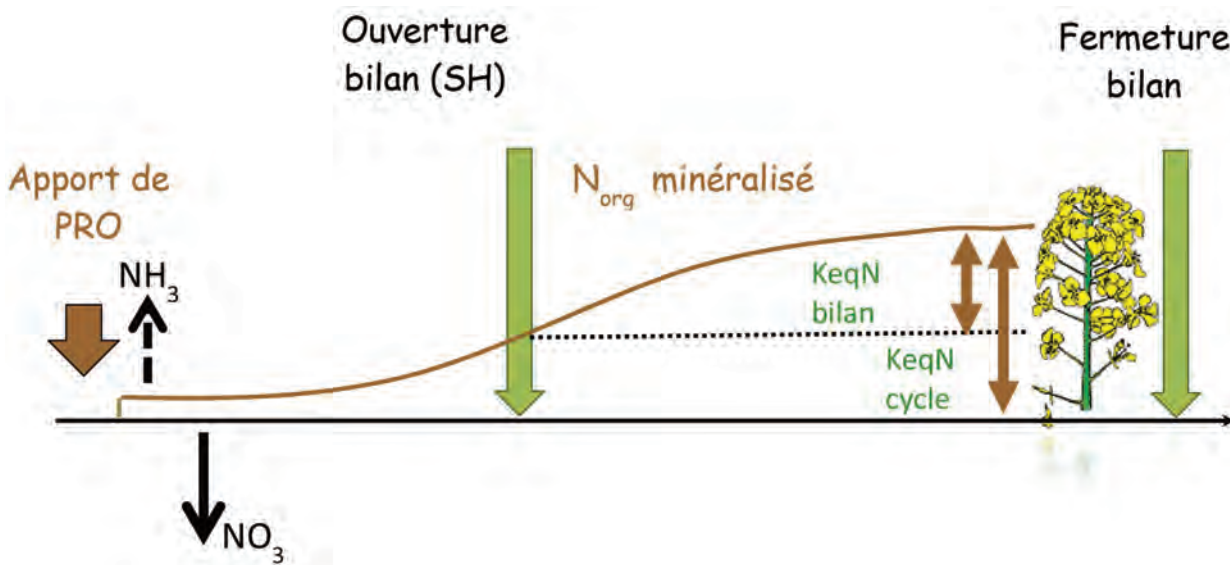
En cas d'un apport de PRO après l'ouverture du bilan, le  $KeqN$  bilan est égal au  $KeqN$  cycle.

En cas d'apport après l'ouverture du bilan (après sortie d'hiver)



Pour les PRO apportés avant ouverture du bilan sur des cultures d'automne, le KeqN bilan est plus difficile à acquérir au champ (donc moins référencé que le KeqN cycle), car il nécessite de mesurer à la fois la part de l'azote du PRO absorbé au cours de la période du bilan, le reliquat azoté et la quantité d'azote absorbé par la culture à l'ouverture du bilan.

**En cas d'apport avant l'ouverture du bilan**



En cas d'un apport de PRO avant ou sur une CIPAN, une partie de l'effet direct du PRO se retrouve dans le poste MrCi (avec un rapport C/N plus faible et une biomasse souvent plus élevée).

En conséquence, dans le tableau 8, pour des PRO apportés avant l'ouverture du bilan, ont été distingués un KeqN calculé à l'échelle du cycle cultural (le plus souvent diffusé, et utilisé dans le cas des écritures CAU) et un KeqN sur la période « du bilan ».

Par exemple dans le cas d'un apport de lisier de porcs mixte (incorporé immédiatement) en fin d'été avant colza, le KeqN sur la période du bilan (sortie d'hiver - récolte) n'est que de 0,05 alors que le KeqN à l'échelle du cycle entier est de 0,65. L'essentiel de l'azote fourni par le lisier est libéré avant l'ouverture du bilan et se retrouve à cette étape dans les termes Pi et Ri ou peut être perdu (lixiviation hivernale, pertes par voie gazeuse au moment de l'apport).

**Comment intégrer le keqN dans le calcul du poste de fournitures d'azote du PRO**

**Exemple 1 : vous apportez 20 t/ha de fumier de porcs au printemps sur maïs**

L'effet direct du PRO est :  $X_a = 20 \text{ (t/ha)} \times 6,7 \text{ (kgN/t)} \times 0,45 = 60 \text{ kgN/ha}$ .

0,45 étant la valeur de keqN bilan, équivalent au keqN cycle dans ces conditions.

**Exemple 2 : vous apportez 20 t/ha de fumier de porcs à la fin de l'été sur colza**

Attention à la référence prise pour ce calcul.

Utilisation du keqN bilan associé à une mesure de la quantité d'azote absorbé par le colza à l'ouverture du bilan (Pi) et une mesure de reliquat azoté du sol à l'ouverture du bilan dans cette parcelle (Ri).

L'effet direct du PRO est :  $X_a = 20 \text{ (t/ha)} \times 6,7 \text{ (kgN/t)} \times 0,10 = 13,4 \text{ kgN/ha}$

0,10 étant la valeur du keqN bilan dans ces conditions

L'utilisation du keqN cycle demande de procéder en deux étapes :

- Calcul de la dose totale à appliquer sur colza en absence d'apport de PRO, cela nécessite d'utiliser des valeurs de Pi et Ri hors apport de PRO, donc non mesurés sur la parcelle. Cela permet de ne pas comptabiliser deux fois l'effet azote du PRO, dans le keqN cycle et dans le Pi et Ri.

- Calcul de la dose d'azote à appliquer sur la parcelle en soustrayant l'effet total azote de l'apport de PRO ( $X_a = 20 \text{ (t/ha)} \times 6,7 \text{ (kgN/t)} \times 0,35 = 46,9 \text{ kgN/ha}$ ) à la dose totale à appliquer en absence d'apport de PRO calculée précédemment.

0,35 étant la valeur du keqN cycle

L'utilisation du keqN bilan est plus satisfaisant.

Exemples de PRO	Cultures concernées	Périodes d'apport	Coefficient d'équivalence azote (keqN)						
			keqN sur la période du bilan	Amplitudes ou écart-type ( $\sigma$ )*	SOURCES	keqN sur la période du cycle	Amplitudes ou écart-type ( $\sigma$ )*	SOURCES	
Compost MIATE**** (avec support carbonaté) de 6 mois et plus	de printemps (type maïs) d'automne (blé)	Printemps Automne	0,15 0,10		IL (1) IL (1)	0,15		IL (1)	
Compost de déchets verts	Compost de déchets verts de plus de 6 mois	de printemps (type maïs)	0,10	0,05 à 0,15	IL (1)	0,10	0,05 à 0,15	IL(1)	
		de printemps (type maïs)	0,10		EC(2)				
		de printemps (type maïs)	0,10		EC(2)				
		d'automne (colza)	0,05		EC(2)				
		d'automne (blé)	0,05		SA (1)				
Compost urbain	Compost d'ordures ménagères résiduelles (par TMB)	de printemps (type maïs)	0,10	0,05 à 0,15	IL (2)	0,10	0,05 à 0,15	IL (2)	
		d'automne (blé)	0,05		IL (1)				
Digestats de méthanisation agricole	Digestats bruts	de printemps (type maïs) apport surface	0,50		EC (5)	0,50		EC (5)	
		de printemps (type maïs) injection	0,90		EC (5)	0,90		EC (5)	
		d'automne (colza)	0,80			0,80		EC (5)	
		d'automne (blé)	0,65		EC (5)				
	Fraction liquide après séparation de phase	de printemps (type maïs)	0,70		E (2) (rattachement au produit Lisier de Porcs)	0,70		E (2) (rattachement au produit Lisier de Porcs)	
Fraction sèche après séparation de phase	de printemps (type maïs)	0,30		RE (1)	0,30		RE (1)		
Boues activées	Boues activées liquides IAA (C/N = 4.4)	de printemps (type maïs)	0,50		IL (4)	0,50		IL (4)	
	Boues activées liquides égouttées IAA (C/N = 4.4)	de printemps (type maïs)	0,50		IL (4)	0,50		IL (4)	
	Boues activées liquides urbaines (C/N = 4.9)	de printemps (type maïs)	0,45		IL (4)	0,45		IL (4)	
	Boues activées liquides égouttées urbaines (C/N = 4.9)	de printemps (type maïs)	0,45		IL (4)	0,45		IL (4)	
	Boues activées filtre presse non chaulées (C/N = 5.9)	de printemps (type maïs)	0,45		IL (4)	0,45		IL (4)	
	Boues activées pâteuses filtre à bandes (C/N=5.2)	de printemps (type maïs)	0,40		IL (4)	0,40		IL (4)	
	Boues activées lits de séchage (C/N=5.4)	de printemps (type maïs)	0,40		IL (4)	0,40		IL (4)	
	Boues activées lits à rhizophytes (C/N = 5.9)	de printemps (type maïs)	0,40		IL (4)	0,40		IL (4)	
	Boues activées déshydratées chaulées (C/N=5.3)	de printemps (type maïs)	0,35		IL (4)	0,35		IL (4)	
	Boues activées séchées (C/N=6.0)	de printemps (type maïs)	0,35		IL (4)	0,35		IL (4)	
Boues digérées	Boues digérées anaérobies liquides IAA (C/N=4.2)	de printemps (type maïs)	0,50		IL (4)	0,50		IL (4)	
	Boues digérées anaérobies déshydratées (C/N = 5.9)	de printemps (type maïs)	0,40		IL (4)	0,40		IL (4)	
	Boues digérées anaérobies déshydratées chaulées (C/N=6.0)	de printemps (type maïs)	0,30		IL (4)	0,30		IL (4)	
	Boues digérées anaérobies séchées (C/N=6.1)	de printemps (type maïs)	0,30		IL (4)	0,30		IL (4)	
	Boues lit bactérien/disque bio liquides (C/N=7.5)	de printemps (type maïs)	0,30		IL (4)	0,30		IL (4)	
Autres boues	Boues lit bactérien déshydratées chaulées (C/N = 5)	de printemps (type maïs)	0,30		IL (4)	0,30		IL (4)	
	Boues décanteur digesteur (C/N=8.1)	de printemps (type maïs)	0,30		IL (4)	0,30		IL (4)	
	Boues décanteur (C/N= 6 à 9)	de printemps (type maïs)	0,30		IL (4)	0,30		IL (4)	
	Boues de curage de lagunes urbaines (C/N= 6 à 11)	de printemps (type maïs)	0,30		IL (4)	0,30		IL (4)	
	Boues physico-chimiques déshydratées (C/N = 5.5 à 17)	de printemps (type maïs)	0,25		IL (4)	0,25		IL (4)	
	Boues physico-chimiques déshydratées chaulées (C/N = 10 à 15)	de printemps (type maïs)	0,25		IL (4)	0,25		IL (4)	
	Boues digérées traitées thermiquement	stockage de courte durée sur le site de la station (C/N=14)	de printemps (type maïs)	0,15		IL (4)	0,15		IL (4)
	Compost de boues (C/N = 11.8)	de printemps (type maïs)	0,15		IL (4)	0,15		IL (4)	
Matières de vidange (C/N = 11.8)	de printemps (type maïs)	0,35		IL (4)	0,35		IL (4)		
Boues de stations d'épuration de papeterie	Boues mixtes papetières C/N < 15	de printemps (type maïs)	0,20		IL (4)	0,20		IL (4)	
	Boues mixtes papetières 15 < C/N < 20	de printemps (type maïs)	0,10		IL (4)	0,10		IL (4)	
	Boues mixtes papetières 20 < C/N < 35	de printemps (type maïs)	0,00		IL (4)	0,00		IL (4)	
	Boues mixtes papetières	de printemps (type maïs)		Immobilisation de l'azote du sol à hauteur de 10 à 60 % de l'azote apporté	IL (4)		Immobilisation de l'azote du sol à hauteur de 10 à 60 % de l'azote apporté	IL (4)	
	Boues de désencrage 40 < C/N < 70	de printemps (type maïs)			IL (4)			IL (4)	
Compost de fumier de porcs ou de LP + paille (Guervevez)	Compost jeune (moins de 6 mois)	de printemps (type maïs)	0,45	$\sigma = +/-0,20$	EC (9) + EC(10) +IL (1)	0,45	$\sigma = +/-0,20$	EC (9) + EC(10) +IL (1)	
		Fin été	0,20		E (1)	0,35		E (1)	
		d'automne (blé)	0,05		E (1)	0,07	$\sigma = +/-0,04$	EC (1)	
	Compost âgé (de 6 à 10 mois)	de printemps (type maïs)	0,25	$\sigma = +/-0,20$	IL (2)	0,25	$\sigma = +/-0,20$	IL (2)	
		d'automne (colza)	0,10		E (1)	0,20		E (1)	
Fumier de cheval	de printemps (type maïs)	0,20		EC (2)					
Fumier d'ovins et caprins	de printemps (type maïs)	0,20		E(1) + EC(2)	0,20		E(1) + EC (2)		
Fumier de cheval, caprins et ovins	d'automne (colza)	Fin été	0,10		EC (2)			EC (2)	
	d'automne (blé)	Automne	0,10		EC (2)				
	de printemps (type maïs)	Printemps	0,45	$\sigma = +/-0,20$	EC (3)	0,45	$\sigma = +/-0,20$	EC (3)	
Fumier de porcs	de printemps (type maïs)	Automne	0,15		EC (2)				
	de printemps (type maïs)	Été avant CIPAN**	0,15		EC (2)				
	d'automne (colza)	Fin été	0,10		EC(2)	0,35		E (1)	
	d'automne (colza)	Printemps	0,15		EC(2)				
	d'automne (blé)	Printemps	0,20	0,10 à 0,30	EC (2)				
	d'automne (blé)	Automne	0,10		EC(2)	0,12	$\sigma = +/-0,06$	EC (3)	



Exemples de PRO	Cultures concernées	Périodes d'apport	Coefficient d'équivalence azote (keqN)						
			keqN sur la période du bilan	Amplitudes ou écart-type ( $\sigma$ )*	SOURCES	keqN sur la période du cycle	Amplitudes ou écart-type ( $\sigma$ )*	SOURCES	
Fumier de bovins	Fumier de bovin pailleux	de printemps (type maïs)	Printemps	0,25	$\sigma = +/-0,19$	EC (2) + EC (4) + IL(3) + EC(7)	0,25	$\sigma = +/-0,19$	EC (2) + EC (4) + IL(3) + EC(7)
		de printemps (type maïs)	Automne	0,10		EC (2)			
		de printemps (type maïs)	Été avant CIPAN**	0,10		EC (2)			
		d'automne (colza)	Fin été	0,10		EC (2)	0,20		E (1)
		d'automne (blé)	Automne	0,10		SA (3) + EC (1)	0,10		E (1)
	Fumier de bovin décomposé	de printemps (type maïs)	Printemps	0,30	$\sigma = +/-0,19$	EC (2)+ EC (3)	0,30	$\sigma = +/-0,19$	EC (2) + EC (3)
		de printemps (type maïs)	Automne	0,10		EC (2)	0,15		E (1)
		de printemps (type maïs)	Été avant CIPAN**	0,20		EC (2)			
		d'automne (colza)	Fin été	0,10		EC (2)	0,22	$\sigma = +/-0,13$	EC (3)
		d'automne (blé)	Automne	0,10		SA (4) + EC (1) + EC (2)	0,12	$\sigma = +/-0,07$	EC (3)
Fientes de volailles avec litière	avec incorporation immédiate	de printemps (type maïs)	Printemps	0,60		EC (4)	0,60		EC (4)
		d'automne (colza)	Fin été	0,20		E (1)	0,55		E (1)
		d'automne (blé)	Automne***	0,10		SA (5) + EC (1)			
	avec incorporation dans les 24h	de printemps (type maïs)	Printemps	0,50	$\sigma = +/-0,17$	EC (3)	0,50	$\sigma = +/-0,17$	EC (3)
		d'automne (blé)	Automne***	0,10		E (1)	0,22	$\sigma = +/-0,05$	EC (3)
		d'automne (colza)	Fin été	0,17		E(1)	0,50	$\sigma = +/-0,24$	EC (3)
		d'automne (blé)	Printemps	0,45	$\sigma = +/-0,17$	EC (3)	0,45	$\sigma = +/-0,17$	EC (3)
	apport en végétation	d'automne (colza)	Printemps	0,45	$\sigma = +/-0,17$	EC (3)	0,45	$\sigma = +/-0,17$	EC (3)
	Compost de fumiers de bovins	Compost de fumiers de bovins jeune de moins de 6 mois	de printemps (type maïs)	Printemps	0,20	$\sigma = +/-0,19$	EC (3) + IL(3)	0,20	$\sigma = +/-0,19$
d'automne (colza)			Fin été	0,12		E (1)	0,20	$\sigma = +/-0,13$	EC (3)
d'automne (blé)			Automne	0,05		E (1)	0,11	$\sigma = +/-0,07$	EC (3)
de printemps (type maïs)			Printemps	0,10	$\sigma = +/-0,19$	EC (2)+ EC (3)	0,10	$\sigma = +/-0,19$	EC (2)+ EC (3)
de printemps (type maïs)			Automne	0,15		EC (2)			
Compost de fumiers de bovins vieux de plus de 6 mois		de printemps (type maïs)	Été avant CIPAN**	0,15		EC (2)			
		de printemps (type maïs)	Printemps	0,15		EC (2)			
		d'automne (colza)	Fin été	0,10		EC (2)	0,17		E (1)
		d'automne (blé)	Automne	0,05		EC (2)	0,10		IL (5)
Compost de fientes de volailles avec litière	Fientes de volailles de plus de 4 mois et Compost de fientes de volailles avec litière de moins de 6 mois	de printemps (type maïs)	Printemps	0,45	$\sigma = +/-0,19$	EC (3) + IL (1)	0,45	$\sigma = +/-0,19$	EC (3)
		d'automne (colza)	Fin été	0,12		E (1)	0,35		EC (8)
		d'automne (blé)	Automne***	0,05		SA (6)	0,14	$\sigma = +/-0,04$	EC (3)
	Compost de fientes de volailles avec litière de 6 mois à 10 mois	de printemps (type maïs)	Printemps	0,25	$\sigma = +/-0,19$	EC (3)	0,25	$\sigma = +/-0,19$	EC (3)
Fientes de volailles	avec incorporation immédiate	de printemps (type maïs)	Printemps	0,65		IL (1)+ EC (2)	0,65		IL (3)
		de printemps (type maïs)	Automne	0,10		EC (2)			
		de printemps (type maïs)	Été avant CIPAN**	0,10		EC (2)			
	avec incorporation dans les 24h	d'automne (blé)	Automne***	0,10		EC (2)			
		de printemps (type maïs)	Printemps	0,55		IL (4)	0,55		IL (4)
		d'automne (blé)	Printemps	0,45		E (1)			
Lisier de porcs mixte	avec incorporation immédiate	de printemps (type maïs)	Printemps	0,70	$\sigma = +/-0,25$	EC (2) + EC (7)	0,70	$\sigma = +/-0,25$	EC (2) + EC (7)
		de printemps (type maïs)	Automne	0,05		EC (2)			
		de printemps (type maïs)	Été avant CIPAN**	0,05		EC (2)			
		d'automne (colza)	Fin été	0,05		EC (2)	0,65		EC(8)
		d'automne (blé)	Automne***	0,05		EC (2)			
	avec incorporation dans les 24h ou sans incorporation dans le cas d'un apport sur blé au printemps	de printemps (type maïs)	Printemps	0,50	$\sigma = +/-0,25$	EC (3)	0,50	$\sigma = +/-0,25$	EC (3)
		de printemps (type maïs)	Automne	0,05		E (1)	0,48	$\sigma = +/-0,19$	EC (3)
		de printemps (type maïs)	Été avant CIPAN**	0,05		E(1)			
		d'automne (blé)	Automne***	0,05		E (1)	0,42	$\sigma = +/-0,22$	EC (3)
		d'automne (colza)	Fin été	0,00		E (1)	0,31	$\sigma = +/-0,27$	EC (3)
apport en végétation	d'automne (blé)	Printemps	0,60		E (1)	0,62	$\sigma = +/-0,16$	EC (3)	
	d'automne (colza)	Printemps	0,56		E (1)	0,56	$\sigma = +/-0,18$	EC (3)	
Lisier de bovins	avec incorporation immédiate	de printemps (type maïs)	Printemps	0,65		EC (2) + EC (6)	0,65		EC (2) + EC (6)
		de printemps (type maïs)	Automne	0,10		EC(2)			
		de printemps (type maïs)	Été avant CIPAN**	0,10		EC(2)			
		d'automne (blé)	Automne***	0,10		EC (2)			
		d'automne (colza)	Fin été	0,15		EC (2)	0,40		EC(4)
	avec incorporation dans les 24h	de printemps (type maïs)	Printemps	0,50		EC (6)	0,50		EC (6)
		d'automne (colza)	Fin été	0,10		E (1)	0,35		E (1)
apport en végétation	d'automne (blé)	Printemps	0,50		EC(2)				
	d'automne (colza)	Printemps	0,40		E (1)				
Lisier de veaux	avec incorporation immédiate	de printemps (type maïs)	Printemps	0,70		E (2) (rattachement au produit Lisier de Porcs)	0,70		E (2) (rattachement au produit Lisier de Porcs)
	avec incorporation dans les 24h	de printemps (type maïs)	Printemps	0,50		E (2) (rattachement au produit Lisier de Porcs)	0,50		E (2) (rattachement au produit Lisier de Porcs)
Vinasse de betterave concentrée	de printemps (type maïs)	Printemps	0,50			0,50		EC (2)	
	de printemps (type betterave)	Printemps	0,65		EC (2)	0,65		EC (2)	
	de printemps (type maïs)	Été avant CIPAN**	0,10		EC (2)				
	d'automne (blé)	Automne***	0,15		EC (2)				
	d'automne (blé)	Printemps	0,45		EC (2)				
	d'automne (colza)	Fin été	0,15		EC (2)				
	d'automne (colza)	Printemps	0,45		EC (2)				

\* Pour un certain nombre de produits, cette information n'a pas pu être renseignée, néanmoins on peut considérer que la variabilité est de +/- 30%  
 \*\* Les apports de PRO réalisés avant CIPAN + cultures de printemps ne sont pas autorisés dans toutes les régions. Quand cette pratique est permise, il faut veiller à ajuster la quantité d'azote "efficace" apporté par le produit organique à la capacité d'absorption de la CIPAN  
 \*\*\* Attention, ces situations ne sont pas recommandées et sont interdites sur certaines zones  
 \*\*\*\* MIATE : Matières d'Intérêt Agronomique issues du Traitement des Eaux

EC : Essai au champ IL : Incubation au laboratoire RE : Références Étrangères E : Expertise SA : Simulations AzoFert AS: Autres Sources  
 EC (1) : Actualisation des connaissances pour l'épandage des PRO ACTA/ARTELIA juillet 2012  
 EC (2) : Travail en concertation avec les SATEGE 80-62-59, MUAD02, LDAR et INRA Laon, 2012  
 EC (3) : CASDAR 2007-2011, gestion durable des sols avec des produits organiques issus d'élevage.  
 EC (4) : Brochure Fertiliser avec les engrais de ferme, IL, ITAVI, ITC, ITP, 2001  
 EC (5) : Etudes au champ avec courbe de réponse à l'N Casdar "djections" CRAB / CA45 2011 2012  
 EC (6) : Engrais de ferme, valeur fertilisante, gestion, environnement, D. Ziegler et M. Hédut, 1991  
 EC (7) : Divers essais INRA, CRAB, ARVALIS  
 EC (8) : Essais réalisés par la CRAB et le CETIOM  
 EC (9) : Valeur agronomique et utilisation du compost de Guernevez, CA29, EDE29, APV Compost, 1994-1995  
 EC (10) : Compost et Etude du comportement agronomique de différents composts de lisier de porc, D. Hanocq CA29 et ISA terre, juin 1999  
 IL (1) : Etude par incubation, CRAB IF20, 2006  
 IL (2) : Suivi d'installations CERAFEL Bretagne  
 IL (3) : Etude CRAB 2002  
 IL (4) : Synthèse de la valeur azotée des boues résiduelles de stations d'épuration issue du réseau missions « boues » APCA / ADEME mai 2007  
 IL (5) : Travaux de Morvan et al, 2005  
 RE (1) : Chambre d'Agriculture Rhénanie du Nord - Westphalie-YARA  
 E (1) : Expertise du sous-groupe de travail  
 E (2) : Rattachement à un autre produit  
 SA (1, 2, 3, 4, 5, 6) : Etude sur l'approche des coefficients d'équivalence engrais (keq) via les simulations réalisées avec AzoFert à partir des courbes de

Tableau 8 : Coefficient d'équivalence engrais N (KeqN) des principaux produits résiduels organiques. Tableau disponible en téléchargement sur le site du COMIFER [www.comifer.asso.fr](http://www.comifer.asso.fr)

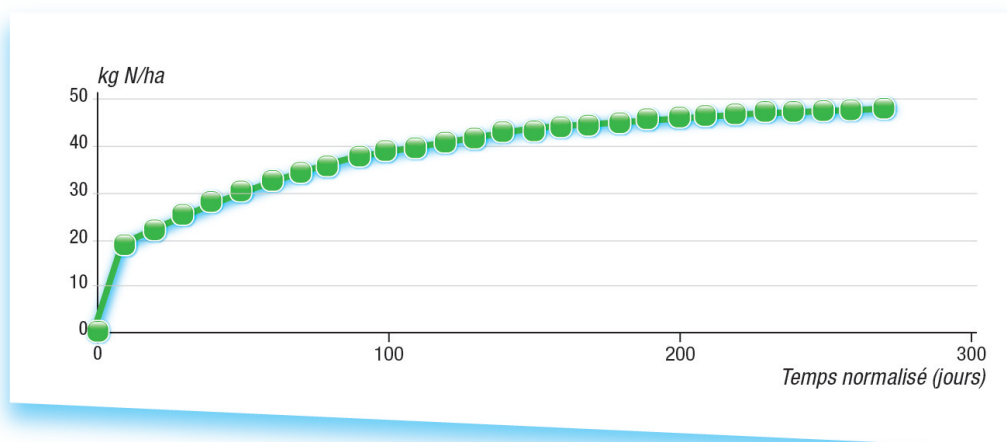
Exemples d'effluents d'élevage épandus sur prairies	Période d'apport	Mode d'apport	Régions régulièrement arrosées	Régions à déficit estival marqué
Fumier de bovins	Automne - hiver	En surface	0,3	0,2
Fumier de bovins	Printemps	En surface	0,1	0,05
Compost de fumier de bovins	Automne - hiver	En surface	0,25	0,15
Compost de fumier de bovins	Printemps	En surface	0,05	0
Fumier de porcs	Automne - hiver	En surface	0,4	0,4
Fumier de porcs	Printemps	En surface	0,4	0,4
Compost de fumier de porcs	Automne - hiver	En surface	0,2	0,2
Compost de fumier de porcs	Printemps	En surface	0,2	0,2
Lisier de bovins	Printemps - début été*	En surface	0,5	0,4
Lisier de bovins	Printemps	En surface	0,6	0,5
Lisier de porcs	Printemps	En surface	0,6	0,5
Lisier de porcs	Printemps	Injecté ou déposé	0,7	0,6
Lisier de porcs	Fin été (prairie de plus de 6 mois**)	En surface	0,4	0,3

**Tableau 9** : Coefficient d'équivalence engrais N d'effet direct KeqN sur prairie. Les valeurs sont issues des brochures « Fertiliser avec les engrais de ferme » (ITCF, IE, ITAVI, ITP 2001), mis à jour par le groupe « Produits Résiduaux Organiques » du COMIFER (chapitre 5, tableau 13 : « effet direct des apports issus des PRO »).

\* le début d'été est valable pour les régions arrosées (ou années pluvieuses des zones séchantes)

\*\* Sur prairies de plus de 6 mois, cette pratique est de façon générale peu recommandée car elle présente des risques de lixiviation importants durant l'hiver. Il faut veiller à ajuster la quantité d'azote « efficace » apporté à la capacité d'absorption de la prairie à cette période.

**Note bilan dynamique** : certains outils permettent de calculer les termes  $M_{pro1}$ ,  $M_{pro2}$  et  $X_{pro}$ . En particulier,  $M_{pro1}$  et  $M_{pro2}$  sont calculés à partir d'équations de cinétiques de minéralisation de l'azote organique des PRO établies en fonction de jours normalisés. Un exemple du type de relation mathématique utilisable est fourni dans la figure ci-contre :



Source : AZOFERT - INRA (3 t/ha de vinasse de sucrerie).

## A : apports atmosphériques

Le terme **A** représente les apports atmosphériques d'azote minéral. Bien qu'il puisse y avoir des dépôts « secs », l'essentiel des apports est contenu dans les pluies. Difficile à estimer précisément, cette source d'azote n'excède pas 5 à 15 kgN/ha par an (chiffre à minorer pour la période classique de calcul d'un bilan prévisionnel en grandes cultures par exemple), ce qui justifie amplement de le négliger dans le cadre d'un bilan simplifié. La façon la plus simple de le prendre en compte est d'utiliser la pluviosité normale pour la période de calcul du bilan et des valeurs standard de concentration d'azote, éventuellement adaptées au contexte régional.

## Nirr : Azote apporté par l'eau d'irrigation

Outre son effet sur l'état d'humidité de la couche minéralisante qui peut avoir une influence sur les postes de minéralisation par le calcul de **JN**, l'eau d'irrigation est une source à part entière d'azote pour la culture. Sur la base d'un régime d'irrigation prévisionnel et de la connaissance de la teneur en azote de l'eau d'irrigation, le poste **Nirr** est facile à calculer à partir de la formule 12. Attention, il est indispensable de le calculer car les apports par l'eau d'irrigation sont généralement loin d'être négligeables, surtout pour les cultures fortement dépendantes de cette technique (zone de culture en maïs irriguant par exemple). En fonction du régime d'irrigation, il est bien entendu conseillé de recalculer ce terme en cours de campagne pour ajuster les apports d'engrais minéraux en conséquence quand cela est possible (stade du dernier apport d'engrais non dépassé).

[12]  $Nirr = (V/100) \times (C/4,43)$

Avec : V = quantité d'eau apportée en mm

C = concentration de l'eau en nitrate (mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup> / L)

## Pertes aux dépens de l'engrais

### Ix : organisation de l'azote aux dépens de l'engrais

La quantité d'azote de l'engrais organisé dépend de la capacité d'organisation du sol et de la disponibilité en azote du sol. La capacité d'organisation est déterminée par la quantité de carbone disponible pour la microflore du sol. Dans les sols cultivés, les principales sources de carbone sont constituées par les résidus de culture retournant au sol et par les systèmes racinaires (rhizodéposition, exsudats racinaires, racines en décomposition). La disponibilité en azote dépend de la quantité d'azote apportée.

La quantité d'azote organisé de l'engrais peut être déterminée à partir de la disponibilité en carbone (carbone venant de la rhizodéposition, des résidus de culture et des produits organiques) et d'un rapport d'organisation (N organisé / C décomposé) qui varie avec la disponibilité en azote.

L'ordre de grandeur de ce poste se situe entre 10 et 30 kgN/ha. Attention, **cette fourchette est indicative et ne constitue pas des valeurs de références pour la prise en compte de ce poste en l'absence de calculs plus aboutis.**

**Gx : pertes par voie gazeuse aux dépens de l'engrais**

Les pertes par voie gazeuse concernent en 1er lieu la volatilisation d'ammoniac. Ces pertes peuvent être estimées par un modèle simple prenant en compte des caractéristiques du sol (pH, capacité d'échange cationique), la forme de l'engrais (physique et chimique), le mode d'apport (en surface du sol ou dans le sol), les conditions climatiques lors de l'apport (vent, température, pluie) et l'état de la culture à la date d'apport de l'engrais (quantité de biomasse aérienne, croissance). Dans un bilan prévisionnel, cette estimation peut constituer une valeur minimale, sachant que les conditions climatiques durant l'apport (température à la surface du sol, présence de vent) sont inconnues.

Il est actuellement très difficile d'estimer, de manière simple, les pertes gazeuses par dénitrification, et de les intégrer dans les outils d'aide à la décision. Par simplification, on fait l'hypothèse d'une compensation entre les pertes par dénitrification et la fixation non symbiotique ( $G_s = F_{ns}$ , cf. chapitre 2).

L'ordre de grandeur de ce poste se situe entre 0 et 40 kgN/ha. Attention, cette fourchette est indicative et ne constitue pas des valeurs de références pour la prise en compte de ce poste en l'absence de calculs plus aboutis.

**CAU : terme intégrateur des pertes aux dépens de l'engrais**

Le CAU, abréviation de Coefficient Apparent d'Utilisation de l'engrais, est un terme déterminé à partir d'expérimentations. Il correspond aux pertes d'azote aux dépens de l'engrais ( $I_x + G_x$ ) quand on se situe à des doses d'apports inférieures ou égales à l'optimum technique de fertilisation azotée (ce qui est un des principes de base du raisonnement de la fertilisation par la méthode du bilan de masse prévisionnel).

Concrètement, le CAU se calcule à partir de résultats expérimentaux comparant une modalité fertilisée et un témoin sans apport d'engrais sur lesquelles ont été mesurées les quantités d'azote absorbé par le couvert :

**[13] CAU = (NabsX - NabsTON)/X**

Avec : NabsX = quantité d'azote absorbé par le couvert suite à l'apport de la dose d'azote X (kgN/ha)

NabsTON = quantité d'azote absorbé par le couvert sans apport d'azote (kgN/ha)

X = dose d'azote apporté sur la modalité fertilisée (kgN/ha)

Quand l'expérimentation comporte plusieurs doses d'engrais inférieures à l'optimum, il est préférable de déterminer le CAU par la pente de la régression  $Nabs = f(\text{dose N apportée})$ . (figure 6). Cette méthode est généralement plus précise pour évaluer le CAU d'une stratégie de fertilisation.

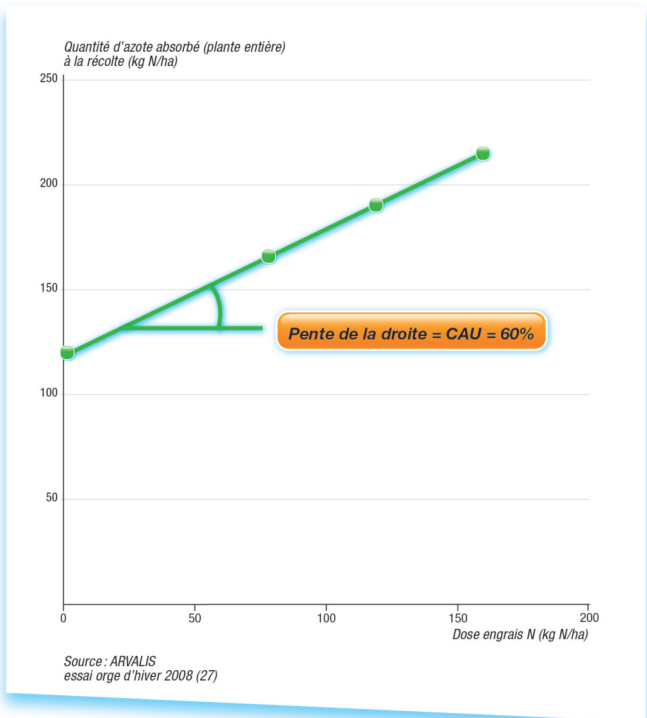


Figure 6

Estimation du CAU par le calcul de la pente de la régression linéaire  $Nabs = f[\text{dose N apportée}]$  en situation de doses apportées inférieures à la dose optimale technique.

Le **CAU** est le reflet de la capacité de la culture dans une situation donnée à absorber l'azote apporté. Il peut donc en théorie être expliqué par les conditions climatiques à la date d'apport, par les conditions de croissance et les capacités d'absorption racinaire de la culture. Dans l'attente de l'aboutissement des travaux de modélisation du **CAU**, les références disponibles sont issues de réseaux expérimentaux régionaux qui introduisent un ou plusieurs facteurs discriminant des situations d'apports rencontrées en fonction des cultures.

## L : Pertes par lixiviation du nitrate pendant la période du bilan

Dans les situations de grandes cultures, la quasi-totalité des pertes par lixiviation du nitrate s'opère avant l'ouverture du bilan prévisionnel, pendant la période d'interculture. Ce constat agronomique conduit le plus souvent à négliger le terme L dans les calculs du bilan prévisionnel.

Cependant, certaines situations peuvent amener à devoir prendre en compte le terme L après l'ouverture du bilan. Elles correspondent généralement à des pertes du stock d'azote minéral à l'ouverture du bilan  $R_i$ , quand celui-ci est mesuré trop précocement par rapport à la date effective de reprise active d'absorption d'azote par la culture et qu'un fort épisode pluvieux se produit. Dans le cadre de calcul d'un bilan statique, des abaques ou des tables d'ajustement de la valeur de  $R_i$  mesuré sont disponibles (*cf. exemple en figure 7 et annexe 2 : Notice d'utilisation des abaques d'ajustement du terme L et Tables d'ajustement du terme L en fonction de la lame drainante*).

Elles sont généralement issues de calculs fréquentiels à partir de modèles de drainage. Quelques situations agronomiques exceptionnelles peuvent aussi amener à considérer des pertes par lixiviation de l'azote de l'engrais. Elles concernent essentiellement des apports précoces sur cultures de printemps en situation de fort drainage (pluviométrie importante, sols filtrants...).

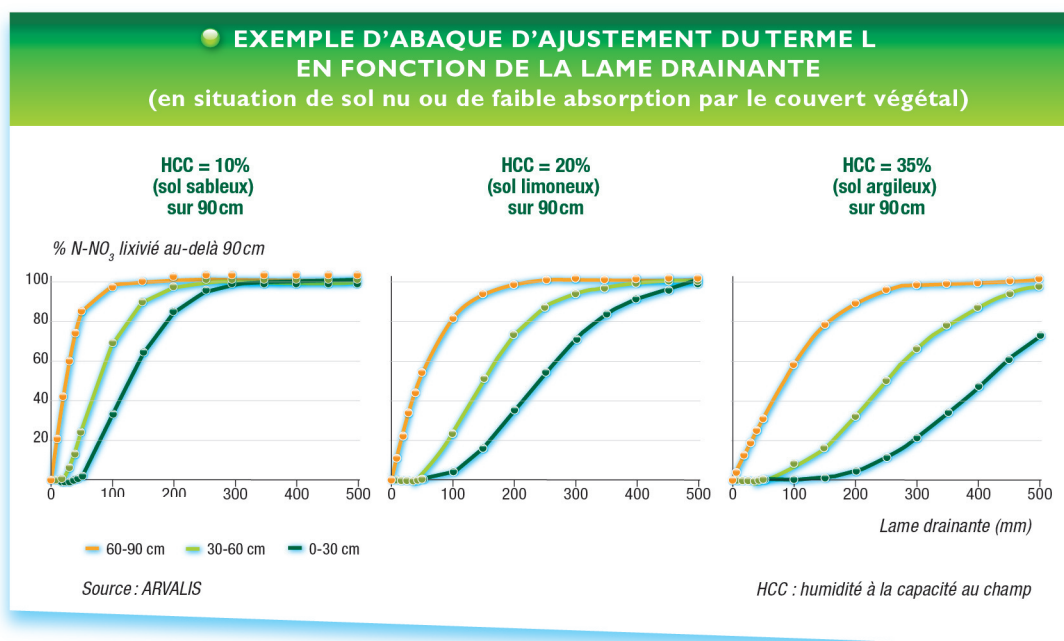


Figure 7

L'ordonnée représente la perte en azote sous forme nitrée de l'horizon considéré au-delà de 90 cm. Dans la plupart des cas, le stock d'azote minéral soumis à la lixiviation est représenté par  $R_i$ . Sources : COMIFER 2002 par simulation à partir du modèle LIXIM (INRA, Mary et al. 1999).



**Note bilan dynamique** : plusieurs outils proposent d'ajuster  $R_i$  par  $L$  en calculant la lixiviation sur la période du bilan. Ils utilisent généralement des modèles de drainage prenant en compte le type de sol et les conditions météorologiques.

## Rf : quantité d'azote minéral dans le sol à la fermeture du bilan

A la fermeture du bilan, une quantité d'azote minéral est présente dans le sol, le terme  $R_f$ . En situation de non dépassement de l'optimum technique de fertilisation azotée (principe sous-jacent du bilan prévisionnel), il a été démontré de longue date que le terme  $R_f$  était indépendant de la dose d'azote appliquée. Les valeurs de ce poste sont généralement modulées en fonction de la culture, du type de sol et de la profondeur d'enracinement. Sa profondeur d'estimation doit être identique à celle d'estimation de  $R_i$ .

*Cf annexe 3 d'un exemple tableau  $R_f$ , ainsi que les fiches cultures.*

## PO : estimation globale des fournitures d'azote par le sol

Plusieurs raisons pédo-climatiques (impossibilité de mesurer  $R_i$  dans des sols très caillouteux par exemple) ou d'orientations agronomiques dans la construction d'un référentiel ont conduit plusieurs régions à estimer les fournitures d'azote par le sol à certaines cultures sous la forme d'un terme global  $PO$ .

Les référentiels disponibles se basent généralement sur un réseau d'acquisition de références expérimentales relatif à la mesure des quantités d'azote absorbé par les cultures en l'absence d'apports d'engrais dans des conditions pédo-climatiques clairement identifiées et classées (zones climatiques, zone pédologiques, systèmes de cultures...). Ainsi, tout référentiel de  $PO$  est indissociable du réseau expérimental qui a permis de l'établir. Son extrapolation à des zones pédoclimatiques ou des systèmes de cultures non explorés n'est donc pas envisageable.

*A contrario*, si le réseau expérimental est correctement construit, un référentiel de  $PO$  constitue une très bonne représentation des fournitures d'azote par le sol de la zone considérée.

### Exemple de l'élaboration d'un référentiel de $PO$ en Alsace (ARAA)

La région Alsace a développé un référentiel de raisonnement de la fertilisation azotée du maïs sur la base d'une équation d'efficacité :  $P_f = PO + (X+X_a) \times CAU$ .

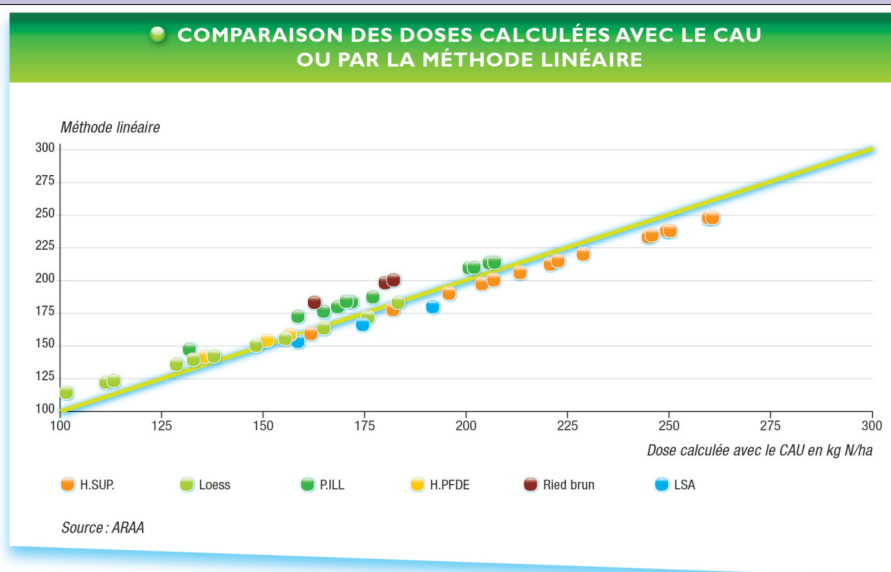
Dans la pratique, elle est utilisée sous une forme linéaire

$$X + X_a = 2,3 \times \text{rendement} + N \text{ non disponible} - PO$$

Pourquoi cette différence ?

- cette formule a été adoptée et diffusée aux agriculteurs de façon intensive à un moment où la validité théorique de l'équation d'efficacité n'était pas encore définitivement établie ;
- elle a paru plus simple à expliquer aux agriculteurs et à leurs partenaires non agricoles ;
- les écarts de dose conseillée entre l'une ou l'autre façon de calculer sont minimes (voir le graphique qui compare les doses calculées par les 2 méthodes pour différents types de sol) ;
- il n'a donc pas paru opportun de revoir toute la stratégie de communication mise en œuvre.





Pour le paramétrage de PO, des réseaux de témoins non fertilisés ont été mis en place depuis 1987. Les valeurs à prendre en compte dépendent du type de sol et du système de culture. La référence retenue correspond à la valeur obtenue au moins 4 années sur 5. Ces références ont été largement diffusées, en particulier dans les opérations AGRI-MIEUX qui couvrent toute la plaine d'Alsace. Elles sont reprises dans les programmes d'action de la Directive Nitrates. Le tableau ci-dessous donne, à titre d'exemple, les fournitures du sol détaillées par zone d'opération AGRI-MIEUX du Haut-Rhin pour un niveau de rendement moyen. Ce conseil est à moduler par l'agriculteur en fonction de l'objectif de rendement qu'il retient pour ses parcelles.

Zones Opérations AGRI-MIEUX	Type de sol	Niveau rendement du maïs (q/ha)	PO = Fourniture du sol (kgN/ha)
HARDT eau vive	sol profond de plaine del'IlI	110 - 115	90
	sol profond de Hardt	110 - 115	100
	sables du Rhin	110 - 115	100
	sol superficiel de Hardt	110 - 115	60
Collines eau et terroirs	Plaine del'IlI irriguée	110	90
	Plaine del'IlI non irriguée	90	90
	Ochsenfeld irrigué	100	60
	Autres sols du Pié-mont	90	100
Sundg'eaux vives	conditions favorables (sol limoneux, sain et le plus souvent calcaire de l'Est du Sundgau)	100	100
	conditions moins favorables (sol limoneux, battant, froid et tendant à s'engorger dans l'Ouest du Sundgau)	90	80

Valeurs de PO (kgN/ha) dans les systèmes céréaliers du Haut-Rhin. Source : ARAA.

**Pour en savoir plus :****Cadre général :**

**Meynard J.M., Justes E., Machet J.M., Recous S., 1997.** Fertilisation azotée des cultures annuelles de plein champ. In : Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes, (G. Lemaire et B. Nicolardot, Eds), Les Colloques de l'INRA, 83, 183-199.

**Spécifiquement sur Mh :**

**Justes E., Cohan J.P., Desprez M., Cerman J., Valé M., Champolivier L., Laurent F., Mary B., 2009.** Prédiction de la minéralisation de l'azote organique humifié des sols cultivés : paramétrage et validation de modèles opérationnels. Congrès COMIFER-GEMAS - 25 & 26 nov. 2009 - Blois, France.

**Spécifiquement sur Mhp :**

**Laurent F., Besnard A., Kerveillant P., Vertès F., 2004.** Azote et retournement de prairie - De nouvelles références pour la minéralisation de l'azote. Perspectives Agricoles, 306 (Novembre), 24-27.

**Spécifiquement sur Mr :**

**Justes E., Thiébeau P., Cattin G., Larbre D., Nicolardot B., 2001.** Libération d'azote après retournement de luzerne - Un effet sur deux campagnes. Perspectives Agricoles, 264 (Janvier), 22-28. **Justes E., Mary B., Nicolardot B., 2009.** Quantifying and modelling C and N mineralization kinetics of catch crop residues in soil : parameterization of the residue decomposition module of STICS model for mature and non mature residues. Plant and Soil.

**Spécifiquement sur MrCl :**

**Laurent F., Taureau J.C., Lambert M., Fontaine A., Bonnefoy M., 1995.** Gestion de l'interculture : Approche au champ des effets sur la culture suivante. Perspectives Agricoles, 206 (Octobre), LII-LXII.

**Machet J.M., Laurent F., Chapot J.Y., Doré T., Dulout A., 1997.** Maîtrise de l'azote dans les intercultures et les jachères. In : Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes, (G. Lemaire et B. Nicolardot, Eds), Les Colloques de l'INRA, 83, 271-288.

**Cohan J.P., Castillon P., 2009.** Dossier couverts végétaux - Effets sur le stock d'azote minéral dans le sol : Aptitudes à piéger le nitrate et à contribuer à la nutrition azotée de la culture suivante. Perspectives Agricoles, 357 (juin), 30-36.

**Spécifiquement sur L :**

**COMIFER 2002.** Lessivage des nitrates en systèmes de cultures annuelles. Diagnostic du risque et propositions de gestion de l'interculture. COMIFER Ed.

**Mary B., Beaudouin N., Justes E., Machet J.M., 1999.** Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. European Journal of Soil Science, 50, 549-566.

## 1

# Les apports d'azote et les modalités d'applications

Le raisonnement de la dose d'apport ne s'arrête pas à la détermination par la méthode du bilan prévisionnel. Il doit aussi prendre en compte les formes d'apport de l'azote (organique et minéral), prévenir les risques de perte d'azote liés à l'épandage et notamment la volatilisation ammoniacale et assurer un épandage précis et uniforme de la dose prévue. Notons que dès que l'on s'intéressera à l'impact de l'utilisation de telle ou telle forme d'engrais sur les bilans énergétiques ou d'émissions de gaz à effet de serre (hors du propos de ce chapitre), il faudra inclure les phases amont de production et de distribution des produits.

## Les différentes formes d'apport de l'azote

L'azote peut être apporté au sol sous une forme organique ou sous une forme minérale (ammoniacale ou nitrique). L'urée ( $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ ) est la forme organique la plus simple de l'azote. Elle s'hydrolyse complètement et rapidement au contact du sol en azote ammoniacal. C'est pourquoi elle est considérée comme une forme minérale dans le raisonnement de la fertilisation azotée.

Dans les produits résiduels organiques, la forme ammoniacale de l'azote peut représenter une fraction plus ou moins importante de l'azote total, l'autre fraction étant représentée par l'azote organique. Cet azote ammoniacal présent dans les PRO a un comportement identique à l'azote d'un engrais minéral. Il est important de connaître sa teneur avec précision et de gérer les modalités d'apport de façon à prévenir le risque de volatilisation ammoniacale.

### Les transformations des formes d'azote

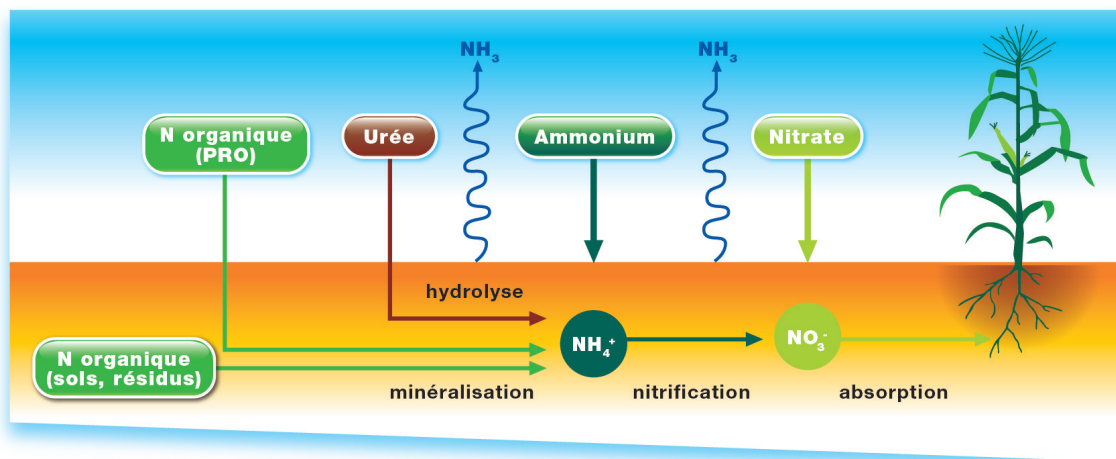
La vitesse de minéralisation de l'azote organique des PRO dépend du type de produit et des conditions du milieu (température et humidité du sol principalement). L'hydrolyse de l'urée après la dissolution des granules est rapide. Elle s'opère sous l'action de l'enzyme uréase présente dans le sol plus ou moins rapidement selon la température de celui-ci (tableau 10).

Température du sol	Hydrolyse de l'urée en ammonium	Température du sol	Nitrification de l'ammonium en nitrate
2°	4 jours	5°	6 semaines
10°	2 jours	10°	2 semaines
20°	1 jour	20°	1 semaine

**Tableau 10** : durée de l'hydrolyse de l'urée et de la nitrification selon la température du sol. Sources : Vilsmeier and Amberger (1980-1984).

L'ammonium est en grande partie adsorbé sur la phase solide du sol avant d'être absorbé par les micro-organismes et les racines. Lorsque le sol est aéré, humide et chaud la transformation de l'ammonium en nitrate sous l'action des bactéries nitrifiantes Nitrosomonas puis Nitrobacter est assez rapide, y compris dans les sols modérément acides (pH eau > 5,5). Absorption et nitrification réduisent la concentration d'ammonium dans la solution du sol et induisent la libération de la fraction fixée par les adsorbants.

Le nitrate n'est pas ou que très peu fixé par la phase solide. La quasi-totalité est donc présente dans la solution.



### Formes d'azote et acidification

L'acidification est due à un bilan positif de protons  $\text{H}^+$  dans le sol. Or, selon leur nature, les transformations de l'azote libèrent ou consomment des protons. L'hydrolyse de l'urée ou la minéralisation de l'azote organique en ammonium ont un effet alcalinisant. La nitrification de l'ammonium est par contre acidifiante. Le maintien de la neutralité électrique au sein de la plante conduit celle-ci à compenser l'absorption des anions, tel le nitrate, par l'absorption concomitante d'une charge équivalente de protons. L'absorption de nitrate alcalinise donc localement le sol. A l'inverse l'absorption de  $\text{NH}_4^+$  se traduit par la libération d'un proton qui par conséquent acidifie localement le sol<sup>6</sup>. L'acidification induite par la nitrification de l'ammonium ne devient définitive pour le volume de terre exploré par les racines que lorsque le nitrate est lixivié hors de ce volume.

Notons que l'influence des formes d'engrais sur les équilibres acido-basiques locaux du sol est sans conséquence sur le raisonnement de la fertilisation azotée, en particulier sur le calcul des termes du bilan prévisionnel de l'azote.

### Formes d'azote et volatilisation ammoniacale

La volatilisation représente la fraction de l'azote apportée qui est perdue par émission du gaz ammoniac  $\text{NH}_3$ . Cette émission résulte d'équilibres physico-chimiques entre l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) dissoute et l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ). Les produits résiduels organiques particulièrement les lisiers peuvent perdre jusqu'à 70% de leur azote ammoniacal à la suite de l'épandage. Les émissions associées aux engrais minéraux sont plus faibles que pour les apports organiques. La dissolution du granulé d'urée puis son hydrolyse augmente le pH jusqu'à une valeur de 9 du fait de la forte consommation de protons autour du granulé. La proportion d'azote sous forme  $\text{NH}_3$  devient alors importante et favorise son dégagement dans l'atmosphère. Les engrais à base d'azote ammoniacal sont également sensibles au risque de volatilisation dont l'importance dépend de la nature de l'anion qui accompagne  $\text{NH}_4^+$  (sulfate > phosphate > nitrate). Les engrais nitriques (nitrate de calcium, nitrate de potassium) ne sont pas concernés.

<sup>6</sup> Le guide chaulage du COMIFER (2009) fournit des éléments de compréhension de l'effet de la fertilisation azotée sur l'acidification du sol. On s'y reportera utilement.

Les ammonitrates sont associés à un niveau de risque faible pour la volatilisation.

Les facteurs d'émissions associés aux formes d'engrais azotés sont à considérer comme des ordres de grandeurs permettant de classer les formes l'une par rapport à l'autre. En effet, ils sont affectés d'une grande variabilité liée aux conditions d'épandage et font encore l'objet de travaux à l'heure actuelle. Par exemple, on cite généralement un facteur d'émission de 15% de l'azote apporté pour l'urée contre 8% pour la solution azotée (EMEP-CORINAIR guidebook 2007). Toujours à titre d'exemple, la figure 8 cite des résultats issus d'une étude récente d'origine britannique (DEFRA).

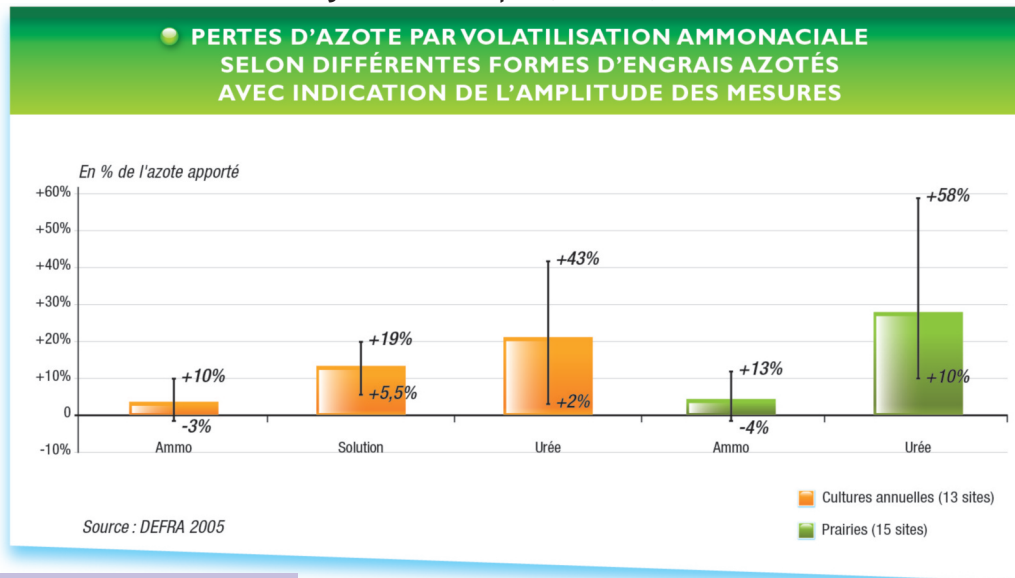


Figure 8

Les techniques pour prévenir le risque de volatilisation sont bien connues (cf. tableaux 11 et 12).

<b>Choix de la forme</b>	Préférer la forme nitrique aux formes uréique ou ammoniacale
<b>Positionnement</b>	Avant semis : enfouir ou localiser En couverture : apporter en période de forte croissance
<b>Conditions d'apport</b>	Éviter les fortes températures et le vent Épandre pendant ou avant un épisode pluvieux

Tableau 11 : recommandations pour limiter les émissions d'ammoniac lors de l'épandage des engrais azotés minéraux. Source : CORPEN 2006.

<b>Conditions climatiques</b>	Éviter le temps chaud et sec Épandre avant la pluie en faisant attention au risque de ruissellement ou de lessivage
<b>État du sol</b>	Éviter les sols compactés ou desséchés
<b>Dilution du lisier</b>	Si possible diluer le lisier pour favoriser son infiltration dans le sol <sup>7</sup>
<b>Incorporation</b>	Incorporer les fumiers dans les heures qui suivent Déposer le lisier au sol (rampe à pendillards) ou l'enfouir

Tableau 12 : recommandations pour limiter les émissions d'ammoniac lors de l'épandage des effluents d'élevage. Source : CORPEN 2006.

<sup>7</sup> En évitant les apports en sols saturés (limitation du ruissellement)

Cependant lorsque l'azote est apporté sur des cultures en place (céréales d'hiver, colza, prairies...), l'enfouissement n'est pas possible. L'importance des émissions va alors dépendre de la pluie dans les heures ou les jours qui suivent l'épandage. De plus, le contexte technico-économique (différentiel de prix des engrais, circuits d'approvisionnement, choix d'investissement dans le matériel d'épandage) peut amener l'agriculteur à choisir une forme d'engrais plus sensible à la volatilisation que les formes à dominante nitrique. C'est notamment le cas de l'utilisation de solution azotée sur céréales à pailles. Ce cas a été traité dans une étude menée par l'ITCF (aujourd'hui ARVALIS) et HYDRO-AGRI (aujourd'hui YARA) en 1997, sur la base de 120 essais menés de 1983 à 1995 (Le Souder et al. 1997). Comme le montre la figure 9, bien qu'affectés d'une certaine variabilité, les rendements à la dose optimale d'azote sont en tendance significativement inférieurs avec la solution azotée par rapport à la référence ammonitrate. Une majoration de la dose de solution azotée de 10 % en sols non calcaires est nécessaire pour obtenir en moyenne le même rendement qu'en ammonitrate. Notons qu'en sols calcaires une majoration de dose plus importante (15%) réduit l'écart mais ne le comble pas totalement. Aucune mesure directe de pertes par volatilisation ammoniacale n'a été réalisée à l'époque pour expliquer ces écarts. On peut donc en théorie attribuer cette moindre performance de la solution azotée à plusieurs pertes (volatilisation, organisation, dénitrification, lixiviation). Cependant, le fait 1) que parmi toutes ces pertes, c'est la volatilisation qui est la plus sujette à variation en fonction de la forme d'engrais ; et 2) que l'écart de performance entre la solution azotée et l'ammonitrate soit plus important en sols calcaires (pH élevé favorable à la volatilisation) laisse penser que la volatilisation ammoniacale est un facteur explicatif majeur de ces résultats.

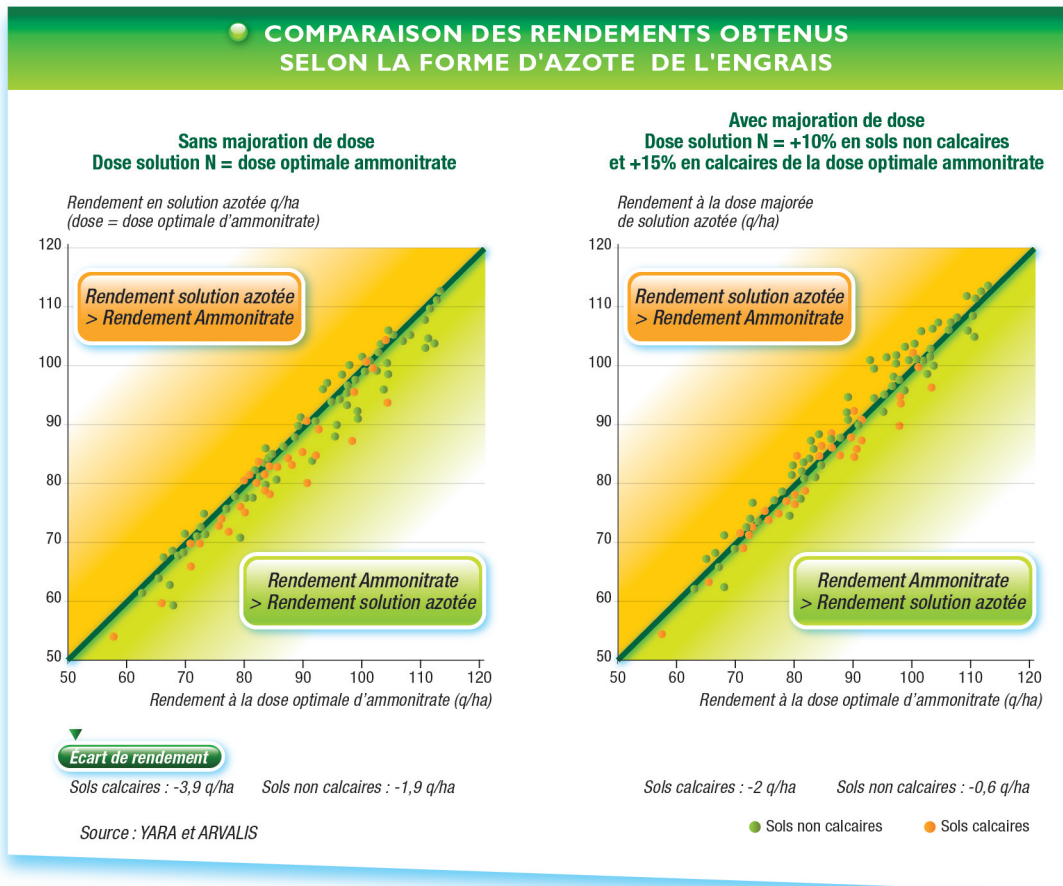


Figure 9

Comparaison des rendements obtenus d'une part à la dose optimale en ammonitrate et d'autre part en solution azotée avec ou sans majoration de dose. Sources : étude ITCF(ARVALIS)/HYDRO-AGRI (YARA) (Le Souder et al. 1997)



## Les apports d'azote par les produits résiduaux organiques

Depuis la dernière édition de cette brochure en 1996, le contexte d'utilisation des apports organiques a changé. Bien que les recherches sur la valorisation agronomique des PRO aient débuté depuis plus de 30 ans, nous sommes passés d'une époque où les épandages étaient souvent considérés comme un moyen d'évacuer des effluents d'élevage, à une époque où les enjeux économiques et environnementaux incitent beaucoup plus à raisonner les apports de matières organiques exogènes comme des fertilisants à part entière en prenant en compte précisément leur contribution.

Les produits résiduaux organiques (PRO) apportés sur une parcelle comprennent les effluents d'élevage (fumiers, lisiers, fientes...), les effluents agro-industriels (vinasses, effluents liquides de sucrerie, distillerie, féculerie, boues de papeteries...), les effluents urbains (boues de station d'épuration, composts urbains,...) et autres déchets. De par leur origine, leur forme, et les procédés industriels dont ils peuvent être issus, ces produits présentent une très grande diversité.

Les produits organiques ont une efficacité inférieure à l'engrais de référence (ammonitrate) pour plusieurs raisons :

### Leur composition

Schématiquement, ils contiennent deux fractions azotées, l'une minérale constituée, sauf exception, quasi exclusivement d'azote ammoniacal, et l'autre organique. La fraction d'azote sous forme uréique qui a un devenir dans le sol assez proche de la forme ammoniacale, n'est pas toujours dosée séparément et peut être comptabilisée (à tort) dans l'azote organique. Cette forme d'azote représente une part non négligeable de l'azote organique dans les fumiers et fientes de volailles. La proportion d'azote ammoniacal est très variable selon les produits. Elle peut aussi varier beaucoup pour un même type de produit. Le tableau 13 fournit pour quelques produits, la fourchette (valeur minimale et valeur maximale) de teneur en azote total et de proportion d'azote ammoniacal par rapport à l'azote total. Compte tenu de la forte variabilité des valeurs observées autour de ces moyennes de composition, il est toujours préférable de disposer de mesures réalisées sur le produit épandu. Au minimum, les paramètres nécessaires à sa caractérisation sont les suivants : teneur en matière sèche

- teneur en carbone
- teneur en azote total
- teneur en azote minéral (azote ammoniacal).

Exemples de PRO		Teneur en azote total (kg N par tonne ou m <sup>3</sup> de produit brut)	Amplitudes ou écart-type (σ)*	Pourcentage d'azote minéral (N-NH <sub>4</sub> et N-NO <sub>3</sub> ) par rapport à l'N total	Amplitudes ou écart-type (σ)*	Source
Compost MIATE* (avec support carbonaté) de 6 mois et plus		15,0		10%		EC (1)
Compost de déchets verts	Compost de déchets verts de plus de 6 mois	10,0	σ= +/-50%	5%		EC (1)
	Compost de déchets verts de moins de 6 mois	10,0		5%		EC (1)
Compost urbain	Compost de bio-déchets	15,0	σ= +/-30%	8%		EC (1)
	Compost d'ordures ménagères résiduelles (par TMB)	10,0	σ= +/-60%	10%		EC (1)
Digestats de méthanisation agricole	Digestats bruts	6,0	σ= +/-50%	80%	σ= +/-40%	EC (1)
	Fraction liquide après séparation de phase	5,2		46%		RE (1)
	Fraction sèche après séparation de phase	2,0		11%		RE (1)
Boues activées	Boues activées liquides IAA (C/N = 4.4)	2,9	0,5 à 5,2	20%		IL (4)
	Boues activées liquides égouttées IAA (C/N = 4.4)	4,1	2,7 à 5,4	20%		IL (4)
	Boues activées liquides urbaines (C/N = 4.9)	1,9	1,1 à 2,6	15%		IL (4)
	Boues activées liquides égouttées urbaines (C/N = 4.9)	3,3	2,2 à 4,4	15%		IL (4)
	Boues activées filtre presse non chaulées (C/N =5.9)	13,0		18%		IL (4)
	Boues activées pâteuses filtre à bandes (C/N=5.2)	11,0	7 à 15	8%		IL (4)
	Boues activées lits de séchage (C/N=5.4)	20,5	4 à 37	9%	1 à 16 %	IL (4)
	Boues activées lits à rhizophytes (C/N = 5.9)	8,0		11%		IL (4)
	Boues activées déshydratées chaulées (C/N=5.3)	10,2	7,9 à 12,5	4%		IL (4)
	Boues activées séchées (C/N=6.0)	43,0	38 à 48	7%	1 à 12 %	IL (4)
Boues digérées	Boues digérées anaérobies liquides IAA (C/N=4.2)	2,1		14%		IL (4)
	Boues digérées anaérobies déshydratées (C/N = 5.9)	11,3		13%		IL (4)
	Boues digérées anaérobies déshydratées chaulées (C/N=6.0)	9,5	7 à 12	7%		IL (4)
	Boues digérées anaérobies séchées (C/N=6.1)	43,0		2%		IL (4)
Autres boues	Boues lit bactérien/disque bio liquides (C/N=7.5)	1,9	0,9 à 2,8	15%		IL (4)
	Boues lit bactérien déshydratées chaulées (C/N =5)	7,5	5 à 10	8%		IL (4)
	Boues décanteur digesteur (C/N=8.1)	2,3	1,6 à 2,9	12%		IL (4)
	Boues décanteur (C/N= 6 à 9)	2,1	1,6 à 2,5	24%	13 à 34 %	IL (4)
	Boues de curage de lagunes urbaines (C/N= 6 à 11)	1,7	0,9 à 2,5	11%	5 à 17 %	IL (4)
	Boues physico-chimiques déshydratées (C/N = 5.5 à 17)	8,8	6 à 11,5	17%	8 à 25 %	IL (4)
	Boues physico-chimiques déshydratées chaulées (C/N = 10 à 13)	6,7	4,5 à 8,8	15%	9 à 20 %	IL (4)
Boues digérées traitées thermiquement	stockage de courte durée sur le site de la station (C/N=14)	9,8	9 à 10.6	13%		IL (4)
Compost de boues (C/N = 11.8)		11,5		9%		IL (4)
Matières de vidange (C/N = 11.8)		1,3	0,6 à 1,9	27%		IL (4)
Boues de stations d'épuration de papeterie	Boues mixtes papetières C/N < 15	4,8	2,3 à 7,2	5%		IL (4)
	Boues mixtes papetières 15 < C/N < 20	4,2	3,7 à 4,6	4%		IL (4)
	Boues mixtes papetières 20 < C/N < 35	2,8	2,1 à 3,4	3%		IL (4)
	Boues mixtes papetières					
	Boues de désencrage 40 < C/N < 70	1,6	1,2 à 1,9	<1%		IL (4)
Compost de fumier de porcs ou de LP + paille (Guernevez)	Compost de fumier de porcs jeune (moins de 6 mois)	6,7	σ= +/-30%	20%		EC (1)
	Compost de fumier de porcs âgé (de 6 à 10 mois)	6,7	σ= +/-30%	20%		E (1)
Fumier de porcs		8,0	σ= +/-30%	20%		EC (2) + EC (1)
Fumier de cheval		8,0				EC (2)
Fumier de caprins et ovins		7,0				EC (2)
Fumier de bovins	Fumier de bovin pailleux de litière accumulée	5,8	σ= +/-20%	10%		EC (1)
	Fumier de bovin décomposé d'étable animaux entravés	5,3	σ= +/-30%	10%		EC (1)
Fientes de volailles avec litière		25,0	σ= +/-20%	20%		EC (1)
Compost de fumiers de bovins	Compost de fumiers de bovins jeunes de moins de 6 mois	6,3	σ= +/-20%	10%		EC (1)
	Compost de fumiers de bovins vieux de plus de 6 mois	6,5	σ= +/-20%	5%		EC(1)
Compost de fientes de volailles avec litière	Compost de fientes de volailles avec litière de moins de 6 mois	23,0	σ= +/-40%	20%		EC(1)
	Compost de fientes de volailles avec litière de 6 mois à 10 mois	23,0	σ= +/-40%	20%		E (1)
Fientes de volailles	Fientes de volailles séchées (80%MS)	40,0	σ= +/-30%	8%		EC(1)
	fientes de volailles 60% de MS	24,0	σ= +/-13%	16%	σ= +/-25%	EC (2)
Lisier de porcs mixte		3,5	σ= +/-30%	60%		EC (1) + EC (2)
Lisier de bovins	Lisier de bovins dilué système couvert	1,6	σ= +/-70%	50%		EC (1)
	Lisier de bovins non dilué	4,5		44%	σ= +/-25%	EC (2)
Lisier de veaux		1,5	σ= +/-80%	60%		EC (1)
Vinasse de betterave concentrée		20,0	σ= +/-8%	2%	σ= +/-10%	EC (2)

Tableau 13 : teneur en azote total et proportion d'azote ammoniacal de produits résiduaux organiques.

EC : Essais au champ IL : Incubation au laboratoire RE : Références Etrangères E: Expertise SA : Simulations AzoFert AS: Autres Sources  
 EC (1) : Actualisation des connaissances pour l'épandage des PRO ACTA/ARTELIA juillet 2012  
 EC (2) : Travail en concertation avec les SATEGE 80-62-59, MUAD02, LDAR et INRA Laon, 2012  
 EC (3) : CASDAR 2007-2011, gestion durable des sols avec des produits organiques issus d'élevage.  
 EC (4) : Brochure Fertiliser avec les engrais de ferme, IE, ITAVI, ITCF, ITP, 2001  
 EC (5) : Etudes au champ avec courbe de réponse à l'N Casdar "déjections "CRAB / CA45 2011 2012  
 EC (6) : Engrais de ferme, valeur fertilisante, gestion, environnement, D. Ziegler et M. Hédut, 1991  
 EC (7) : Divers essais INRA, CRAB, ARVALIS  
 EC (8) : Essais réalisés par la CRAB et le CETIOM  
 EC (9) : Valeur agronomique et utilisation du compost de Guernevez, CA29, EDE29, APV Compost, 1994-1995  
 EC (10) : Compost et Etude du comportement agronomique de différents composts de lisier de porc, D. Hanocq CA29 et ISA terre, juin 1999  
 IL (1) : Etude par incubation, CRAB IF2O, 2006  
 IL (2) : Suivi d'installations CERAFEL Bretagne  
 IL (3) : Etude CRAB 2002  
 IL (4) : Synthèse de la valeur azotée des boues résiduelles de stations d'épuration issue du réseau missions « boues » APCA / ADEME mai 2007  
 IL (5) : Travaux de Morvan et al, 2005  
 RE (1) : Chambre d'agriculture Rhénanie du Nord - Westphalie -YARA  
 E (1) : Expertise du sous-groupe de travail  
 E (2) : Rattachement à un autre produit  
 SA (1, 2, 3, 4, 5, 6) : Etude sur l'approche des coefficients d'équivalence engrais (keq) via les simulations réalisées avec AzoFert à partir des courbes de minéralisation, Juillet 2012

## La volatilisation ammoniacale

Elle affecte la forme ammoniacale, de la même façon que celle d'un engrais de synthèse à la différence près que la présentation liquide semble renforcer le phénomène, qui peut varier de 0 à 90 % de la quantité totale d'azote ammoniacal apportée. Pour limiter voire annuler les pertes gazeuses sous forme ammoniacale, il est nécessaire d'enfouir le produit dans les heures qui suivent son épandage (cf. paragraphe Formes d'azote et volatilisation ammoniacale).

## La minéralisation aux dépens de la fraction organique n'est jamais totale

Elle dépend, comme celle de l'humus du sol, de facteurs liés au sol (humidité, température, ...) et au produit : fraction labile, rapport C/N.

Les facteurs de variation de la teneur en azote total à l'intérieur d'une même catégorie de PRO sont :

- Pour les produits solides, l'humidité (taux de matière sèche) elle-même liée (i) à la durée et au mode de stockage (ii) au mode de séchage (ex. fientes de volaille)
- Pour les produits liquides, la dilution elle-même liée au mode d'alimentation, au mode de stockage ;
- L'espèce animale et son stade physiologique ;
- La durée en bâtiment ;
- L'alimentation biphasé ou standard pour les produits porcins ;
- La nature et la proportion des produits d'origine pour les composts urbains et les composts de déchets verts par exemple.

## Les apports d'azote par les engrais minéraux

Les engrais azotés minéraux se présentent sous de nombreuses formes :

- **Engrais simples solides** : ammonitrate, urée ...
- **Engrais simples liquides** : solution azotée, urée liquide
- **Engrais binaires et ternaires solides** : nombreuses formulations NP, NK, NPK
- **Formes diverses** : engrais « foliaires » associées ou non avec des oligo-éléments, formulation élaborée avec des effets retards...

Les engrais azotés minéraux simples et composés sont mis sur le marché soit en conformité avec le règlement européen RCE N°2003/2003 pour les engrais minéraux soit avec la norme française NF U 42-001 : 1981 d'application obligatoire pour les engrais organo-minéraux. Les principales dénominations d'engrais et les exigences de teneurs minimales dans le règlement et dans les normes sont rappelées dans le tableau 14.

*Ce tableau est uniquement informatif; toute mise en marché doit être faite à partir des informations du règlement ou des normes.*

Catégories UNIFA définies dans le glossaire statistique	Dénominations dans le règlement ou les normes	Teneur(s) minimale(s) <small>seules les teneurs minimales mentionnées dans le règlement ou les normes sont indiquées ; pour les teneurs maximales, se référer à ces réglementations.</small>
<b>Simple N</b>		
Ammonitrates	Ammonitrate	20% N nitrique + ammoniacal
	Sulfonitrate d'ammoniaque Sulfonitrate magnésien	25% N ammoniacal + nitrique dont 5% N nitrique 19% N ammoniacal + nitrique, 6% N nitrique et 5% MgO soluble dans l'eau
Solution azotée	Solution azotée	15% N total avec présence d'azote sous une ou plusieurs formes (nitrique, ammoniacal ou uréique)
Urée	Urée	44% N total
Autres simple N	Nitrate de soude et nitrate du Chili	15% N nitrique
	Sulfate d'ammoniaque	20% N ammoniacal
	Cyanamide calcique Cyanamide calcique nitraté	18% N total 18% N total avec 1% minimum de N nitrique
	Nitrate de calcium (de chaux) Nitrate de calcium (de chaux) et de magnésie	15% N total ou 15% N nitrique + ammoniacal 13% N nitrique, 5% MgO soluble dans l'eau
	Engrais azoté solide	15% N total
	Engrais azotés solides basse teneur	3% N total
<b>Composés NP, NK, NPK, OM</b>		
Phosphate diammonique (DAP), phosphate monoammonique (MAP)	Engrais NP	Généralement de type 18.46.00 pour le DAP et 12.50.00 pour le MAP
Autres NP	Autres engrais NP	18 % de (N+P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) et 3% de N et 5 % de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
NK - NPK	Engrais NK	18% de (N+K <sub>2</sub> O) et 3% de N et 5% de K <sub>2</sub> O
	Engrais NPK	20% de (N+P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> + K <sub>2</sub> O) et 5% de chaque selon le règlement ou 3% de chaque selon la norme
Organo - minéraux	Engrais organo-minéral (uniquement selon la norme NFU 42001 : 1981)	Contenant au minimum 1% de N organique
	- N	3% N
	- NPK	7% de N + P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> + K <sub>2</sub> O et 2% de chaque élément
	- NP	7% de N + P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> et 2% de N et 4% de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
- NK	7% de N + K <sub>2</sub> O et 2% de N et 4% de K <sub>2</sub> O	

**Tableau 14** : dénominations et exigences de teneurs minimales des engrais azotés minéraux selon la norme NF U 42-001. Source : UNIFA.

La composition des principaux engrais azotés avec les valeurs courantes en % d'azote total est précisée dans le tableau 15.

Engrais	Présentation	% N total Valeurs courantes	Dont en % du N total			Éléments secondaires déclarés
			% sur la masse	% N uréique	% N ammoniacal	
Ammonitrate	Prill ou granulé	28-34%	0	50%	50%	SO <sub>3</sub> / MgO
Ammonitrate calcaire	Granulé	20 - 28%	0	50%	50%	
Ammonitrate soufré	Granulé	20 - 28%	0	50%	50%	SO <sub>3</sub> MgO facultatif
Sulfonitrates	Granulé	19 - 27%	0	73%	27%	SO <sub>3</sub> MgO facultatif
Solution azotée	Liquide	30%	50%	25%	25%	
Solution azotée soufrée	Liquide	15 - 28%	variable	variable	variable	
Urée	Prill ou granulé	44 - 46%	100%	0%	0%	
Sulfate d'ammoniaque	Cristal, prill ou granulé	20 - 21%	0	100%	0%	
Nitrate calcium (de chaux)	Cristal, ou granulé	15%	0	7%	93%	
Autres simples N	Granulé	min 3%	variable	variable	variable	
Composés azotés NP-NP-NPK	Granulé, compacté ou en mélange	min 3%	variable	variable	variable	

**Tableau 15 :** composition des principaux engrais azotés (valeurs courantes). Source : UNIFA

Compte-tenu de leurs compositions variées, on peut s'attendre à des différences d'efficacité (variation de CAU) liées à plusieurs phénomènes, comme la volatilisation de la partie ammoniacale par exemple. Dans la pratique, ces différences, quand elles ont pu être mises en évidence, sont très liées aux conditions d'applications (sol, conditions climatiques lors de l'application) et à la culture considérée. En l'occurrence, les références existantes sur l'efficacité relative des différentes formes minérales d'engrais azotés sont détaillées dans les fiches par culture.

Le code des bonnes pratiques agricoles relatif à la directive Nitrates spécifie à l'article 6 de veiller à l'uniformité de l'épandage de la dose déterminée en s'assurant de l'homogénéité du produit épandu et en contrôlant le réglage du matériel utilisé. Le COMIFER a actualisé en 2009 ses conseils dans un nouveau « Guide d'optimisation de l'épandage des engrais minéraux solides ». Le rôle et l'importance des caractéristiques physiques de l'engrais sur la qualité d'épandage y sont précisés ainsi que les bonnes pratiques de stockage permettant de préserver les propriétés de l'engrais au cours du temps.

En France les distributeurs centrifuges sont les appareils les plus fréquemment utilisés pour les engrais solides granulés ainsi que les pulvérisateurs pour les solutions azotées liquides.

Le guide du COMIFER fait le point des progrès apportés par les constructeurs de machines pour améliorer la précision d'épandage tout en augmentant la performance des chantiers et en réduisant les temps de travaux. Les dispositifs de réglages sont en partie automatisés. Ils deviennent plus précis et les tableaux de réglage fournis aux agriculteurs sont plus complets en référencant les engrais de différentes origines par producteur, voire par usine.

De nombreuses solutions techniques sont développées pour réaliser l'épandage de bordure de parcelle en évitant la projection d'engrais en dehors des champs. La gestion automatisée des départs et des arrivées en fourrière permet une bonne maîtrise des recouvrements évitant les surdosages localisés et économisant de l'engrais.

A l'intérieur des parcelles hétérogènes les systèmes de modulation d'épandage permettent de différencier des niveaux d'apport d'azote par zone à l'aide d'une commande automatisée ou manuelle des trappes d'ouverture des trémies de l'épandeur et d'un système de guidage très précis par GPS.

L'épandage d'engrais solide granulé est considéré comme précis lorsque la dose apportée en tout point de la parcelle est proche de celle que l'on a déterminée.

La valeur du Coefficient de Variation (CV) dépend de la méthode de contrôle :

0% < CV < 10% sur banc d'essai en bâtiment

0% < CV < 15% en épandage plein champ

Les distributeurs d'engrais solide en nappe et centrifuge qui respectent les exigences de la norme européenne EN 13739 disposent d'un marquage de conformité à la norme avec un label « Pour notre environnement ».

### **Engrais spéciaux à libération progressive et/ou contrôlée**

Cette dénomination regroupe des formulations dont le but est d'accroître l'efficacité de l'azote apporté dans certaines conditions d'utilisations et/ou de réduire le nombre d'apports. Trois grands types peuvent être identifiés :

- Les engrais comportant de l'azote de synthèse organique
- Les engrais qui associent à l'apport d'azote un inhibiteur ralentissant temporairement la transformation des formes d'azote dans le sol
- Les engrais azotés enrobés (partiellement ou totalement)

Les engrais simples N ou composés NP-NK-NPK comportant de l'azote de synthèse organique figurent dans les dénominations du RCE N°2003/2003 ou de la norme française NF U 42-001-1 rendue d'application obligatoire. Les engrais azotés incorporant certains inhibiteurs sont dans le règlement européen CE N°2003-2003. Les engrais qui ne sont repris ni dans la norme française ni dans le règlement européen doivent faire l'objet d'une autorisation pour pouvoir être commercialisés.



Engrais à libération progressive et contrôlée				
	à azote de synthèse organique	avec inhibiteur d'uréase	avec inhibiteur de nitrification	Engrais enrobés
<b>Type d'engrais</b>	N-NP-NK-NPK	N-NP-NK-NPK avec N uréique	N-NP-NK-NPK avec N ammoniacal	N-NP-NK-NPK avec N minéral
<b>Composition particulière</b>	UF : Urée formaldéhyde IBDU : Isobutylidène diurée CDU : Crotonylidène diurée	N-(n-butyl) thiophosphorique triamide (NBPT) N-(2-nitrophényl) triamide d'acide phosphorique (2-NPT)	Nitrapyrine Dicyandiamide (DCD) Diméthyl pyrazol phosphate (DMPP) 1,2,4-triazole (TZ) 3-méthylpyrazole (MP)	enrobant à base de soufre S ou de polymères synthétiques
<b>Mode d'action</b>	hydrolyse du N de synthèse organique	Inhibition de l'hydrolyse de l'urée	Inhibition de la nitrification	Délitage ralenti des granulés
<b>Durée de l'effet</b>	2 à 3 mois	1 à 2 semaines	6 à 8 semaines	3 à 18 mois
<b>Effets revendiqués</b>	Limite la lixiviation	Limite la volatilisation	Limite la lixiviation et les émissions de N <sub>2</sub> O	Limite la lixiviation
<b>Obligations légales</b>	NF U 42-001-1 RCE N°2003/2003	RCE 2003/2003	DCD : RCE N°2003/2003 DMPP : homologation, reconnaissance mutuelle (RCE 764/2008)	RCE 2003/2003 Homologation

Pour en savoir plus :

**CORPEN 2006** : Les émissions d'ammoniac et de gaz azotés à effet de serre en agriculture. 98p.

**EMEP-CORINAIR guidebook 2007**.

**Le Souder C., Taureau J.C., Richard H., Berhaut F., 1997**. Formes d'engrais ammonitrate et solution azotée : quelle incidence sur le rendement et la teneur en protéines du blé tendre d'hiver. Perspectives Agricoles, 221 (février), 67-74.

**Makowski D., Tremblay M., Debroize D., Laurent F., 2000**. Epandages hétérogènes d'engrais azotés : quel impact économique et environnemental? Perspectives Agricoles 263 (décembre) 56-61.



## 1

# Le fractionnement et les outils de pilotage

## Modalités d'apport de l'azote et outils de pilotage

### Le fractionnement de la dose d'azote

Le fractionnement des apports d'azote répond à un triple objectif :

- favoriser le prélèvement d'azote aux dépens de l'engrais en privilégiant les périodes de croissance active du couvert ou de sensibilité de la culture à une carence azotée.
- minimiser les risques de pertes d'azote (par voie gazeuse ou par lixiviation) liées à des conditions climatiques défavorables et difficilement prévisibles : excès d'eau, déficit pluviométrique, températures élevées.
- à prélèvement constant d'azote, favoriser pour certaines espèces le transfert vers les organes récoltés (par exemple pour augmenter la teneur en protéines du grain chez les céréales).

La poursuite de ces objectifs permet d'améliorer la fraction de l'azote issu de l'engrais absorbé par le couvert. L'augmentation du coefficient d'utilisation de l'engrais azoté est un levier de maîtrise des pertes d'azote hors de la parcelle agricole.

Le nombre d'apports recommandé pour chaque espèce résulte d'un compromis entre :

- **l'intérêt agronomique du report** d'une quantité variable de la dose d'azote sur un ou plusieurs apports en cours de végétation.
- **la faisabilité d'apports multiples** (possibilités techniques d'apports tardifs sur des couverts très développés, risques éventuels de dégâts foliaires,...).

Les préconisations en matière de fractionnement des apports d'engrais azotés doivent donc préciser :

- **les règles** de détermination des quantités à épandre aux différents apports. Ces règles tiennent généralement compte des besoins prévisionnels à couvrir jusqu'à la prochaine intervention. Néanmoins, il peut être indispensable d'apporter en début de cycle une quantité minimale d'azote qui garantisse la mise en place d'une couverture foliaire suffisante pour assurer des conditions de croissance ultérieures satisfaisantes.
- **les stades** optimaux de ces apports.
- les éventuelles recommandations sur **le choix des modes d'apport** : les formes d'engrais, les types d'épandage (en plein ou localisé, par voie foliaire, associé à l'eau d'irrigation,...), les conditions climatiques à privilégier.

Le fractionnement est optimisé quand ses règles de décision ne s'appuient plus sur une analyse fréquentielle a posteriori du gain technique et économique calculé sur un réseau d'essais, mais sur des indicateurs d'aide au déclenchement des apports complémentaires : c'est le pilotage.

Les pratiques de fractionnement adaptées sont détaillées dans les fiches par cultures à paraître.

## Le pilotage

Le calcul prévisionnel de la dose totale d'engrais à apporter est entaché de deux incertitudes :

- Incertitude sur les besoins réels en azote du couvert (difficulté de prévoir la production qui sera réellement atteinte)
- Incertitude sur la détermination des différents termes du bilan (approximations, hypothèses sur les postes de minéralisation...).

En conséquence, il est intéressant de disposer d'un outil de diagnostic de l'état de nutrition azotée du couvert en cours de culture et de règles de décisions associées permettant d'ajuster à la hausse ou à la baisse la dose d'engrais à apporter. C'est cette association diagnostic/règle de décision qui définit un outil de pilotage.

### Les technologies de diagnostics d'état de nutrition azotée et les règles de décision d'ajustement de la dose à apporter

Un outil de pilotage de la fertilisation azotée doit tout d'abord comporter un système de diagnostic de l'état de nutrition azotée de la culture. En évaluant le statut azoté de manière plus ou moins indirecte selon la technologie employée, il est alors possible de comparer ce dernier à un état de « référence » en fonction du stade de la culture, des objectifs de production attendus (quantitatif ou qualitatif) et, dans certains cas, des conditions agro-climatiques au moment de la mesure. Dans la plupart des outils, l'état de référence est plus ou moins lié à la notion d'INN (Indice de Nutrition Azotée) développée dans les années 80 et 90, correspondant à la définition d'un statut azoté maximisant la production de biomasse par le couvert au moment de la mesure.

Les technologies employées pour accéder à l'état de nutrition azotée ont suivi les progrès des capteurs agronomiques mis à la disposition de la profession agricole. Initialement basés sur des prélèvements de plantes (jus de bas de tige des céréales par exemple), les outils disponibles ont rapidement employé des capteurs optiques par transmittance (principe du chlorophylle-mètre) ou réflectance (par capteurs embarqués sur des appareils manuels, sur des engins agricoles ou sur satellite). Les apports des capteurs embarqués sur des machines agricoles ou la télédétection ont permis le dernier bond technologique qu'a constitué le passage d'une mesure ponctuelle à une mesure « surfacique » dans les parcelles. Le tableau 16 rassemble l'essentiel des informations concernant les capteurs utilisés dans les outils diffusés actuellement en France. La **sensibilité** est la caractéristique de l'outil indiquant sa plus ou moins grande capacité à détecter des états de faibles sous-alimentations. La **spécificité** est la caractéristique de l'outil indiquant qu'une variation du diagnostic est plus ou moins liée de manière exclusive à une variation de l'état de nutrition azotée de la culture.

Indicateurs *	Caractéristiques de l'indicateur				
	sensibilité	spécificité	fidélité	acquisition	spatialisation
Croissance	-	+	+++	++	-
Couleur / jaunissement	+	+	++	++	-
Teneur NO <sub>3</sub>	++	++	+	+	-
Transmittance	++	++	+	++	-
Réflectance	++	++	+	(++)	+++
Fluorescence	+	+	++	- à ++	- à ++

**Tableau 16** : capteurs utilisés dans les outils de pilotage de la fertilisation azotée diffusés actuellement en France. Source : F. LAURENT, M.H. JEUFFROY 2004.

Les règles de décision afférentes à la valeur de l'indicateur (dose complémentaire et modalité d'apport) ont été définies par outils et par culture sur la base de réseaux expérimentaux multi-locaux.

### Le pilotage de la fertilisation azotée des cultures

Pour des raisons de pertinence et/ou de faisabilité technique, toutes les cultures ne disposent pas d'outil de pilotage de la fertilisation azotée. Le tableau 17 en donne un bref aperçu. Les outils disponibles et la façon dont ils s'insèrent dans les itinéraires techniques (articulation avec les pratiques de fractionnement notamment) sont détaillés dans les fiches par culture en fin de brochure. Notons enfin que tous les outils s'accompagnent de prescription en terme de conditions d'utilisation à respecter. Ces dernières découlent directement du domaine de validité de chaque outil.

Type indicateur	Compartment	Organe	Nom	Source	Outil de calcul prévisionnel dose N	Stratégie initiale	Blé tendre	Blé dur / Orge	Maïs	Pomme de terre	Colza	Tournesol	Fraisier / Melon	Pdt primeur	Carotte	Aubergine / Tomate
croissance		parties aériennes	Réglette azote	CETIOM	méthode bilan (X)	X					■					
couleur ( jaunissement /témoin)		parties aériennes	Bande Double Densité	CRAL Agro-Transfert	méthode bilan (X)	0	■									
couleur ( jaunissement /témoin)		parties aériennes	Héliotest	CETIOM	méthode bilan (X)	0						■				
teneur NO <sub>3</sub>	jus pression	base tige, pétiole	JUBIL	INRA ARVALIS	méthode bilan (X)	X - 40	■	■	■	■						
teneur NO <sub>3</sub>	jus pression	base tige, pétiole	RAMSES	INVIVO	dose base (APM Azote potentiellement minéralisable)	sans excès	■	■	■	■						
teneur NO <sub>3</sub>	jus pression	base tige, pétiole	RAMSES 2	INVIVO	méthode bilan- nEPICLES(X)	X - 40	■	■								
teneur NO <sub>3</sub>	jus pression	base tige, pétiole	PILazo	CTIFL	méthode bilan (X)	X							■	■	■	■
transmittance	limbe	feuille (F1)	N Tester	YARA ARVALIS	méthode bilan (X)	X - 40	■	■	■							
transmittance	limbe	feuille (F1/F2)	DIGITES	INVIVO	méthode bilan EPICLES(X)	X - 40	■	■								
réflectance	teneur chlorophylle	canopée	GPN Pilot	GPN	méthode bilan (X)	X - 40 à X - 60	■	■		■						
réflectance	teneur chlorophylle	canopée	Farmstar	Astrium ARVALIS CETIOM	méthode bilan (X)	X - 40	■	■			■					

**Tableau 17 :** Aperçu des outils de pilotage de la fertilisation azotée disponibles en France. Source : F. LAURENT, M.H. JEUFFROY 2004 ; actualisation non exhaustive COMIFER 2010.

### La localisation des engrais azotés

Certains semoirs sont équipés d'appareils permettant de localiser l'engrais azoté au plus près des racines de la culture. Cette technique n'est praticable qu'à des stades de développement très précoces, la plupart du temps au semis. La pertinence agronomique de ces techniques (gain pour la culture, absence de toxicité de l'engrais pour les racines...) est généralement spécifique de chaque culture. Cet aspect sera donc abordé dans les fiches cultures.

### Pour en savoir plus :

F. LAURENT, M.H. JEUFFROY 2004. Outils de pilotage de la fertilisation azotée : bilan et perspectives, in Gestion de l'Azote - Avancées Scientifiques et Amélioration des Pratiques - 5 février 2004 - Paris.



# Calcul d'un bilan prévisionnel sur prairie

## Références pour le calcul d'un bilan prévisionnel sur prairie

L'exploitation de la prairie n'est pas décidée pour obtenir une production végétale maximale mais pour satisfaire les besoins d'un troupeau, en quantité et qualité, au cours du temps. Sa fertilisation se raisonne donc dans ce cadre de contraintes qu'il s'agit de bien définir.

La prairie est une production nécessitant une transformation par l'animal, et l'augmentation de sa production n'est intéressante que dans la mesure où le supplément est effectivement consommé et transformé en produits animaux. La biomasse peut être pâturée ou récoltée, le choix du mode d'utilisation étant un facteur d'adaptation du système fourrager où la prairie est souvent complémentaire d'autres cultures fourragères telles le maïs.

La production utile de la prairie résulte de croissances successives, et de la quantité d'azote minéral présente dans le sol, à chaque pousse de l'herbe.

Les conditions pédo-climatiques qui varient avec les saisons, agiront :

- sur le potentiel de croissance, généralement maximale au printemps,
- sur la minéralisation nette de l'azote organique du sol (vitesse de croissance augmentée),
- sur la durée de végétation qui peut être longue en climat océanique doux, ou limitée à quelques mois, en climat continental séchant, ou en zones montagneuses.

Enfin la présence de légumineuses dans la prairie peut assurer tous les besoins azotés de la production fourragère utile.

Les bases du raisonnement de la fertilisation azotée en prairies ont été posées en 2000, à partir du concept de Coefficient Apparent d'Utilisation évoqué au chapitre 2. Ce chapitre décrit le déroulement des calculs proposés et apporte des éléments de réflexions sur les diverses façons de renseigner certaines questions clés du calcul :

- Comment fixer un objectif de production,
- Comment estimer les sources d'azote autres que les apports maîtrisés : la fourniture d'azote minéral par le sol, la fixation symbiotique des légumineuses prairiales, la contribution directe des restitutions au pâturage de l'année.

Plusieurs exemples d'applications régionales de la méthode seront fournis.

## La méthode de calcul adaptée à la prairie

En repartant de l'équation [4'], l'azote absorbé par la prairie (Pf) provient de la fourniture du sol (PO) et des fertilisants minéraux (X) et organiques (Xa) apportés, affectés d'un coefficient apparent d'utilisation.

$$[14] \quad Pf = PO + CAU (X + Xa)$$

Pf : besoins d'azote de la culture = azote absorbé par la prairie jusqu'à la récolte (kgN/ha)

PO : fournitures globales d'azote minéral par le sol (kgN/ha)

X : dose d'azote provenant de l'engrais minéral (kgN/ha)

Xa : équivalent engrais minéral de l'azote fourni par le PRO (kgN/ha)

CAU : coefficient apparent d'utilisation de l'engrais minéral (sans unité)

**[15]  $P_f = N_{exp} + N_{réserves}$**

Avec :  **$N_{exp}$**  : quantité totale d'azote exportée par la prairie (kgN/ha)

**$N_{réserve}$**  : azote mis en réserve dans les organes non récoltés (feuilles, gaines, tiges, racines)

Dans le cas d'un système de conduite de la prairie "stable", l'utilisation de l'azote mis en réserve ( $N_{réserve}$ ) à chaque récolte est à peu près toujours la même à l'entrée et à la sortie de la période de croissance de la prairie. Par conséquent, ce terme n'est pas à prendre en compte et on obtient la relation suivante :

**[16]  $N_{exp} = P_0 + CAU \times (X + X_a)$**

A l'échelle d'une année et pour une prairie qui ne se dégrade pas trop, ce régime stationnaire est admissible.

Pour une prairie pâturée avec des légumineuses,  $P_0$  est équivalent à la somme des trois termes suivants :

**[17]  $P_0 = N_0 + N_{rest} + F_s$**

Avec :  **$N_0$**  : fourniture d'azote minéral par le sol d'un témoin non fertilisé (kgN/ha)

**$N_{rest}$**  : contribution directe des restitutions au pâturage de l'année (kgN/ha)

**$F_s$**  : quantité d'azote fixé par les légumineuses présentes (kgN/ha)

La fourniture d'azote minéral par le sol ( $P_0$ ) est estimée à partir de la quantité d'azote absorbé par la même prairie non fertilisée et sans légumineuses ( $N_0$ ), à laquelle on ajoute la contribution directe des restitutions au pâturage de l'année ( $N_{rest}$ ) à l'alimentation azotée de l'herbe, et la quantité d'azote fixé par les légumineuses présentes ( $F_s$ ).

Avec les relations précédentes, nous obtenons l'équation suivante :

**[18]  $X + X_a = [N_{exp} - (N_0 + N_{rest} + F_s)] / CAU$**

**Le calcul de la dose d'azote minéral de l'engrais X à apporter est :**

**[19]  $X = \{ [N_{exp} - (N_0 + N_{rest} + F_s)] / CAU \} - X_a$**

Avec :  **$X_a$**  : équivalent engrais minéral efficace ; ( $X_a = \%N_{pro} \times Q \times KeqN$  Cf. [11])

**$\% N_{pro}$**  = teneur en azote total du produit (% par unité de volume ou de masse)

**Q** = volume ou masse de produit épandue par hectare

**KeqN** : Coefficient d'équivalence engrais N minéral efficace

**$N_{exp}$**  : Quantité totale d'azote exportée par la prairie sur l'année ou besoin prévisionnel

**$N_0$**  : Fourniture d'azote minéral par le sol (témoin fauché non fertilisé sans légumineuses)

**$N_{rest}$**  : contribution directe des restitutions au pâturage de l'année (kgN/ha)

**$F_s$**  : quantité d'azote fixé par les légumineuses présentes et absorbé par la prairie (kgN/ha)

**CAU** : Coefficient apparent d'utilisation de l'engrais minéral

## **Calcul de la fertilisation azotée de la prairie : évaluation des différents termes de l'équation**

Rappelons les différentes étapes du calcul :

1 - Se fixer un **objectif de production**,

2 - Calculer les **exportations en azote** correspondantes à cette prédiction,

- 3 - Estimer l'importance des différentes sources d'azote autres que les apports organiques et minéraux :
  - 3.a - la fourniture d'azote minéral par le sol  $N_0$
  - 3.b - la contribution directe des restitutions au pâturage de l'année  $N_{rest}$
  - 3.c - et de la fixation symbiotique  $F_s$
- 4 - Estimer la valeur du CAU
- 5 - Calculer l'effet direct des engrais de ferme
- 6 - En déduire l'apport d'azote minéral nécessaire : X, dont le calcul peut s'appliquer à l'échelle de la repousse, de la saison ou de l'année

Ces étapes sont détaillées ci-dessous :

### 1 - Fixer un objectif de production

Comme expliqué dans l'introduction, la fixation d'un objectif de production d'une prairie dans une exploitation se raisonne à la fois en fonction du potentiel parcellaire et de la fonction assignée à la parcelle pour satisfaire les besoins des animaux. Afin de fixer des objectifs de production cohérents avec le fonctionnement du système fourrager, trois approches sont possibles, illustrées par des exemples régionaux .

- Une approche globale à partir de la valorisation moyenne de l'herbe de l'exploitation à l'échelle de l'année

Il s'agit de partir des objectifs de production animale (lait, viande, calculés en fonction de la production individuelle et du chargement), du choix de ration alimentaire (part du maïs et des concentrés) et de l'ingestion pour en déduire la quantité d'herbe « objectif » sur l'ensemble de la sole prairiale.

A titre d'exemple, la production moyenne de la prairie valorisée par hectare se calcule pour une exploitation laitière de la façon suivante :

**[20] (nombre d'UGB x (besoins MS/UGB/an) - (achats de fourrages +/- Δ de stocks) - consommation de maïs ensilage et autres) / ha prairies**

Ce résultat correspond bien à une évaluation de la valorisation de l'herbe par les animaux et non à une évaluation de la production des prairies.

Pour obtenir ensuite la production "au champ":

- dans le cas d'une fauche, on considère une perte de 10 à 20% au stockage sur la proportion de parcelles fauchées, et donc on multiplie par 1,15 la valorisation moyenne, afin de tenir compte des pertes entre le champ et l'auge,
- au pâturage, on réalise également une correction en considérant que 15% de la biomasse produite n'est pas valorisée, du fait des pertes possibles dues au piétinement des animaux ou à une légère sous-utilisation de la prairie. On multiplie donc par 1,15 la valorisation moyenne.

On module ensuite les productions par parcelle autour de cette production moyenne au champ en fonction des potentialités des parcelles et du caractère plus ou moins intensif du mode d'exploitation, généralement lié. On peut enfin réaliser un calcul de cohérence qui consiste à sommer l'ensemble des productions parcellaires retenues et à vérifier si on atteint bien la valorisation moyenne calculée dans la première étape.

- Une approche parcellaire par les niveaux de production accessible à l'échelle de l'année ou de la saison

Celle-ci peut se faire :

- soit en valorisant directement la connaissance des conditions pédoclimatiques locales de l'éleveur ou du technicien, pour estimer un objectif de production en particulier dans des situations très typées : prairies de coteaux, de fond de vallée...
- soit en utilisant un référentiel régional bâti par expertise.

### Exemple d'application régionale

Niveau de production accessible en Pays de la Loire en fonction de l'hydromorphie hivernale et la pousse estivale (Brochure fertilisation des prairies des Pays de la Loire). Les fauches correspondent à une récolte en ensilage ou en foin.

Excès d'eau Pousse estivale \ hivernal	Nul		Moyen		Fort
	<b>Forte</b>	Pâture 10 t MS	Fauche + pâture 11 t MS	Pâture 9 t MS	Fauche + pâture 10 t MS
<b>Ralentie</b>	Pâture 8 t MS	Fauche + pâture 9 t MS	Pâture 7 t MS	Fauche + pâture 8 t MS	Foin (+ pâture) 6 t MS
<b>Très faible à nulle</b>	Pâture 6 t MS	Fauche + pâture 7 t MS	Pâture 5 t MS	Fauche + pâture 6 t MS	Foin (+ pâture) 4 t MS

- Une approche parcellaire basée sur l'ingestion des animaux à l'échelle du printemps pour les prairies pâturées

Les techniciens d'élevage se repèrent ici davantage par rapport aux besoins des animaux et veulent estimer la quantité d'herbe nécessaire pour assurer leur alimentation. On peut donc partir de la pratique "moyenne" de pâturage, selon l'éleveur, en année "normale" (par exemple 3 vaches par hectare, ou 33 ares/vache au printemps sur une durée de 3 mois) puis estimer la quantité d'herbe ingérée en connaissant l'ingestion moyenne des animaux. On approche ainsi un objectif de production permettant de satisfaire les besoins des animaux sur le printemps. Comme pour l'approche globale, on considère que l'herbe produite non consommée par les animaux constitue un recyclage interne qui sera intégré dans la fourniture par le sol.

Le tableau 18 propose des références sur les quantités d'herbe ingérées en fonction d'objectif de production. Des mesures des hauteurs d'herbe, effectuées à l'entrée et à la sortie des animaux en fermes expérimentales, conduisent aux ordres de grandeur d'ingestion que l'on a directement majoré de 15% pour les transformer en objectifs de production pour les différents types d'animaux et de niveaux de production. Les performances peuvent cependant varier en fonction du niveau de complémentation et des conditions de pâturage.

Type d'animal	Performances	Herbe à produire kg MS/j
<b>Vache laitière</b> l lait/j	15 l ou V. tarées*	13
	20 l (<6000 l/an)*	16
	25 l (6-8000 l/an)*	17
	30 l (8-9000 l/an)*	18
<b>Vache allaitante</b> vêlage hiver vêlage automne	650 kg + veau 150 kg	19
	700kg + veau 250 kg	22
<b>Bovin en croissance</b>	Poids vif	
	200 kg	5 (génisses < 1 an)*
	300 kg	7 (8 kg, gén. 1-2 ans)*
	400 kg	10
	500 kg	12 (génisses 2-3 ans)
	600 kg	13

**Tableau 18 :** Quantité d'herbe ingérée en kg MS/animal/j par type d'animal pour le pâturage tournant de printemps - Hauteur d'herbe sortie 5.5-6 cm . Sources : INRA, 2007 & CA Normandie.

\* : références par niveau de production annuelle ou âge d'animaux (plus utilisées en Bretagne)

**Exemple :** l'éleveur prévoit de faire pâturer au printemps sur une parcelle donnée ses vaches allaitantes pendant 3 mois au printemps à 33 ares/couple mère-veau soit 3 couples/ha. On évalue par conséquent la production à atteindre à 3 vaches allaitantes :  
 $3VA \times 90j \times 19 \text{ kg MS/VA} = 5.1 \text{ t MS/ha au printemps.}$

Les objectifs de production sont ensuite déclinés en fonction du potentiel parcellaire. Cette valeur peut être confrontée à l'approche précédente pour discuter de la crédibilité ou du positionnement par rapport au référentiel des niveaux de production accessibles. **Cette approche simplifiée est essentiellement utilisée pour des systèmes très pâturant (en particulier en Normandie) et le calcul des objectifs de stockage d'herbe doit être effectué par ailleurs.** Elle est assez complémentaire de la 1<sup>ère</sup> méthode, en fournissant des références calées sur les besoins des divers types d'animaux et en permettant de raisonner les rendements pas catégories de parcelles (VL, génisses).

Le tableau 19 présente la synthèse des trois approches afin de faire ressortir les avantages et inconvénients de chaque méthode, et de préciser le cadre d'utilisation de chacune et leur complémentarité. Les réseaux de références (méthode 2) se sont multipliés, et pourront être disponibles pour les praticiens (Pays de Loire, Normandie, Auvergne, Savoie,...).

	Avantages	Inconvénients
1 - une approche globale à partir de la valorisation moyenne de l'herbe de l'exploitation à l'échelle de l'année	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; sécurise les stocks par une prise en compte d'une valorisation moyenne définie par l'éleveur au regard des années passées</li> <li>&gt; généralisable sur l'ensemble du territoire sans référentiel de production</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; raisonnement à niveau de production constant : n'explore pas forcément la potentialité de la prairie</li> <li>&gt; approximation des potentiels des prairies car beaucoup d'étapes avec intégration de coefficients (pertes au tockage, pertes par piétinement...), distribution d'un rendement moyen sur les parcelles de l'exploitation... à partir des connaissances agronomiques du technicien ou de l'éleveur.</li> <li>&gt; il manque une bonne estimation des besoins par lot d'animaux (complémentarité avec méthode 3)</li> </ul>
2 - une approche parcellaire par les niveaux de production accessible à l'échelle de l'année ou de la saison	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; recherche du potentiel de production de la prairie qui permet une utilisation optimisée de la SAU</li> <li>&gt; ajustement des niveaux de la fertilisation (optimum) pour atteindre le niveau de production recherché (cf. courbes de réponse N, Castillon et al, 1999)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; nécessite un référentiel établi à partir de mesures de rendement à la parcelle, sur plusieurs années, sous différents climats, différents type de sols ou modes d'exploitation.</li> <li>&gt; difficilement extrapolable sur tout le territoire</li> </ul>
3 - une approche parcellaire basée sur l'ingestion des animaux à l'échelle du printemps pour les prairies pâturées	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; sécurise l'alimentation des troupeaux</li> <li>&gt; généralisable sur l'ensemble du territoire sans référentiel de production</li> <li>&gt; cible les objectifs de productions par catégorie d'animaux / parcelles correspondantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; ne prend pas en compte l'évolution de la génétique des troupeaux : augmentation des capacités d'ingestion... ?</li> <li>&gt; approche limitée au pâturage : quid des besoins en N des prairies de fauches</li> <li>&gt; limité dans le temps : quid de l'alimentation des prairies en début d'été... ?</li> <li>&gt; n'intègre pas les risques de gaspillage de l'herbe au printemps s'il est très humide par exemple = modification des niveaux de chargements et du rythme de pâturage...</li> <li>&gt; n'intègre pas l'alimentation complémentaire, ni la sévérité du pâturage</li> </ul>

**Tableau 19 :** avantages/inconvénients des 3 approches d'estimation d'objectifs de production de prairies.



## 2 - Calcul des exportations d'azote

Les exportations d'azote ( $N_{exp}$ ) se calculent à partir de l'équation [21] :

$$[21] \quad N_{exp} = MS \times \%N$$

Avec : MS : objectif de production en tMS/ha

%N : teneur en azote de l'herbe

L'évolution de la teneur en azote (%N) de l'herbe au cours d'une repousse a été modélisée sous forme d'une loi de dilution qui, sous conditions de nutrition azotée non limitante, prend la forme suivante :

$$[22] \quad \%N = 4,8 (MS)^{-0,32}$$

Cette équation (figure 10) traduit le phénomène physiologique d'une diminution du rapport protéines / matériaux cellulose/lignine au cours de la repousse, valable au-delà d'1 t MS/ha pour les graminées et dicotylédones non légumineuses.

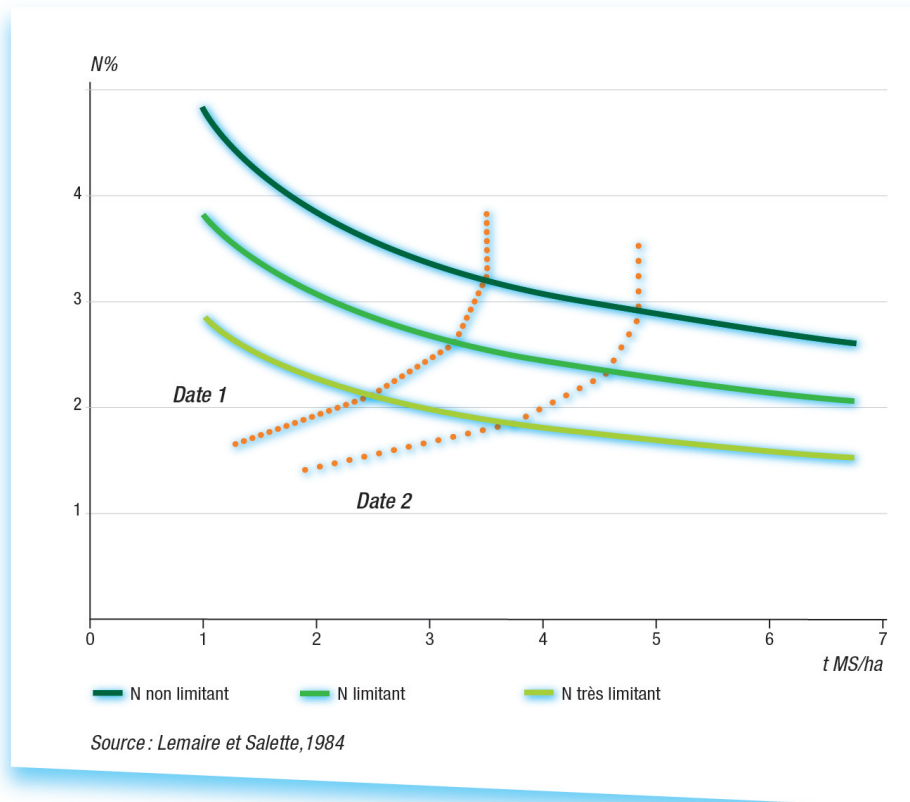


Figure 10

*Loi de dilution et éléments de diagnostic de la nutrition azotée de la prairie. Les différentes courbes correspondent à des niveaux de nutrition azotée (et/ou de fertilisation) croissants. A date donnée, l'azote permet une croissance plus rapide.*

Dans la pratique cela correspond à des teneurs en azote plus élevées :

- pour l'herbe prélevée jeune (modes d'exploitations intensifs), comme le pâturage toutes les 2-3 semaines (7 - 9 pâturages par an), comparés à des cycles de pâturage plus long (4 - 6 pâturages par an).
- pour l'herbe pâturée comparée à l'herbe fauchée (récoltée à un stade plus tardif),
- pour l'herbe poussant sur un sol riche en azote (fourni par le sol ou les fertilisants) comparé à l'herbe non fertilisée.

#### • Proposition d'un tableau de référence

La nutrition est considérée comme optimale quand la teneur en azote est supérieure à 80% du niveau d'azote non limitant (figure 10), ce qui permet une production très proche du potentiel mais aboutit à des teneurs en MAT de l'herbe ingérée très élevées : 21% de MAT soit 34 kg N/t MS pour un pâturage à rotation rapide par exemple.

Ces teneurs sont largement supérieures à celles conseillées pour les animaux exigeants, à niveau de production élevé telles que les vaches laitières. Elles entraînent des rejets urinaires azotés importants.

Les teneurs de référence proposées dans le tableau 20 tiennent compte du mode d'exploitation dominant de la prairie et du niveau de production prévu, et d'un optimum entre objectifs de production et de qualité de l'herbe par rapport aux besoins des animaux.

Mode d'exploitation	en kg N/t MS
Pâturage à rotation rapide (retour toutes les 3 semaines) ou continu	30
Pâturage à rotation lente (retour toutes les 5 semaines)	25
Ensilage	25
Foin précoce et Foin de repousse	20
Foin tardif de 1 <sup>er</sup> cycle	15

**Tableau 20** : Teneur en azote de l'herbe selon le mode d'exploitation. Sources : INRA 2007.

### 3 - Les sources d'azote autre que les apports organiques et minéraux

#### 3.a - Estimation de la fourniture d'azote minéral par le sol : $N_0$

La grande diversité des sols (cultivables ou non) sous prairies, et des modes de gestion des prairies engendrent une large gamme de fourniture d'azote par les sols. Ce terme de l'équation peut être estimé en mesurant la quantité annuelle d'azote prélevé par une prairie ne recevant aucun apport d'azote l'année de la mesure, fauchée au rythme du pâturage, et sans légumineuses. Il est préférable en effet d'évaluer la fourniture d'azote minéral par le sol sur une année, témoin zéro tournant, afin de bien prendre en compte ces arrière-effets liés à l'histoire récente de la parcelle. L'ensemble des mesures faites en fermes expérimentales, ou dans des réseaux de parcelles, fournit des valeurs de références moyennes par type de pédoclimat, qui sont intégrées dans les outils d'aide à la fertilisation.

**La fourniture d'azote minéral par le sol provient de la minéralisation de l'azote organique issu de l'humus, des apports de PRO, des restitutions au pâturage...**

La grande difficulté pour estimer correctement la fourniture d'azote par le sol est liée au fait que l'on ait trouvé jusqu'ici aucune caractéristique du sol, mesurable en routine, qui soit une bonne indicatrice de ce potentiel de minéralisation annuel. Bien que la teneur en matière organique joue un rôle essentiel dans le processus de minéralisation, elle ne s'est pas avérée une variable explicative satisfaisante en expliquant à peine la moitié de la variabilité.

Les mesures disponibles situent ce poste entre 70 et 250 kg N /ha/an, avec une valeur moyenne proposée autour de 170 kg. La fourniture d'azote par le sol a été mesurée dans diverses expérimentations réalisées dans l'Ouest de la France au cours des 20 dernières années. Les données recueillies sur des réseaux de parcelles « témoins N<sub>0</sub> tournant » dans les 3 régions du Grand Ouest, pendant une durée de 1 à 7 ans selon les lieux témoignent :

- de son importance et de sa grande variabilité.
- de la variabilité interannuelle de cette fourniture qui peut en partie être expliquée par les conditions de croissance de la prairie (sécheresse, températures estivales).

***Des tableaux rassemblant les résultats expérimentaux disponibles pour différentes régions figurent en annexe 4.***

Les valeurs sont des moyennes intégrant la variabilité climatique interannuelle, en fonction des deux paramètres les plus déterminants sur la minéralisation :

- l'importance de la pousse estivale
- l'entretien azoté antérieur minéral et organique.

Les principales causes de variabilité interrégionale entre les données de fourniture d'azote par le sol NO sont liées aux types de sols (minéralisation de la MO), de climat (les différences pouvant s'exprimer au travers des calculs de jours normalisés qui vont intégrer les effets limitants des températures et de l'eau disponible), et de mode d'utilisation (moins de restitutions organiques dans les parcelles fauchées comparées aux parcelles pâturées). Les tableaux proposés en annexe traduisent ces différences, qui a terme pourraient être modélisées en passant par des vitesses de minéralisation journalières et des calculs de jours normalisés (cf chapitre 3).

Remarque : l'importance de la fourniture d'azote par le sol en automne est généralement suffisante pour assurer la croissance de l'herbe en fin d'année, avec un potentiel de croissance plus faible et une remobilisation interne des plantes.

### **3.b - Contribution directe des restitutions au pâturage de l'année : Nrest :**

L'effet direct des restitutions animales (Nrest) est estimé à 9 kg N/ha pour 100 UGB jours de pâturage. Des modulations de cette valeur sont proposées dans le tableau ci-dessous ou prises en compte dans les outils de conseil régionaux (par exemple en Normandie cet effet est de 5 kgN/ha pour 100 jours de pâturage de bœufs).

**Effet direct annuel en kg/ha des restitutions au pâturage pour 100 UGB jours de pâturage en kg N/ha**

	Kg N pour 100 UGB jours de pâturage	
	Vaches laitières Traite à l'étable (Journées de pâturage de 20h)	Journée complète (Journées de pâturage de 24h)
Arrêt de la croissance de l'herbe inférieur à 1 mois en été	9	10,5
Arrêt de la croissance de l'herbe supérieur à 1 mois en été	8	9,5

**Tableau 21**

Source : Fertilisation azotée des prairies dans l'Ouest - Journée Technique de février 1999

### 3.c - La contribution de la fixation symbiotique à l'alimentation azotée de la prairie : Fs

Les références utilisées pour quantifier ce poste varient d'une région à l'autre. On distingue globalement deux situations en fonction du taux de trèfle :

- lorsqu'il est **supérieur à 30% au printemps** (au mois de juin de préférence), on considère que le transfert d'azote du trèfle vers les graminées suffit pour satisfaire la totalité des besoins en azote de la prairie. **Le calcul d'apport d'engrais azoté est alors inutile.**

Les réticences de nombreux agriculteurs à ne pas fertiliser (ou très peu) les associations tiennent à plusieurs difficultés :

- il s'agit d'un raisonnement a priori, basé sur la connaissance des parcelles de l'exploitation. Ce taux doit être observé l'année N-1 en prévision du calcul pour le début de l'année N.
- il y a un décalage entre besoins en azote des graminées, plus précoces, et la mise à disposition de l'azote fixé par les légumineuses. Un apport de 30-50 kg N en sortie d'hiver est souvent préconisé dans les zones froides pour accélérer la croissance des graminées. Néanmoins, si on apporte trop d'azote, on pénalise le trèfle et il faut mieux être patient, surtout dans les zones océaniques.
- la répartition des légumineuses dans la parcelle n'est pas toujours homogène. Sauf en cas de quasi disparition du trèfle sur une part importante de la parcelle (par exemple sur un sol moins favorable, superficiel ou hydromorphe), la légumineuse est très colonisatrice et « bouge » rapidement vers les zones peu azotées.

- Enfin, le raisonnement concerne une prairie installée, et tous les conseils s'accordent pour préconiser « pas d'azote l'année du semis ».

- lorsqu'il est **compris entre 10 et 30% au printemps**, on évalue la contribution totale des légumineuses à l'alimentation azotée de la prairie pour l'intégrer dans le calcul de la dose d'azote. On fait alors l'hypothèse que cette source d'azote pour l'ensemble graminée et légumineuses soit  $F_s$  est égale à la quantité d'azote fixé dans la biomasse aérienne des légumineuses.

Des travaux récente ont permis de prendre en compte en plus la biomasse des stolons (= tiges rampantes) du trèfle blanc. La quantification de l'azote des parties aériennes qui provient de la fixation repose sur l'estimation i) de la biomasse annuelle produite par la prairie, ii) du taux moyen de légumineuses pondéré sur l'année, iii) de la teneur en azote des légumineuses et iv) du % de fixation (régulation par l'azote minéral présent dans le sol) :

$$[23] \quad F_s = \text{Biomasse (kg MS/ha/an)} \times \%TB \times N\% \text{ du trèfle} \times \% \text{ de fixation}$$

Si l'on considère une teneur en azote moyenne des légumineuses de 3,5% et un taux de fixation de 90%, la quantité d'azote fixé est de **31 kg d'azote par tonne de matière sèche de légumineuse**. Dans le cas du trèfle blanc, cette quantité est multipliée par un facteur **1,3 pour tenir compte de la biomasse totale du trèfle blanc**, mais le taux de trèfle, % TB, concerne bien la contribution des feuilles à la production de la prairie.

L'estimation du **taux moyen pondéré** dépend à la fois de l'évolution au cours de l'année de la participation du trèfle à la production et de la répartition de cette production entre les différentes saisons. En cas d'estimation unique, elle doit être faite de préférence en fin de printemps. Lorsque les légumineuses représentent moins de 10 % de la biomasse, l'apport par fixation peut être négligé, d'autant plus que l'azote généralement apporté dans ces situations induit une diminution du taux de fixation.

Il reste ensuite à fixer le taux de trèfle blanc, de préférence pondéré sur l'année. Le taux de trèfle blanc observé en fin de printemps (fin mai à début juillet), période charnière dans l'évolution du taux du trèfle, donne généralement une bonne indication du taux de trèfle blanc pondéré. Le tableau 22 donne des indications du taux de trèfle blanc, en accord avec les observations visuelles. La méthode des poignées peut aussi être utilisée.

Niveau	Éléments d'observation	% Trèfle blanc en mai-juin
Faible	La graminée domine largement le trèfle blanc	10 - 20
Moyen	La graminée est dominante mais on voit bien le trèfle blanc	20 - 35
Élevé	On voit presque partout du trèfle blanc	35 - 50
Excessif	On ne voit quasiment que du trèfle blanc	> 50

**Tableau 22** : taux de trèfle estimé par observation visuelle. Source : Institut de l'Elevage (brochure Trèfle blanc 2005)

Le tableau 23 fournit les quantités d'azote fixé dans la biomasse récoltée (Fs), en fonction du taux annuel moyen pondéré (entre 10 et 30%) et de la production totale de la prairie.

Taux de légumineuse pondéré annuel (%)					
		10	15	20	25
	4	15 - 15	25 - 20	35 - 25	40 - 30
Production de la prairie (t MS/ha)	6	25 - 20	35 - 30	50 - 40	60 - 50
	8	30 - 25	50 - 40	65 - 50	80 - 65
	10	40 - 30	60 - 50	80 - 60	100 - 80

**Tableau 23 :** Quantité d'azote fixé dans la biomasse récoltée (Fs, en kgN/ha/an) pour le trèfle blanc (chiffres en gras) et les autres légumineuses prairiales (en italique), selon la production de la prairie et le taux pondéré annuel de légumineuse.

#### 4 - Le coefficient apparent d'utilisation de l'engrais : CAU

##### Facteurs de variation du CAU

La part de l'azote fourni qui n'est pas absorbée par les plantes (1 - CAU) intègre les pertes par voies gazeuses et par lixiviation, l'organisation, le stockage dans les organes de réserves ou encore la fraction qui reste dans le sol sous forme minérale. Pour des doses d'engrais inférieures ou égales aux doses optimales, le reliquat ou les pertes par lixiviation sont très faibles à nuls. La part de l'azote qui n'est pas absorbée (1 - CAU) se réduit donc aux pertes gazeuses, au stockage et à l'organisation. Les facteurs qui déterminent l'importance de ces phénomènes sont difficiles à contrôler et jamais pris en compte dans les essais de fertilisation classique.

Le CAU semble très étroitement lié à la vitesse de croissance du peuplement au moment de l'apport. En effet, l'azote disponible dans le sol est absorbé par les plantes prairiales d'autant plus rapidement que leurs besoins sont importants.

Ainsi, le CAU :

- a plus de chances d'être important au printemps quand la vitesse de croissance est élevée,
- diminue ensuite en été lorsque les conditions hydriques et la température deviennent limitantes pour la croissance,
- diminue également en automne lorsque la croissance est ralentie par la réduction de la durée du jour et des températures.

Par ailleurs, le CAU semble indépendant de l'âge de la prairie (Loiseau, 1992).



### Proposition de CAU « prévisionnel » annuel

L'examen des résultats expérimentaux conduit à différencier pour l'estimation du CAU annuel, les conditions de croissance de l'herbe (variabilités inter-saisonnière et inter-régionale).

	Bonnes conditions de croissance, période poussante	Conditions moins favorables, conditions plus limitantes
CAU	0,7 (apport jusqu'au 30/6)	0,6

**Tableau 24 :** Coefficients apparents d'utilisation annuel de l'engrais.

La vitesse de croissance ayant une influence prépondérante sur le CAU, on peut avancer les recommandations suivantes quant aux périodes et aux conditions d'apports :

- pas d'apport avant le démarrage apparent de la végétation
- apport sur un chaume redevenu vert donc en croissance active.
- pas d'apport lorsque la croissance est très ralentie à nulle en particulier en été si la pousse estivale est ralentie, et tôt au printemps pour faire démarrer.

### 5 - L'effet direct des engrais de ferme en équivalence engrais : Xa

Ce terme ne comprend pas les arrières effets des engrais de ferme qui sont déjà intégrés, on l'a vu, dans la fourniture d'azote par le sol N<sub>0</sub>.

La quantité d'azote Xa disponible pour la plante, fournie par l'engrais de ferme l'année de l'apport est calculée à partir des coefficients d'équivalence engrais

**Xa est l'effet direct de l'engrais de ferme en équivalence engrais.**

$$Xa = \%N_{pro} \times Q \times KeqN$$

%N<sub>pro</sub> : teneur en azote total de l'effluent (% par unité de volume ou de masse)

Q : volume ou masse de l'effluent épandu par hectare

KeqN : coefficient d'équivalence engrais azote minéral efficace (sans unité)

#### Proposition d'un tableau de référence

Le KeqN d'un apport organique sur prairie est différent de celui d'une culture annuelle et doit donc avoir été établi spécifiquement ou extrapolé en conséquence.

Les expérimentations récentes ont conduit à réviser les coefficients d'équivalence engrais. Les coefficients du lisier de porcs ont été notamment revus à la hausse pour un apport de printemps et à la baisse pour un épandage d'automne. Ceux du fumier de bovins ont baissé pour les apports d'automne et de printemps (tableau 9 - chapitre 3).

Même si des apports de lisiers à l'automne peuvent être autorisés, cette pratique est de façon générale peu recommandée, ne relevant pas de la fertilisation raisonnée, et les conseils sont de répartir le lisier à épandre sur la plus grande surface possible pour limiter les apports par ha et les risques de lixiviations. Néanmoins des apports de fin d'été limités, réellement valorisés de préférence par une fauche (affouragement en vert, ensilage) contribuent à la valorisation des prairies et du lisier disponible.

## La dose pivot

Afin de rendre la démarche complète de raisonnement à partir de l'équation (14) plus facilement utilisable par les agriculteurs, une approche directement opérationnelle basée sur l'utilisation de doses "pivot" peut être mise en œuvre.

Ces doses "Pivots" sont modulées selon plusieurs critères tels que le mode d'exploitation de la prairie, le recours à la complémentation au pâturage et intègrent implicitement les notions **No**, **Fs**, **Nrest**. Elles conduisent directement à une dose d'azote minéral valable dans un contexte pédo-climatique donné. La cohérence entre les deux approches peut être vérifiée si les concepteurs des références locales explicitent leur obtention. A titre d'exemple, le cas de la Basse-Normandie, région herbagère à fort potentiel de production d'herbe est détaillé dans l'encadré ci-dessous.

### Exemple de correspondance entre doses pivot et équation 14 cas de la Basse-Normandie

Les prairies-types proposées dans l'annexe 3 pages 1,2 et 3 de l'arrêté établissant le référentiel régional de mise en œuvre de l'équilibre de la fertilisation azotée dans la zone vulnérable pour la région Basse-Normandie ([http://draaf.basse-normandie.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/ArreteGREN-20juillet2012-complet\\_cle044ef1.pdf](http://draaf.basse-normandie.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/ArreteGREN-20juillet2012-complet_cle044ef1.pdf)), correspondent à la pratique des agriculteurs qui se traduit par l'indicateur ares/vaches en été (pour la Normandie où il y a décalage du pic de production par rapport à d'autres régions) et le mode d'exploitation. Il s'adapte à la très grande diversité des situations normandes, tant du point de vue de la flore que de celui du mode d'exploitation ou de la fertilité naturelle des situations agronomiques.

La méthode du bilan a été appliquée afin de déterminer la dose pivot correspondante pour chaque type.

La dose pivot proposée correspond à la valeur obtenue avec complément de fourrage apporté sur la parcelle en septembre pour une prairie sans contribution des légumineuses. Des ajustements en fonction des apports de fourrages en complément ou des légumineuses présentes sont indiqués.

#### Quelques exemples sur prairie à dominante pâture :

##### Pâturage

**Cas 1** : prairie productive, bonne flore dominante graminées, chargement élevé moins de 30 ares/UGB l'été (critère normand) et pas de fourrage complémentaire.

Production attendue : 15t MS/ha (Expertise enquête CA Basse Normandie)

Soit, avec 15% de pertes au champ :

$15 \times 0,85 = 12,7$  tMS/ha consommées, soit 708 jours de pâturage (jp) (pour 18kg ingérés par vache laitière très productives-cf. tableau 18)

Besoins des plantes au pâturage :  $15t \times 30 = 450$  kg N /ha (cf. tableau 20)

Restitution par les animaux :  $7 \times 9 = 63$  kg N/ha (cf. tableau 21)

Fourniture du sol en situation fertile normande 200 kgN/ha (Expertise enquête CA Basse-Normandie)

Reste à apporter  $450 - 63 - 200 = 187$  kg N/ha efficaces, avec un CAU de 0,7 soit 270 kgN/ha  
Dans ce même cas, la dose pivot indiquée est de 200kg +70kg par hectare car aucun complément de fourrage n'est prévu. Les 2 méthodes sont cohérentes.

**Cas2** : prairie à bœufs peu productive, flore complexe avec des légumineuses variées (lotier, vesces etc...) et pâturée tout le temps à faible chargement (plus de 60ares/UGB l'été)

Production attendue : 5 t MS/ha, et consommé 4.25 t/ha soit 303 jp (pour 14 kg ingérés par jour et UGB). Les bœufs auront des restitutions moins azotées que les vaches laitières (VL) soit 5kg N par 100jp (au lieu de 9kg)

Besoins prairie :  $5t\ MS/ha * 30 = 150\ kg\ N/ha$

Restitutions :  $3 * 5kg\ N/ha = 15\ kg\ N/ha$

Fourniture sol faible fertilité normande : 75 kg N/ha

Contribution des légumineuses : 22 kg N/ha

Apport :  $150-15-75= 60kgN/ha$  avec un CAU de 0,7 soit 85 kgN/ha

Moins 22kgN/ha issus des légumineuses reste un apport à prévoir de 63 kgN/ha

Dans ce même cas, la dose pivot indiquée est de 40kg/ha +20kg/ha car aucun complément de fourrage n'est prévu.

### Ensilage puis pâture

Chargement entre 30 et 45 ares/UGB

Production totale 11t MS/ha répartie en 4,5t ensilage et 6,5t pâturage VL

Besoins prairie :  $4,5tMS/ha * 25\% = 112\ kgN/ha$

+  $6,5tMS/ha * 30 = 195\ kgN/ha$

Soit au total= 307 kgN/ha

Pâturage de  $6,5tMS/ha * 0,85 = 5,2t\ MS/ha$  consommés à 18 kg MS/jrs/animaux soit 307 jp

Restitutions  $3,07 * 9kgN/ha = 27\ kgN/ha$

Fourniture sol moyen normand : 130 kgN/ha

Pas de légumineuses

Apport :  $307-27-130= 150kgN/ha$  avec un CAU de 0,7 soit 214 kgN

Dans ce même cas, la dose pivot indiquée est de 160kgN/ha +40kgN/ha car aucun complément de fourrage n'est prévu. Les 2 méthodes sont cohérentes.

## Conclusion

Malgré la diversité des références proposées pour le calcul du bilan azoté des prairies, les doses d'azote conseillées restent dans la plupart des situations observées, comprises entre 100 et 200 kg N/ha/an, pour les prairies de l'Ouest et de l'Est, en 3 à 5 apports concentrés sur la période de croissance : soit jusqu'à début juin pour les zones séchantes ou jusqu'en début d'été pour les zones arrosées à bon potentiel herbager. L'absence d'apport en été - automne ne pénalise pas la croissance et réduit sensiblement les risques de pollution nitrique.

Ces pratiques permettent une bonne croissance de la prairie, qu'il est essentiel de valoriser avec un pâturage (ou des fauches) adapté à l'herbe produite pour éviter le gaspillage d'azote. Elles concernent des prairies poussant sur des sols en « bon état », la sur-fertilisation étant parfois un moyen de compenser des mauvaises conditions de croissance.

Bien que la plupart des prairies semées associent graminées et légumineuses, de nombreux éleveurs ont encore peu confiance dans le potentiel de la légumineuse à assurer la bonne croissance de la prairie et la fourniture d'une alimentation de qualité aux animaux. Si un apport en sortie d'hiver, en particulier en zone froide, favorise le « démarrage » de la végétation, les apports devraient ensuite être nuls ou très réduits lorsque la légumineuse se développe.

L'une des étapes essentielles d'un bon calcul reste la juste détermination d'un objectif de production pour les parcelles, en fonction de leur place dans le système fourrager et de leur potentiel de production, c'est-à-dire d'un raisonnement « système ». Il est important de noter que l'herbe est très souvent sous-utilisée (valorisation moyenne en Bretagne zone arrosée = 6-7 t/ha, plutôt 5 en zone séchante), en particulier lorsque les animaux ont accès toute l'année au silo de maïs.

La prévision de l'azote fourni par le sol pourrait être améliorée, surtout pour les régions où il existe peu de références établies à ce jour (absence de suivi de TO annuels sur plusieurs années). Ce point pourrait constituer un axe de recherche pertinent en matière d'ajustement de la fertilisation.

#### **Pour en savoir plus :**

##### **Sur la méthode de raisonnement :**

**Farruggia A., Le Gall A., Castillon P., Cabaret M.M. (2000)** Proposition d'une méthode de calcul permettant de raisonner la fertilisation azotée des prairies. *Fourrages*, 164, 355 - 372.

**Giovanni R., Dulphy J.P., 2008.** Présentation de références Corpen simplifiées pour l'évaluation des rejets et des pressions d'azote et de phosphore des troupeaux bovins. *Fourrages*, 195, 357 - 372

**Loiseau, P., El-Habchi, A., Montard, F. X. de, Triboi E., 1992.** Indicateurs pour la gestion de l'azote dans les systèmes de culture incluant la prairie temporaire de fauche. *Fourrages*, 129, 29-43

##### **Sur la valorisation animale :**

**Delaby L., 2000.** Effet de la fertilisation minérale azotée des prairies sur la valeur alimentaire de l'herbe et les performances des vaches laitières au pâturage. *Fourrages*, 164, 421- 436

**INRA, 2007.** Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux - Valeurs des aliments. Editions Quae, 307 p.

##### **Sur la prise en compte des légumineuses :**

**Hogh-Jensen, H., Loges, R., Jorgensen, F.V., et al., 2004.** An empirical model for quantification of symbiotic nitrogen fixation in grass-clover mixtures. *Agricultural Systems*, 82 (2), 181-194

**Vertès F.; Soussana J.F.; Louault F. 1995.** Utilisation de marquage  $^{15}\text{N}$  pour la quantification de flux d'azote en prairies pâturées. Colloque de l'INRA - INRA Editions Paris., 265-276

##### **Sur la teneur en azote de l'herbe :**

**Lemaire G., Salette J., 1984.** Relation entre dynamique de croissance et prélèvements d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. *Agronomie*, 4(5), 423-436

**Salette J., Lemaire G., 1981.** Sur la variation de teneur en azote des graminées fourragères pendant leur croissance. Formulation d'une loi de dilution. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 292, 875-878

**Exemples d'application du raisonnement**

Une application de cette démarche de raisonnement est donnée ci-dessous à titre d'exemples, à l'échelle de l'année et des deux saisons printemps et été-automne, pour le Grand Ouest. Le tableau présente des exemples de calculs pour une prairie pâturée par des vaches laitières.

**Exemples de fertilisation azotée des prairies (kg d'azote /ha)**

Contexte	Prairie pâturée en zone à pousse estivale moyenne	Prairie pâturée en zone à pousse estivale élevée
Rendement valorisé (t MS/ha)	7,7	9,6
Rendement au champ (t MS/ha)	$7,7 \times 1,15 = 8,8$	$9,6 \times 1,15 = 11$
Exportations (kg N/t MS)	30	30
<b>Exportations</b>	<b>264</b>	<b>330</b>
Fourniture d'azote par le sol	120	140
Restitutions au pâturage	$530 \text{ JP/ha} = 5,3 \times 9 \text{ kg N} = 48$	$670 \text{ JP/ha} = 6,7 \times 9 \text{ kg N} = 60$
Contribution du trèfle blanc	0	0
<b>Total sources d'azote</b>	<b>168</b>	<b>200</b>
Solde d'azote	96	130
CAU	0,7	0,7
<b>solde d'azote à apporter</b>	<b>137</b>	<b>185</b>
Effet direct des engrais de ferme	0	$30 \text{ m}^3 \text{ L. porc} \times 4 \text{ kg N/m}^3 \times 0,6 = 72$
<b>Azote minéral à apporter</b>	<b>140</b>	<b>113</b>
Répartition possible	$50 \text{ N} + 3 \times 30 \text{ N}$	Lisier porc en 1 <sup>er</sup> apport puis $3 \times 40 \text{ N}$
Lixiviation "théorique" en hiver (kgN/ha)	$20 - 45$	$50 - 80$
Contexte	Prairie mixte fauche/pâturage en zone à pousse estivale moyenne	Association ray-grass - trèfle blanc pâturée en zone à pousse estivale correcte avec 20% trèfle
Rendement valorisé (t MS/ha)	8,6	7,7
Rendement au champ (t MS/ha)	$8,6 \times 1,15 = 9,9$ (5 t foin, 5 t pâture)	$7,7 \times 1,15 = 8,8$
Exportations (kg N/t MS)	30 (pâture) et 20 (foin précose)	30
<b>Exportations</b>	<b>250</b>	<b>264</b>
Fourniture d'azote par le sol	110	120
Restitutions au pâturage	$330 \text{ JP/ha} = 3,3 \times 9 \text{ kg N} = 30$	$540 \text{ JP/ha} = 5,4 \times 9 \text{ kg N} = 50$
Contribution du trèfle blanc	0	65
<b>Total sources d'azote</b>	<b>140</b>	<b>235</b>
Solde d'azote	110	30
CAU	0,7	0,7
<b>solde d'azote à apporter</b>	<b>157</b>	<b>45</b>
Effet direct des engrais de ferme	$30 \text{ m}^3 \text{ L. porc} \times 4 \text{ kg N/m}^3 \times 0,6 = 72$	$30 \text{ t compost bovin} \times 3 \text{ kg N/t} \times 0,25 = 18$
<b>Azote minéral à apporter</b>	<b>85</b>	<b>25</b>
Répartition possible	1 <sup>er</sup> apport lisier porc puis $50/35 \text{ N}$	Sortie d'hiver
Lixiviation "théorique" en hiver (kgN/ha)	$10 - 30$	$20 - 45$

Source : Institut de l'élevage

## Exemples de fertilisation azotée des prairies (kg d'azote /ha)

	Année	Printemps	Été - automne
1 - Objectif de production annuelle	$(8,6 \times 1,15)$ = 9,9	$(9,9 \times 0,6)$ = 5,9	$(9,9 \times 0,4)$ = 3,95
2 - Besoins en azote (tableau 20)	$(9,9 \times 30)$ = 297	178	119
3 - Fourniture par le sol (tableau 21)	120	80	$(120 \times 1/3)$ = 40
4 - Contribution des restitutions au pâturage de l'année	$(630 \text{ UGB.JP20})/24 \times 9$ = 57	0	57
5 - Contribution des légumineuses (tableau 22)	0	0	0
6- Total des sources d'azote hors apports (3+4+5)	177	80	97
7- Reste à mettre à disposition des plantes (2-6)	$(297 - 177)$ = 120	98	22
8 - Azote à apporter compte tenu du CAU (tableau 24) $(2-6)/0,7$	$(120 / 0,7)$ = 171	140	31
9 - Effet direct des fumiers et lisiers selon la période d'apport (Tableau 9) t ou m3 x kN/t ou m3 x KeqN	$(40 \times 2 \times 0,5)$ = 40	40	0
10 - Dose totale d'engrais minéral à apporter pour l'année ou la saison (8-9)	$(171 - 40)$ = 131 arrondi à 130	100	31 arrondi 30

Source : ARVALIS



## 1

## L'origine des références, une clarté nécessaire

Dans le cadre des méthodes générales de fertilisation présentées dans les chapitres précédents, de nombreuses adaptations régionales sont concevables et souvent nécessaires.

La validité de ces références doit être clairement démontrée, et ceci de plusieurs manières complémentaires :

### Expliciter les bases agronomiques

Les connaissances scientifiques acquises sur le cycle de l'azote ou les besoins des cultures, tant du point de vue de leur dynamique que de la variation entre milieux constituent la base incontournable de la mise au point de tout nouveau système de fertilisation. Le gain de précision attendu par rapport aux systèmes antérieurs doit pouvoir être justifié d'un point de vue théorique:

- Énoncer toutes les hypothèses formulées et les estimations acceptées ;
- Argumenter la forme des modèles d'estimation utilisés et, si possible, l'intérêt des paramètres pris en compte, voire de ceux qui ne le sont pas ;
- Asseoir la signification (par exemple physiologique) des indicateurs utilisés.

Actuellement, les deux équations prévisionnelles (bilan de masse et équation avec CAU) sont reconnues par le COMIFER comme pouvant potentiellement constituer la base du raisonnement pour toutes les cultures annuelles. Il est essentiel que toute proposition de calcul de fertilisation se situe, d'un point de vue théorique, par rapport à l'une au moins de ces deux équations. Si l'on est amené à transformer l'écriture initiale, quelles en sont les justifications ? Si l'on est amené à préférer une toute autre écriture, quelles en sont les bases et pourquoi ne pas retenir les écritures classiques ?

### Modalités de mise au point des références

Ce document contient un grand nombre de références classiquement utilisées pour le calcul des fumures. Aucune n'est parfaitement adaptée à toutes les situations ni totalement précise mais elles présentent toutes l'intérêt d'avoir été conçues et validées sur une solide base expérimentale et théorique. Il est nécessaire de tester les références disponibles, afin de diagnostiquer leur(s) éventuel(s) point(s) faible(s), avant d'entreprendre la mise au point de nouvelles références. La spécificité de la région sur laquelle vous travaillez ou de la culture que vous étudiez ne doit pas être un postulat.

Si la mise au point de nouvelles références s'avère nécessaire, il est important que :

- les bases expérimentales (ou bibliographiques) de la mise au point de ces nouvelles références soient rendues publiques (diffusion de comptes rendus d'essais, articles) ;
- l'analyse des données utilise le plus possible les acquis existants : par exemple, dans l'analyse de résultats d'un réseau local de témoins non fertilisés, il est recommandé d'utiliser un modèle général de simulation du lessivage (cf. travail en Poitou-Charentes) et/ou un modèle de simulation de la minéralisation. L'utilisation d'un modèle dans l'analyse des données ne rend pas obligatoirement le conseil plus complexe.

- enfin, que la position de la valeur adoptée comme référence par rapport à la distribution des valeurs expérimentales soit clairement précisée : selon que l'on retient, par exemple, comme niveau de fourniture du sol la moyenne, la médiane ou le premier quintile des quantités d'azote absorbées par un témoin non fertilisé, on ne fait pas prendre aux agriculteurs le même risque de sur ou de sous-fertiliser.

Cette clarification de la position prise par le concepteur de la référence vis à vis des risques acceptés concernant les termes du bilan et tout particulièrement :

- les besoins de la culture, c'est à dire la potentialité agricole et le besoin en azote par unité de rendement ;
- les fournitures du sol (Ri, minéralisation de la matière organique...);
- les fournitures d'azote par les effluents d'élevage ;
- le coefficient apparent d'utilisation de l'engrais.

La même démarche doit être appliquée aux indicateurs de nutrition des plantes.

## Préciser le domaine de validité des références

Une référence de fourniture du sol, un modèle d'estimation des potentialités et plus généralement tous les modèles de fertilisation sont issus d'une conceptualisation extrêmement simplificatrice de la réalité. Or toute simplification n'est acceptable que dans un domaine bien défini. Dans l'absolu, il est donc inacceptable de délivrer une référence ou un modèle sans situer clairement son domaine de validité. Celui-ci est défini de deux manières complémentaires :

- éléments issus de la théorie : par exemple, telle référence de fourniture du sol est valable sur les sols sains. Même sans la mettre à l'épreuve, on a de bonnes raisons de penser qu'elle n'est pas adaptée aux sols hydromorphes.
- éléments issus de la validation : où la référence a-t-elle été testée ? Où n'a-t-elle pas été testée ?

Le domaine de validité peut être caractérisé sur :

- la région ;
- le type de sol ;
- le système de culture ;
- le climat de l'année (le climat des années d'expérimentation doit être resitué par rapport à une étude fréquentielle).

## Indiquer les bases expérimentales de validation

L'évaluation expérimentale des modèles et des références est une phase essentielle de leur mise au point et doit être effectuée de manière rigoureuse.

L'évaluation la plus rigoureuse, qui doit être réalisée chaque fois que possible, est la comparaison entre la valeur estimée d'une grandeur et sa valeur réelle. Toutefois, il reste difficile et coûteux de disposer d'expérimentations locales représentatives permettant d'isoler pour toutes les situations agronomiques rencontrées un à un tous les postes du

bilan (exemple isoler l'effet précédent des autres postes de fournitures du sol). De ce point de vue, l'un des intérêts de l'écriture avec CAU est de permettre l'accès direct sur expérimentation aux trois termes majeurs de l'équation, dans le but de vérifier une estimation. Une évaluation globale de l'ensemble des références contenues dans une méthode de fertilisation et de leur cohérence par le test de la méthode de fertilisation reste un minimum souhaitable.

Cette évaluation doit être effectuée sur un dispositif dont le plan d'expérience doit être clairement précisé, car il conditionne directement la fiabilité de la définition du domaine de validité (type de sol, systèmes de culture, nombre d'essais éliminés du jeu de données).

## Évaluation de la préconisation

### **La préconisation doit se situer au top niveau**

Les critères pour juger qu'une méthode de conseil de fertilisation azotée utilisée est ce qui peut être fait de mieux pour une culture sont à préciser :

- Par l'installation, au niveau de la zone (ou sous-zone) concernée, de réseaux de dispositifs de contrôle avec établissement de courbes de réponse à l'azote pour les différentes cultures représentées. A partir des résultats, procéder à l'étude critique des écarts entre la prescription et les optima constatés par type de situation.

- Par la quantification des gains obtenus par comparaison avec la méthode de fertilisation de référence sur des critères tels que le rendement des cultures, la qualité des récoltes, les économies d'engrais, la limitation du risque de fuites de nitrates...

### **La prescription doit présenter un minimum de facilité de mise en oeuvre**

- Préciser, en fonction des exigences ci-dessus, le coût d'élaboration de cette prescription, tant en phase de paramétrage local (acquisition des références) qu'en utilisation de routine (analyses et recalages annuels).

- Préciser l'accessibilité du paramétrage

- S'assurer contre les risques de dérive et de mauvaise utilisation.

### **La prescription doit éviter les écueils liés à la motivation des acteurs locaux**

- Préciser la formation des hommes qui sera nécessaire à sa diffusion.

- Donner des éléments de rentabilité tant pour les agriculteurs que pour la collectivité



## 2

## Annexes

**Annexes 1**

Référence Mr : Pour la cas d'une culture précédée d'une culture légumière dans la même année.

**Annexes 2**

Notice d'utilisation des abaques d'ajustement du terme L et Tables d'ajustement du terme L en fonction de la lame drainante.

**Annexes 3**

Exemple tableau Rf.

**Annexes 4**

Exemples régionaux de fournitures d'azote par les sols sous prairie.

# Annexe 1

## Référence Mr : Pour le cas d'une culture précédée d'une culture légumière dans la même année

**Mr : Minéralisation des résidus de culture du précédent  
(cas d'une culture précédée d'une culture légumière dans la même année)**

Cultures légumières	Mr (kgN/ha)
Brocoli	55
Jeune carotte	20
Grosse carotte	20
Céleri-branche	70
Epinard	25
Haricot et Flageolet	35 à 40 selon le développement végétatif
Pois de conserve	40 à 65
Salsifis/Scorsonère	30

Source : UNILET, 2012



## Annexe 2

### Notice d'utilisation des abaques d'ajustement du terme L et Tables d'ajustement du terme L en fonction de la lame drainante

1)

Comment ajuster la valeur du poste Ri en fonction des précipitations après le prélèvement d'échantillon de sol ?

2)

Exemple, les étapes de calcul de la perte par lixiviation du nitrate

2.1 Choisir son tableau de référence

2.2 Représentation visuelle

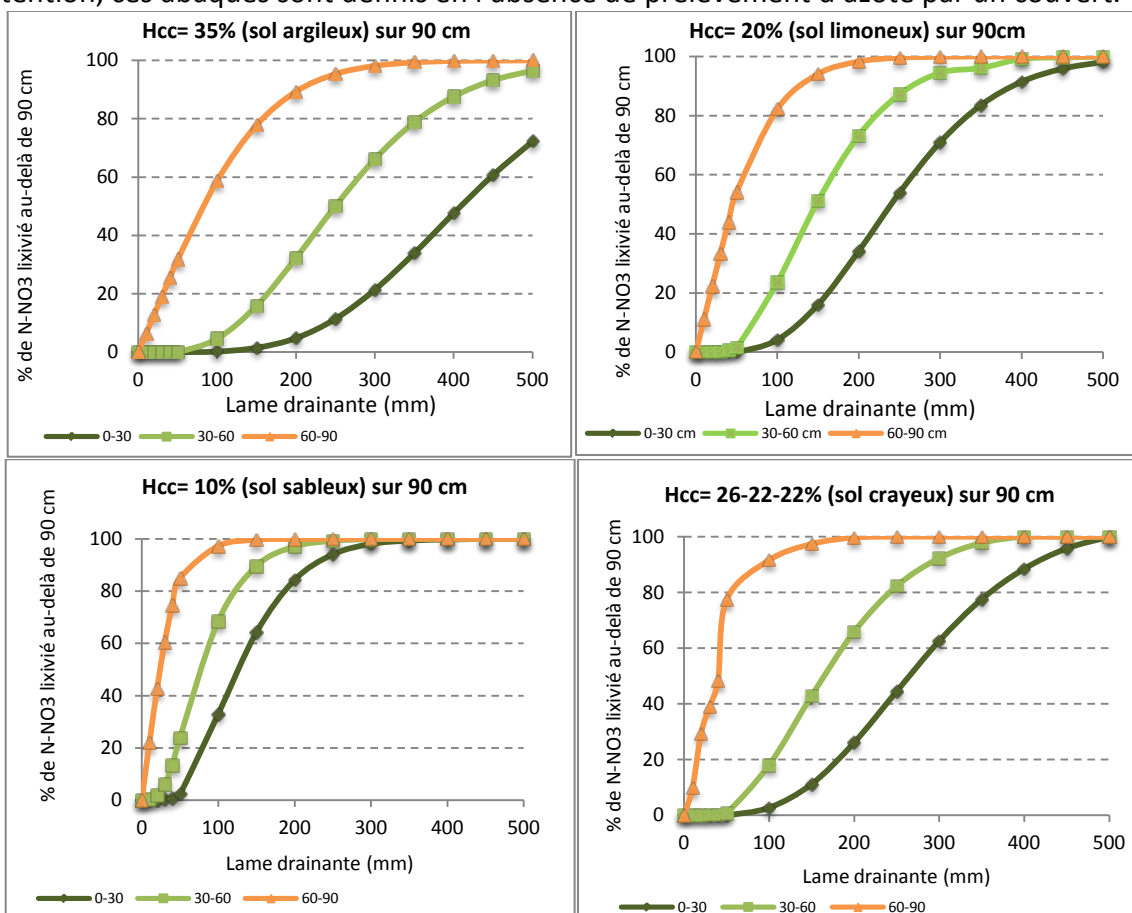
2.3 Calcul des pertes par lixiviation du nitrate (L)

## 1. Comment ajuster la valeur du poste Ri en fonction des précipitations après le prélèvement d'échantillon de sol ?

Il peut se passer un certain laps de temps entre la mesure du post Ri (quantité d'azote minéral dans le sol à l'ouverture du bilan, souvent appelé « reliquat azoté sortie hiver ») et le calcul de dose définitive à apporter. Si les précipitations entre les 2 dates sont importantes, il est légitime de s'interroger sur les quantités d'azote minéral lixivié pendant cette période et donc sur un éventuel réajustement de la valeur de reliquat azoté à prendre en compte dans le calcul du bilan.

Voici une série de 4 abaques calculés à partir du modèle de lixiviation LIXIM (INRA, Mary et al. 1999). Ils permettent d'estimer de façon simplifiée la lixiviation d'azote minéral en % de la quantité initiale pour 4 grands types de sols. Les valeurs numériques ayant servi à leur tracé sont fournis dans les [tables d'ajustement du terme L en fonction de la lame drainante](#).

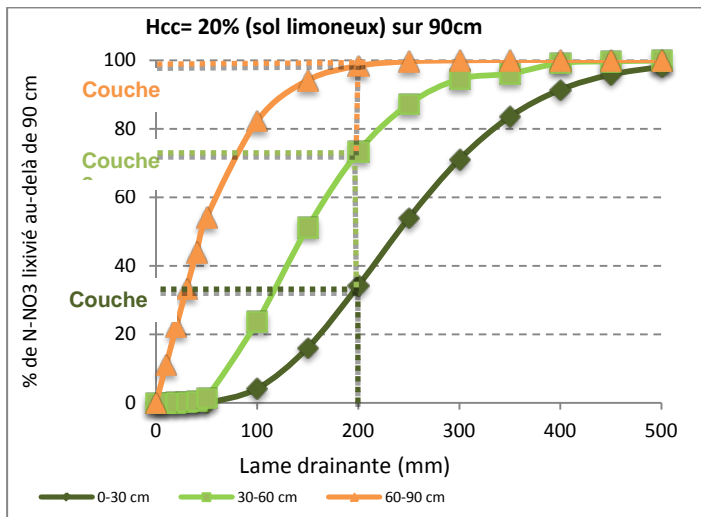
Attention, ces abaques sont définis en l'absence de prélèvement d'azote par un couvert.



Ces abaques sont construits en fonction de la lame drainante. En 1<sup>ère</sup> approximation, elle correspond au cumul de pluie entre les 2 dates si le sol est à la capacité au champ. Si ce n'est pas le cas, il est nécessaire de l'estimer à l'aide d'un bilan hydrique, ou de relation régionale empirique entre le cumul de pluie et la lame drainante.

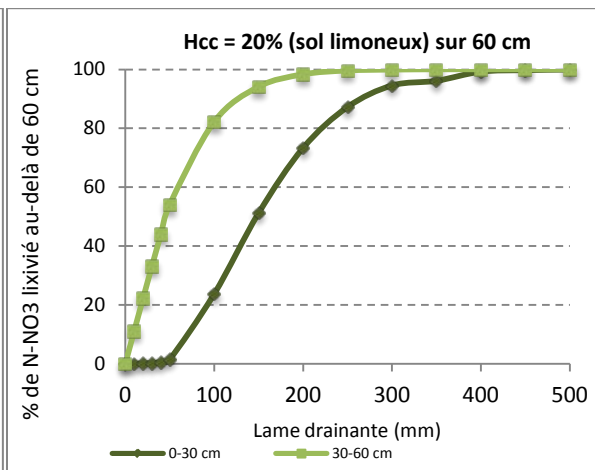
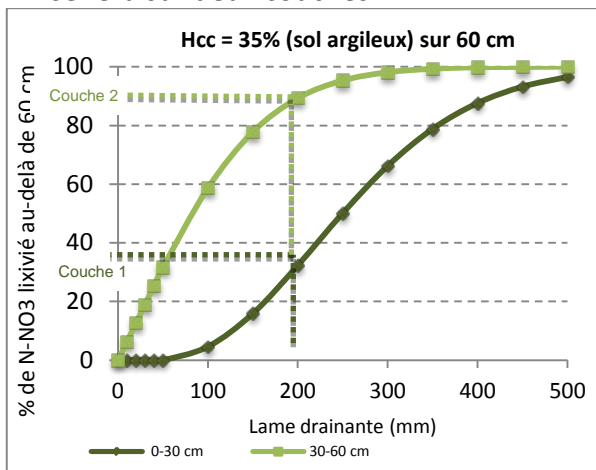
### Procédure d'utilisation des abaques :

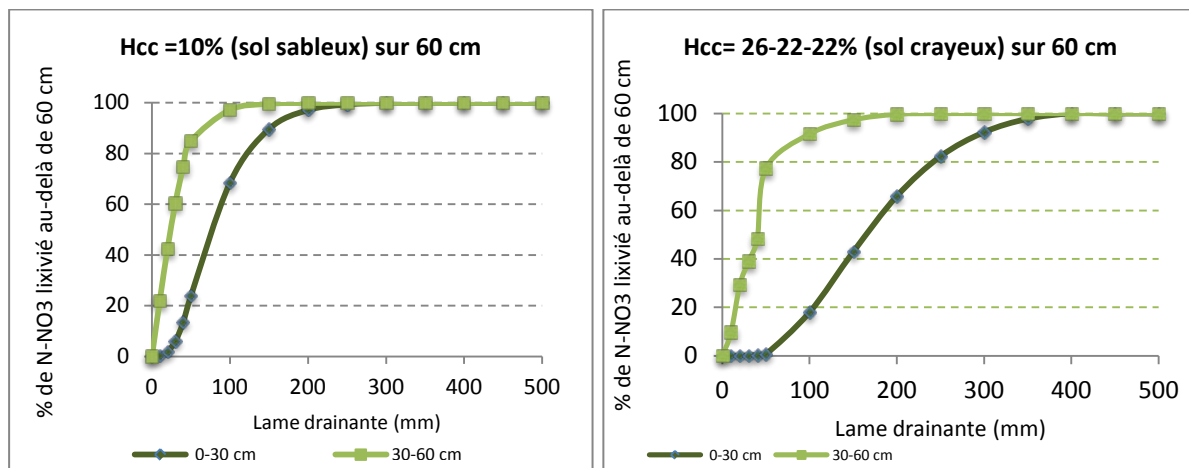
- (1) Choisir l'abaque en fonction du type de sol et de sa profondeur
- (2) Estimer la lame drainante sur la période considérée
- (3) Lire le pourcentage de N-NO<sub>3</sub> lixivié au-delà de la profondeur de sol considérée par couche sur l'abaque



(4) Multiplier le pourcentage de N-NO<sub>3</sub> lixivié lu sur l'abaque par la valeur du reliquat azoté par horizon (mesuré, calculé ou estimé). On obtient la quantité d'azote sous forme nitrate perdue par lixiviation. La somme des quantités de nitrate perdues de chaque horizon constitue la perte en azote sous forme nitrique au-delà de la profondeur de sol considérée.

Pour des sols inférieurs à 90 cm, la manière de procéder est la même sauf que le calcul se fera sur deux couches.





## 2. Exemple, les étapes de calcul de la perte par lixiviation du nitrate (L)

Prenons l'exemple d'une pluie de 100 mm intervenue entre la mesure du reliquat azoté (18 février) et le calcul de dose définitive par le bilan prévisionnel (proche du stade « épi 1 cm » pour une céréale à paille d'hiver), sur un sol de type limoneux d'une profondeur de 90cm.

### 2.1 CHOISIR SON TABLEAU DE REFERENCE

L'hypothèse de départ adoptée dans cet exemple est que la quantité d'eau dans le sol a atteint la capacité au champ (capacité de rétention maximale en eau du sol). Par exemple, on considère qu'un sol limoneux a une capacité de rétention de 20g d'eau pour 100g de terre fine et sèche (HCC : 20%).

Les valeurs à prendre en compte pour le calcul dans l'exemple sont encadrées en rouge dans le tableau (ou à lire directement sur les abaques) ci-dessous :

Pourcentage de l'azote par couche de sol perdu par lixiviation en dessous de la profondeur du sol, en fonction de la lame drainante et pour des cumuls de pluie croissants. Source : COMIFER 2002 par simulation à partir du modèle LIXIM (INRA, Mary et al., 1999).

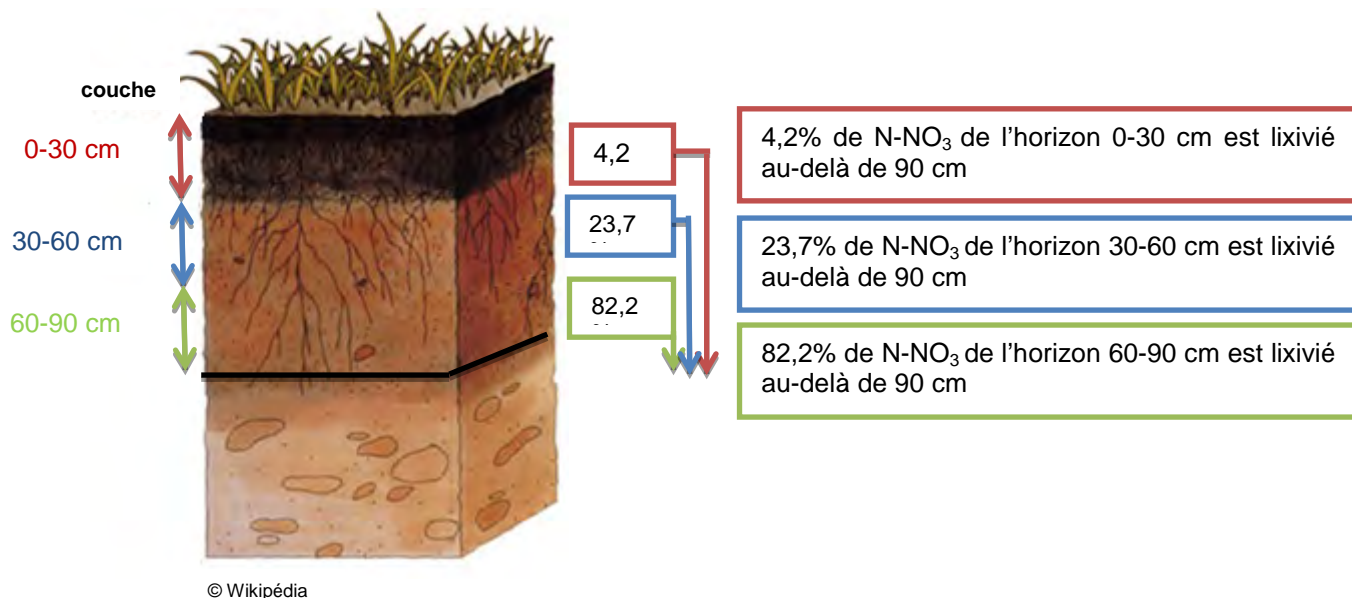
### 2.2 REPRESENTATION VISUELLE

Type de sol : limoneux

Taux de lixiviation au-delà de 90 cm

Lame drainante (mm)	0	10	20	30	40	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Couche 0-30 cm	0	0	0.1	0.0	0.0	0	4.2	16.1	34.2	53.9	71	83.5	91.4	95.8	98.1
Couche 30-60 cm	0	0	0.1	0.2	0.6	1.5	23.7	51.2	73.3	87.2	94.5	96.1	99.2	99.7	99.9
Couche 60-90 cm	0	11.1	22.2	33.2	43.9	54.1	82.2	94.1	98.3	99.6	99.9	100	100	100	100

Valeur d'humidité à la capacité au champ (HCC) retenue pour ce type de sol : 20% (identique pour toutes les couches)



### 2.3. CALCUL DES PERTES PAR LIXIVIATION DU NITRATE (L)

Pour le calcul des pertes par lixiviation, il faut se munir du reliquat azoté mesuré ou éventuellement estimé. Pour le calcul, on peut prendre en compte la totalité de l'azote minéral total du sol (N-NO<sub>3</sub> et N-NH<sub>4</sub>) car on considère que l'azote ammoniacal va très vite se transformer en azote nitrique.

Reliquat azoté réalisé le 18 Février		Pertes par lixiviation (en kg N minéral)
0-30 cm	100 kg N minéral total	100*4,2%=4
0-60 cm	50 kg N minéral total	50*23,7%=12
0-90 cm	30 kg N minéral total	30*82,2%= 25

Dans cet exemple, les pertes par lixiviation au-delà de 90 cm à prendre en compte dans le calcul du bilan azoté sont de 41 kg N/ha (4+12+25). L'azote minéral restant est donc de 139 kg N/ha (180-41).

## Annexe 3

### Exemple tableau Rf

**Rf : Quantité d'azote minéral dans le sol à la fermeture du bilan (kgN/ha)**

Épaisseur du sol	Sol léger	Sol limoneux	Sol argileux	Sol de craie
	Arg < 15 %	15 % < Arg < 30 %	Arg >30 %	
	L <45%	L >45%		
	CaCO <sub>3</sub> < 10 %	CaCO <sub>3</sub> < 10 %		CaCO <sub>3</sub> > 40 %
Sol superficiel (0 à 30 cm)	5	10	15	15
Peu profond (0 à 60 cm)	10	15	20	20
Profond (0 à 90 cm)	15	20	30	30
Très profond (0 à 120 cm)	20	30	40	40

Source : AZOBIL © INRA, 2012

Ce tableau concerne des plantes à enracinement profond explorant bien le sol (cas des principales grandes cultures : céréales, colza, maïs,...). Il pourrait être adapté en fonction des capacités d'interception de l'azote par les plantes considérées.



## Annexe 4

### Exemples régionaux de fournitures d'azote par les sols sous prairies

Par souci de simplification, et considérant la variabilité de prise en compte des effets directs des restitutions au pâturage pour l'alimentation azotée des plantes entre auteurs, ces effets sont parfois intégrés dans les valeurs proposées. Notons que certaines situations sont peu probables (faible potentiel de production et entretien azoté fort par exemple). La simplification proposée ne serait plus pertinente pour des chargements au pâturage très élevés où l'effet direct des apports de déjection atteint plusieurs dizaines de kg (CORPEN\*1999).

#### Exemples de fourniture d'azote par les sols sous prairies :

	Pousse estivale très ralentie à nulle	Pousse estivale moyenne	Bonne pousse estivale
Entretien azoté antérieur faible : pas ou peu d'épandage, ou pâture extensive ou faible fertilisation N minéral	50 à 70	80 à 100	90 à 120
Situations intermédiaires	70 à 90	110 à 130	120 à 160
Entretien azoté antérieur fort : épandage fréquents ou pâture intensive ou fertilisation N min élevée	90 à 120	140 à 170	160 à 190
Fourniture printemps / Fourniture totale	3/4	2/3	1/2 à 2/3

**Tableau 21 :** Fourniture d'azote par le sol en kg N/ha/an (NO+Nrest) pour les prairies du Grand Ouest. Les quantités indiquées concernent les prairies jeunes (< 5 ans) et âgées (> 5 ans) exploitées principalement par pâturage.

Ces chiffres peuvent être réduits de 15 à 20 kg en cas de fauche dominante (> 50% fauche) pour des parcelles mixtes ou dans les situations pédoclimatiques provoquant des arrêts de croissances prolongés : sécheresse estivale marquée (Pays de la Loire, Poitou Charentes, pourtour méditerranéen...), sorties d'hiver tardive (fin mars à début avril pour la Lorraine ou les zones de piémonts Pyrénéens, Massif Central ou Alpes).

**Exemple d'application régionale : Fourniture d'azote par le sol (NO+Nrest) en kg N/ha/an pour les prairies pâturées de Bretagne**

#### Estimation des fournitures d'azote par le sol en Kg/ha dans le cas de prairies sans légumineuses

Entretien azoté antérieur par des apports directs ou mécaniques (a)	Objectif de rendement en t de MS / ha							
	5	6	7	8	9	10	11	12
Fort	85	100	115	130	145	160	175	190
Moyen	70	80	90	100	110	120	130	140
Faible	65	70	75	80	85	90	95	100

**Exemple d'application régionale : Fourniture d'azote par le sol en kg N/ha/an pour les prairies de Bourgogne**

Estimation de l'azote fourni par le milieu

Fourniture d'azote (Kg N/ha) = Azote fourni par le milieu  
 + Azote fourni par les restitution aux pâturage  
 + Azote fourni par les légumineuses

Sol	Minéralisation (Kg N/ha)	
	Sans MO	Épandages réguliers de MO
Sol très séchant	40	50
Sol séchant	50	70
Sol hydromorphe	80	100
Argilo-calcaires profonds et sains, limons argileux profonds, Alluvions argileuses calcaires	90	110
Alluvions argileuses	100	120

**Annexes à l'arrêté préfectoral établissant le référentiel régional de Bourgogne au 1<sup>er</sup> septembre 2012**

## 2

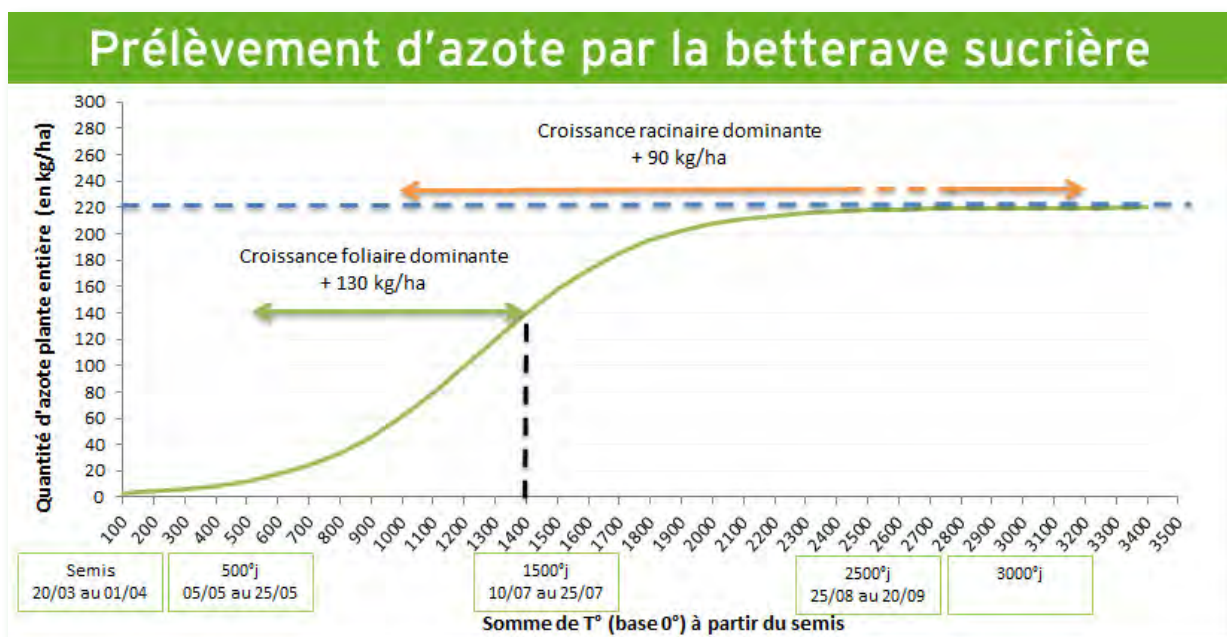
## Fiches cultures

- Betterave sucrière
- Betterave porte-graine
- Carotte porte-graine
- Colza d'hiver
- Endive
- Épinard d'industrie
- Fétuque élevée porte-graine
- Grosse carotte d'industrie
- Haricot d'industrie
- Jeune carotte d'industrie
- Lin oléagineux
- Oignon porte-graine
- Pois potager d'industrie
- Ray-grass anglais porte-graine
- Salsifis d'industrie
- Tabac
- Tournesol
- Vigne

# BETTERAVE SUCRIÈRE

## Caractéristiques générales

- La culture de betterave est développée sur l'ensemble du Bassin Parisien, auquel il faut ajouter les régions d'Alsace et Limagnes. Elle est cultivée généralement en **sols profonds**. Plante bisannuelle, elle est cultivée en **phase végétative** et présente une croissance continue depuis le semis (mars-avril) jusqu'à la récolte (de mi-septembre à fin novembre). La croissance foliaire représente la part majoritaire des besoins en azote, avec une forte intensité de prélèvement entre mai et juillet (courbe ci-dessous).
- La plante couvre l'ensemble de la période **printemps-été**, et prospecte le sol en profondeur (plus de 150 cm de profondeur d'enracinement). Elle bénéficie pleinement de l'azote minéral présent en sortie d'hiver, de la minéralisation de l'humus et des résidus du précédent et de la culture intermédiaire, et le cas échéant de l'azote libéré par les produits organiques épandus en interculture.
- La productivité est **affectée par l'excès d'azote**. Elle entraîne une diminution de richesse saccharine en favorisant le développement foliaire au détriment de la production de sucre. La maîtrise de l'azote est aussi un enjeu de qualité (l'azote sous forme d'acides aminés dans la racine limite l'extraction du sucre), même si le couplage industriel sucrerie+distillerie a aujourd'hui diminué son impact industriel.



## Éléments nécessaires au calcul de la dose d'azote prévisionnelle

Les besoins en azote de la betterave sucrière sont définis par une valeur forfaitaire, établie à **220 kg/ha**. Cette valeur est indépendante du niveau de rendement dans la gamme de productivité des betteraves sucrières produites en France. En effet, l'azote de l'engrais assure la mise en place du bouquet foliaire pendant la première moitié du cycle. La synthèse de sucres et son stockage dans la racine en seconde moitié de cycle présentent des besoins en azote plus modérés, et les conditions favorables à la croissance sont également favorables à la minéralisation de l'humus. Celle-ci peut donc subvenir à des besoins augmentés en situations de forts rendements.

## Équation du bilan utilisée

Le bilan de masse est l'équation utilisée exclusivement, sur base d'un reliquat d'azote minéral établi avant semis. Le reliquat résiduel à la fermeture du bilan est de 8 à 15 kg/ha par horizon de 30 cm (valeur généralement utilisée : 10 kg/ha par horizon de 30 cm).

**Règle particulière à la Betterave Sucrière :** Avec les développements des pratiques de fertilisation organiques avant betterave, et avec des reliquats sortie hiver qui peuvent être élevés dans ces situations, il n'est pas rare que le calcul bilan soit négatif (offre supérieure aux besoins). Dans ce cas, aucun apport d'engrais n'est conseillé. Dans ces conditions, il est important d'identifier les conditions de constitution de ce bilan d'envisager de gérer autrement sa fertilisation azotée (notamment apport de PRO).

Dans le cas d'un calcul bilan compris entre 0 et 30 kgN/ha, la dose apportée peut être de 30 kg/ha car il est difficile de gérer des doses plus faibles.

**Attention :** A l'exception de parcelles en sols superficiels, compte tenu de la capacité d'enracinement rapide de la culture et afin de ne pas sous-estimer la quantité d'azote disponible, on se basera sur un reliquat mesuré en sortie d'hiver sur la profondeur 0-90 cm selon 3 horizons de 30 cm.

## Pratiques de fertilisation

Les apports fractionnés, en particulier les apports tardifs au-delà de 4-6 feuilles, peuvent pénaliser la productivité et dégrader la qualité interne de la betterave. Le fractionnement n'est généralement pas justifié sauf sols superficiels et/ou très filtrants.

Les apports sont réalisés en **un passage avant semis**, en respectant un délai d'une à deux semaines, selon la dose apportée, pour éviter les brûlures de germe.

Les apports par **enfouissement localisé** au semis sont considérés comme une technique optimale pour limiter les pertes par volatilisation et favoriser l'utilisation de l'engrais minéral. On appliquera ainsi la totalité de la dose conseillée, dont le calcul aura tenu compte du mode d'application par localisation (prise en compte directe dans le logiciel, ou abaque proposée par l'ITB).

Les coutres enfouisseurs d'azote doivent être décalés de 7 cm à côté du rang pour éviter tout risque de brûlure du germe.

Il n'est généralement pas fait de distinction entre formes d'engrais azotés, sauf indirectement si le logiciel d'établissement de dose évalue les pertes par volatilisation ammoniacale. Pour des apports retardés en début de végétation, la forme ammonitrate solide doit être privilégiée.

## Outil de pilotage : ajustement en cours de culture

La betterave sucrière n'étant pas adaptée à une fertilisation fractionnée, **aucun outil de pilotage** en culture n'a été développé dans les conditions françaises.

## Récolte et exportations

A la récolte, les betteraves sont scalpées : On laisse au champ les bouquets foliaires, qui sont broyés et éparpillés par la machine de récolte.

Les modalités de paiement conduisent à **plusieurs expressions** contractuelles du rendement :

- rendement "**Poids net**" ou "Poids effectif" (t/ha) (= Poids commercial de racines),
- rendement "**Poids Valeur**" (t/ha) (calcul qui établit un rendement payé à l'agriculteur, exprimé comme un poids de betteraves, mais qui intègre la richesse saccharine et un coefficient favorisant les richesses autour de 19%), et

# Calcul de la fertilisation azotée

- rendement en "**tonnes à 16%**", unité dans laquelle est défini le droit à produire (quota) de l'agriculteur.

C'est souvent cette dernière expression qui est retenue par les agriculteurs. C'est aussi l'expression courante qui est la plus directement liée au rendement matière sèche de la culture, donc la plus pertinente et qui présente le plus faible risque d'erreur pour établir des calculs d'exportation à partir d'un bulletin de livraison.

	<b>Teneur ou ratio</b>	<b>Valeur*</b>	<b>unité</b>
1	Teneur <b>N‰</b> sur poids racines frais :	<b>1.15</b>	en kg N / tonne de racines (décolletées ou entières)
2	Teneur <b>N‰</b> sur poids racines sec :	<b>4.7</b>	en kg N / tonne de MS racines (décolletées ou entières)
3	Ratio <b>N exporté</b> sur <b>poids net livré</b> :	<b>1.25</b>	en kg N / tonne de MS racines (décolletées ou entières)
4	Ratio <b>N exporté</b> sur <b>rendement à 16</b> :	<b>1.05</b>	en kg N exporté / tonne de rendement à 16

\* établis sur la base de données ITB (73 sites) et LDAR (36 analyses) (1990-2005)

Les résidus de culture (feuilles broyées) représentent **90 à 120 kg/ha d'azote**, qui contribueront partiellement à l'alimentation azotée de la culture suivante.

**Attention :** Les exportations sont calculées sur la racine entière (sauf les feuilles) alors que le rendement réalisé par l'agriculteur ne prend pas en compte le poids du collet (représentant 10% du poids des racines lavées en moyenne).

Les valeurs des lignes 3 et 4 sont directement applicables aux rendements exprimés sur le bulletin de réception car elles tiennent compte du poids du collet.

## Remarques diverses

La betterave sucrière est une culture de printemps qui est précédée par un apport des produits organiques sur 60% de ses surfaces. Les origines sont très variées, à la fois effluents d'élevage et effluents agro industriels (enquêtes ITB-SITE 2010-2011).

80% des surfaces de betterave sont semées après une culture intermédiaire dans l'interculture qui précède. Ces pratiques justifient d'autant plus la mesure de reliquat et l'estimation de la minéralisation après l'ouverture du bilan jusqu'à la récolte.

## Contributeur

Institut Technique de la Betterave

## Liens utile

[www.itbfr.org](http://www.itbfr.org)

Toutes les fiches sont téléchargeables sur [www.comifer.asso.fr](http://www.comifer.asso.fr)



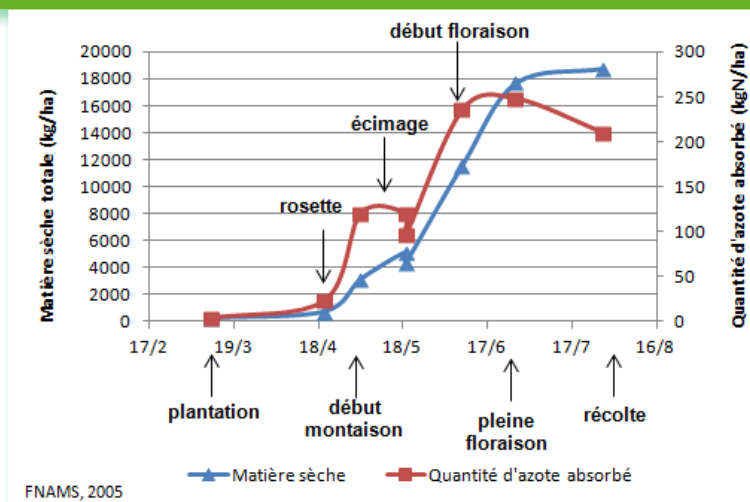
# BETTERAVE SUCRIÈRE PORTE-GRAINE

## Caractéristiques générales

La betterave sucrière porte-graine, cultivée en France sur 4080 ha (GNIS, 2011), est une plante bisannuelle. Cette culture est conduite en deux périodes distinctes : la première correspond à la phase de la pépinière. Les semences de base sont mises en terre en août pour la formation des plançons qui sont récoltés en février de l'année suivante. La deuxième période correspond à la phase reproductive : après arrachage, les plançons sont repiqués en février/mars. La récolte est effectuée début août. Les bassins de production de cette culture sont le sud-ouest, le sud-est et le centre-ouest.

La betterave sucrière porte-graine, comme l'ensemble des cultures porte-graine, s'intègre dans des systèmes de grandes cultures et contribue à sécuriser les approvisionnements de semences en France, tant en quantité qu'en qualité. C'est une source de diversification intéressante pour les exploitations de polyculture dans les différents bassins de production.

## Dynamique de l'azote absorbé et de la production de matière sèche de la betterave sucrière porte-graine d'une variété type hybride



La dynamique d'absorption de l'azote de la betterave porte-graine se divise en 3 phases : (1) de la plantation jusqu'au stade rosette (équivalent à 10 - 15 feuilles), les besoins en azote de la culture sont très faibles, ensuite on note (2) une phase d'absorption intense (interrompue par l'écimage, opération qui consiste à couper le bourgeon terminal de la plante pour favoriser le développement d'une dizaine de ramifications) entre début montaison et début floraison, au-delà de ce stade (3) la matière sèche continue d'augmenter légèrement alors que la quantité d'azote absorbé n'évolue peu ou plus.

## Éléments nécessaires au calcul de la dose d'azote prévisionnelle

En cultures porte-graine, les besoins en azote de la plante ne sont pas liés à l'objectif de rendement grainier qui est très variable (parfois quelques centaines, voire quelques dizaines de kilogrammes à l'ha...). Il est établi néanmoins qu'une quantité optimale d'azote est nécessaire pour obtenir le potentiel de rendement grainier.

Les besoins en azote de la betterave sucrière porte-graine ont été évalués, selon les références expérimentales obtenues, à **280 kg d'N/ha** (avec prise en compte de l'écimage).

## Équation du bilan utilisée

Un outil de pilotage, basé sur la méthode du bilan azoté et tenant compte des caractéristiques des cultures porte-graine (notamment les besoins), a été mis au point par la FNAMS et est à disposition des opérateurs de la filière semences (agriculteurs multiplicateurs et techniciens d'établissements semenciers). Cette feuille de calcul a été conçue en relation avec ARVALIS-Institut du végétal. Elle est mise à jour régulièrement et est enrichie des références des Chambres d'Agriculture notamment, concernant les teneurs en azote des fumures organiques. Pour plus d'information, envoyer un mail à : [fnams.brain@fnams.fr](mailto:fnams.brain@fnams.fr)

L'équation de la méthode du bilan utilisée en cultures porte-graine est la suivante :

Besoins de la culture (kgN/ha)		Fournitures du sol (kgN/ha)				Dose d'azote à apporter (kg N/ha)
Besoins de la plante (*)	+ Azote non utilisable (**)	- Minéralisation des résidus de culture (**)	- Minéralisation de l'humus (**)	- Reliquat sortie hiver (***)	- Apports organiques (**)	

\* Valeur référencée par la FNAMS et consultable sur le site du [COMIFER](#)

\*\* Se référer aux postes du bilan détaillés sur le site du COMIFER

\*\*\* Valeur mesurée ou estimée (se renseigner auprès de la Chambre d'Agriculture)

## Pratiques de fertilisation

Pour couvrir les besoins en azote de la betterave sucrière porte-graine tout au long du cycle cultural, le fractionnement de la dose d'azote minéral est recommandé :

- 1<sup>er</sup> apport : plantation (apport forfaitaire de 80 U)
- 2<sup>ème</sup> apport : début montaison  $((X-80)/2)$ , X étant la quantité d'azote calculée par la méthode du bilan)
- 3<sup>ème</sup> apport : écimage  $((X-80)/2)$

## Outil de pilotage : ajustement en cours de culture

Pas d'information

## Remarques diverses

La betterave sucrière porte-graine est sensible aux carences en bore.

La culture de betterave sucrière porte-graine nécessite la production de plançons dans des pépinières mises en place l'été précédent et récoltées en février, juste avant plantation. Les besoins en azote de la pépinière ne sont pas pris en compte ici.

## Contributeur

Fédération Nationale des Agriculteurs Multiplicateurs de Semences

## Liens utile

[www.fnams.fr](http://www.fnams.fr)

Toutes les fiches sont téléchargeables sur [www.comifer.asso.fr](http://www.comifer.asso.fr)

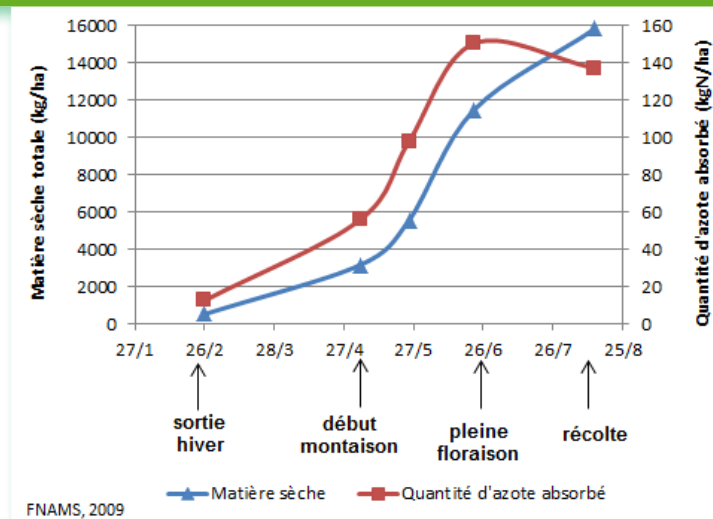
# CAROTTE PORTE-GRAINE

## Caractéristiques générales

La carotte porte-graine, cultivée en France sur 2850 ha (GNIS, 2011), est une plante bisannuelle, semée autour du 20 août et récoltée en août de l'année suivante. Les bassins de production de cette culture sont le sud-ouest du bassin parisien, le centre-ouest, le sud-ouest et le sud-est.

La carotte porte-graine, comme l'ensemble des cultures potagères porte-graine, s'intègre dans des systèmes de grandes cultures et contribue à sécuriser les approvisionnements de semences en France et pour le reste du monde, tant en quantité qu'en qualité. C'est une source de diversification intéressante pour les exploitations de polyculture dans les différents bassins de production.

## Dynamique de l'azote absorbé et de la production de matière sèche de la carotte porte-graine



La dynamique d'absorption de l'azote en carotte porte-graine se divise en 3 phases: (1) du semis jusqu'à la sortie de l'hiver (fin février - début mars), les besoins en azote de la culture sont peu importants ( $\leq 10$  kg N / ha), ensuite on note (2) une phase d'absorption intense entre début montaison et pleine floraison, au-delà (3) en post-floraison, l'absorption en azote redevient faible. Parallèlement, une augmentation significative de la matière sèche est observée jusqu'à la récolte. Cette augmentation de la matière sèche n'est donc pas forcément associée à une augmentation de l'absorption d'azote puisque l'optimum d'absorption se situe lui au stade pleine floraison et que la production de matière sèche continue au-delà de ce stade.

## Éléments nécessaires au calcul de la dose d'azote prévisionnelle

En cultures porte-graine, les besoins en azote de la plante ne sont pas liés à l'objectif de rendement grainier qui est très variable (parfois quelques centaines, voire quelques dizaines de kilogrammes à l'ha...). Il est établi néanmoins qu'une quantité optimale d'azote est nécessaire pour obtenir le potentiel de rendement grainier.

Les besoins en azote de la carotte porte-graine ont été évalués, selon les références expérimentales obtenues, à **140 kg d'N/ha**.

## Équation du bilan utilisée

Un outil de pilotage, basé sur la méthode du bilan azoté et tenant compte des caractéristiques des cultures porte-graine (notamment les besoins), a été mis au point par la FNAMS et est à disposition des opérateurs de la filière semences (agriculteurs multiplicateurs et techniciens d'établissements semenciers). Cette feuille de calcul a été conçue en relation avec ARVALIS-Institut du végétal. Elle est mise à jour régulièrement et est enrichie des références des Chambres d'Agriculture notamment, concernant les teneurs en azote des fumures organiques. Pour plus d'information, envoyer un mail à : [fnams.brain@fnams.fr](mailto:fnams.brain@fnams.fr)

L'équation de la méthode du bilan utilisée en culture porte-graine est la suivante :

Besoins de la culture (kgN/ha)		Fournitures du sol (kgN/ha)				Dose d'azote à apporter (kg N/ha)
Besoins de la plante (*)	+ Azote non utilisable (**)	- Minéralisation des résidus de culture (**)	- Minéralisation de l'humus (**)	- Reliquat sortie hiver (***)	- Apports organiques (**)	

\* Valeur référencée par la FNAMS et consultable sur le site du [COMIFER](http://www.comifer.fr)

\*\* Se référer aux postes du bilan détaillés sur le site du COMIFER

\*\*\* Valeur mesurée ou estimée (se renseigner auprès de la Chambre d'Agriculture)

## Pratiques de fertilisation

Pour couvrir les besoins en azote de la carotte porte-graine tout au long du cycle cultural, le fractionnement de la dose d'azote minéral est recommandé :

- 1<sup>er</sup> apport : sortie hiver, quantité forfaitaire 30 - 50 u
- 2<sup>ème</sup> apport : début montaison (X- (quantité apportée sortie hiver + prévue pour le 3<sup>ème</sup> apport) U, X étant la quantité d'azote calculée par la méthode du bilan)
- 3<sup>ème</sup> apport : au stade « dégagement des ombelles primaires » (quantité forfaitaire 30 U).

## Outil de pilotage : ajustement en cours de culture

Pas d'information

## Remarques diverses

Les carences en bore (racines brunes) semblent très fréquentes. Les autres carences possibles : magnésium, calcium et zinc. Cette culture réagit favorablement au sodium (d'après F. Villeneuve et J. Leteinturier - La carotte état des connaissances tome 2 - CTIFL, 1992).

### Contributeur

Fédération Nationale des Agriculteurs Multiplicateurs de Semences

### Liens utile

[www.fnams.fr](http://www.fnams.fr)

Toutes les fiches sont téléchargeables sur [www.comifer.asso.fr](http://www.comifer.asso.fr)

## COLZA D'HIVER

### Caractéristiques générales

- En 2011, le colza d'hiver occupait 1 520 000 ha en France pour une production de 4 500 000 tonnes. Les principales régions productrices sont par ordre décroissant de surface : le Centre, la Champagne-Ardenne, la Bourgogne, la Lorraine, la Picardie et le Poitou-Charentes.

La graine de colza contient de 45 à 50 % d'huile (sur graines entières propres et sèches). L'huile constitue la principale valorisation de la graine de colza. Elle est principalement utilisée en alimentation humaine et pour la production de biocarburant.

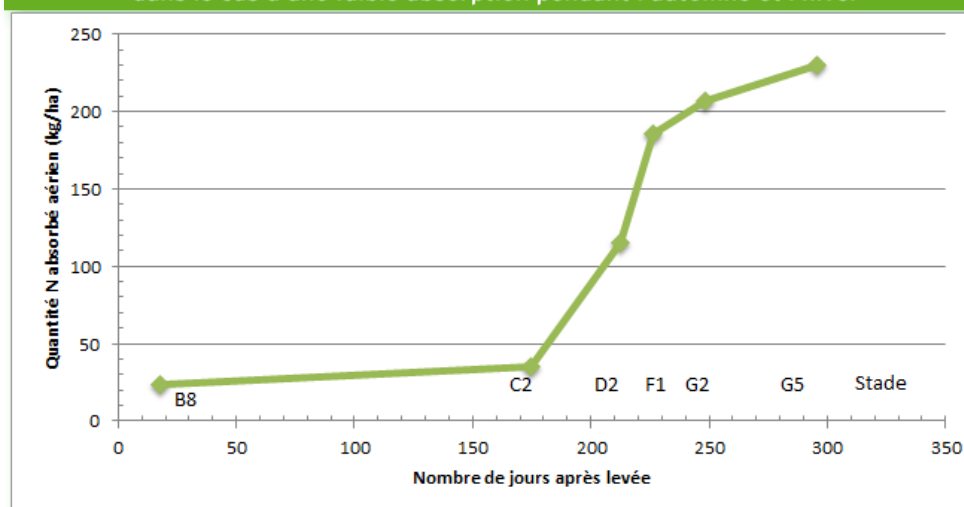
- Le semis est généralement réalisé de **mi-août** (Est de la France) à **mi-septembre** (Sud-Ouest) selon les régions et les récoltes de fin juin (Sud-Ouest) à fin juillet. La période d'ouverture du bilan prévisionnel va de la reprise de végétation à la sortie de l'hiver (fin-janvier à fin février selon les régions) jusqu'à la fin d'absorption de l'azote par la culture. Les apports de fertilisation azotée interviennent en général entre fin janvier et fin mars (interdiction en zone vulnérable jusqu'au 31 Janvier).

- Selon les milieux et les systèmes de culture, le besoin en fertilisation azotée du colza varie de 0 à environ 200 kg d'N/ha. La **fertilisation azotée** conduit à une réduction de la teneur en huile à raison d'environ 0,5 point en moins pour 40 kg d'N/ha en plus en moyenne.

- Le colza doit absorber de l'ordre de 300 kg d'N/ha (plante entière) pour que l'azote ne limite pas l'élaboration du rendement. La cinétique d'absorption d'azote au cours du cycle est très variable. Elle dépend de la disponibilité en azote minéral dans le milieu et des conditions de croissance (température et disponibilité en eau) pendant la période automnale. En effet, pendant l'automne et l'hiver le colza peut absorber de moins de **30 à près de 300 kg d'N / ha** selon les situations, soit de 10 à 100 % de ses besoins finaux. La grande majorité des parcelles se situe entre 40 et 120 kg d'N/ha.

### Courbe type d'absorption d'azote

dans le cas d'une faible absorption pendant l'automne et l'hiver





## Éléments nécessaires au calcul de la dose d'azote prévisionnelle

- Le rendement national moyen a varié de 27 q/ha en 2001 à près de 38 q/ha en 2009.
- Les **besoins en azote du colza** par unité de production sont établis à **6,5 ou 7,0 kg d'N/q** selon les régions (source : [Réglette azote colza](#), CETIOM)
- La quantité d'azote minéral dans le sol à la fermeture du bilan (**Rf**) est de l'ordre de **20 à 40 kg d'N/ha** selon les régions et les types de sol. (source : Réglette azote colza, CETIOM)
- La quantité d'azote absorbé par la culture à l'ouverture du bilan (**Pi**) est de **20 à 300 kg d'N/ha** selon les conditions de culture pendant l'automne et l'hiver (disponibilité en azote, somme de température, disponibilité en eau). Cette quantité doit être mesurée pour une application précise de la méthode du bilan (cf. Réglette azote colza du CETIOM ou consultable à la rubrique « Pi colza » sur le site du COMIFER).
- La fourniture d'azote par le sol (**PO**) est de **30 à 60 kg d'N/ha** selon les milieux. (Source : Réglette azote colza, CETIOM)

## Équation du bilan utilisée

L'équation du bilan de masse et l'équation d'efficience avec le CAU sont paramétrées en France. L'équation utilisée dépend de la région, des types de sol et des outils utilisés. (selon les disponibilités de références régionales). Les réglettes azote colza utilisant la méthode CAU sont diffusées dans les régions Nord-est, Auvergne et Rhône-Alpes.

**Bilan de masse** : le colza peut s'enraciner profondément si les conditions de croissance et la profondeur du sol le permettent (jusqu'à 120 cm). En revanche, son système racinaire est très sensible à la structure du sol.

Compte tenu de son aptitude à absorber l'azote pendant la phase automnale de son cycle, le reliquat d'azote minéral du sol à l'ouverture du bilan est généralement faible (de l'ordre de 30 kgN/ha) si la culture a levé tôt (fin août à début septembre selon les régions). Un bon indicateur de ce faible reliquat est le rougissement des feuilles. Ce reliquat peut néanmoins être plus élevé dans les systèmes de culture conduisant à de fortes disponibilités en azote minéral à l'automne.

L'époque d'ouverture du bilan se situe à la fin de l'hiver juste avant la reprise d'une croissance active (sortie hiver). C'est généralement à ce moment que doit être mesurée la quantité d'azote absorbé par la culture. Toutefois, dans les situations où les froids hivernaux risquent de conduire à de fortes chutes de feuilles vertes consécutives au gel, il est conseillé de réaliser aussi une estimation de la quantité d'azote absorbé par la culture à l'automne, avant les premiers froids (entrée hiver). En effet, une partie (estimée à 50 %) de l'azote organique restitué au sol par l'intermédiaire de ces feuilles vertes gelées peut être minéralisée aux printemps et être absorbée par la culture en place. Cette quantité est prise en compte en considérant comme quantité d'azote absorbé par la culture à l'ouverture du bilan la moyenne des quantités absorbées à l'entrée et à la sortie de l'hiver.

**Méthode CAU** : Le CAU du colza est très variable. Il est en moyenne proche de 0,8, valeur couramment utilisée dans l'écriture CAU.

Le mesure de PO est délicate car le colza perd ses feuilles au cours de son cycle, et il les perd d'autant plus tôt qu'il est soumis à une carence azotée. Dans l'absolu, il conviendrait donc de ramasser toutes les feuilles tombées pendant la période d'ouverture du bilan pour estimer le PO, ce qui n'est jamais réalisé (et peu réalisable). Dans la pratique, la quantité d'azote absorbé à la fermeture du bilan est estimée par une mesure réalisée au moment où la quantité d'azote présent dans les organes en place est maximale (avant cette date elle augmente car l'absorption d'azote est supérieure aux pertes par chute de feuilles ; après les pertes par chute de feuille deviennent supérieures à l'absorption). Pour une culture correctement alimentée, cela correspond environ à une date située 2 semaines après la fin de la floraison. Pour un témoin sans azote, ce moment peut intervenir plus tôt et d'autant plus tôt que la contrainte azotée est forte.

## Pratiques de fertilisation

En 2010, environ 4 % des surfaces ont reçu un apport engrais azoté minéral à l'automne (interdiction après le 1er Septembre en zone vulnérable). Il ne s'agit pas toujours d'un choix délibéré des agriculteurs car l'azote peut être apporté dans le cadre d'une fertilisation de fond sous forme d'engrais ternaire NPK. En 1996, de l'ordre de 12 % des parcelles étaient concernées par un apport d'automne. Il apparaît donc une réduction de cette pratique.

En 2010, la dose totale moyenne de fertilisation azotée minérale était de l'ordre de 154 kg d'N/ha et la dose moyenne apportée au printemps de l'ordre de 152 kg d'N/ha. Cette dose moyenne de printemps diminue régulièrement depuis 1999, période de lancement de la réglette azote colza. Elle était alors d'environ 180 kg d'N/ha.

La dose moyenne d'azote apportée au printemps dépend de l'état de croissance du colza à la sortie de l'hiver, ce qui indique que l'importance du poste « quantité d'azote absorbé par la culture à l'ouverture du bilan » est intégré.

Sources : enquêtes postales conduites par le CETIOM, 2010.

### Conseil du CETIOM

Pas d'apport d'azote préconisé à l'automne.

Le fractionnement en plusieurs apports de la dose totale d'azote est recommandé dès lors qu'elle est supérieure à 60-80 kgN/ha.

Les recommandations actuelles en France tiennent compte de l'état de croissance de la culture à la sortie de l'hiver et de la dose totale à apporter :

- dans les situations où la quantité d'azote absorbé à la sortie de l'hiver est faible et où la dose d'azote à apporter est supérieure à 170 kgN/ha, une stratégie en trois apports sera privilégiée :
  - au plus 40-50 kgN/ha au premier apport, à la reprise de végétation (éviter de réaliser un premier apport élevé sur les petits colzas dont les capacités d'absorption sont limitées au moment de la reprise, car l'utilisation de l'engrais apporté est alors faible)
  - 60-70 unités au troisième apport, au stade boutons séparés (E)
  - le reste entre les deux, au stade boutons accolés (C2-D2) ;
- dans les situations où la quantité d'azote absorbé à la sortie de l'hiver est moyenne et où la dose à apporter est comprise entre 100 et 170 kg/ha, celle-ci doit être fractionnée en deux apports (au moins) :
  - 60 à 80 unités au stade C2-D1 ;
  - le reste entre le stade D1 et le stade D2-E selon les régions ;
- dans les situations où la quantité d'azote absorbé à la sortie de l'hiver est élevée et où la dose à apporter est inférieure à 100 kg/ha, un ou deux apports suffisent ; s'il n'y a qu'un apport, il convient de l'effectuer du stade D1-D2 au stade D2-E selon les régions, sinon de faire le premier vers le stade C2-D1 et le deuxième au stade D2-E.
- dans les situations de gros colza à l'entrée de l'hiver et de forte défoliation pendant l'hiver, la dose d'azote n'est pas nécessairement très élevée ; les plantes peuvent avoir du mal à redémarrer sur les seules réserves racinaires ; un apport précoce et réduit (40-50 kg N/ha à la reprise de végétation) peut permettre à la culture de passer ce cap.

Dans bon nombre de situations, c'est l'apport de soufre qui conditionne la dose d'azote d'un des apports (2<sup>ème</sup> apport pour les stratégies en 3 apports et 1er apport pour les stratégies en 2 apports). L'ajustement à la dose totale est alors réalisé sur le dernier apport.

## Remarques diverses

Le colza est très exigeant en phosphore et peu exigeant en potasse. Ses besoins en soufre sont élevés (de l'ordre 200 kg de  $SO_3$  absorbé par ha pour un rendement de 35 q/ha).

## Contributeur

**CETIOM**

## Liens utiles

[www.cetiom.fr](http://www.cetiom.fr)

Toutes les fiches sont téléchargeables sur [www.comifer.asso.fr](http://www.comifer.asso.fr)

# ENDIVE (Chicorée Witloof)

## Caractéristiques générales

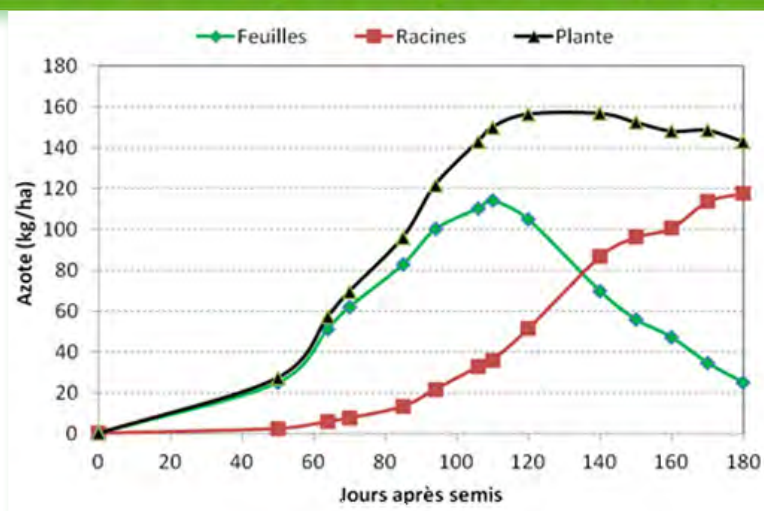
L'endive (*Cichorium intybus*) est une plante bisannuelle dont la culture est très développée en régions Nord-Pas-de-Calais et Picardie qui regroupe plus de 90% de la production (source : Agreste, 2012). Le reste se trouve en Bretagne, dans la Marne et chez quelques producteurs dispersés sur le territoire.

Sa culture se caractérise par deux étapes, d'une part la production d'une racine tubérisée et d'une rosette de feuilles lors de la phase végétative au champ (de mi-avril à fin mai pour les semis et septembre à fin novembre pour les arrachages), et d'autre part la croissance du bourgeon terminal par forçage à partir des réserves carbonées (inuline) et minérales (azotées notamment) accumulées dans la racine.

Les conditions les plus favorables à l'endive sont obtenues en sol limoneux profonds qu'elle peut explorer jusqu'à plus d'un mètre. Elle est ainsi relativement résistante à la sécheresse dès lors que son pivot est formé. Globalement vulnérable aux excès d'azote qui vont retarder sa maturité (aptitude à la mobilisation des sucres au forçage) et la sensibiliser aux bactéries du chicon, il faut éviter les sols riches en matière organique (> 20-25%/∞) et les apports d'azote tardifs. Bien que ne présentant que 0,7 à 1,5% de la matière sèche racinaire selon les génotypes, l'azote a un rôle majeur sur le rendement et la qualité morphologique du chicon.

Le besoin en azote est plus important pendant la phase initiale de croissance des feuilles qui vont servir ultérieurement à la synthèse des sucres accumulés dans la racine en phase de tubérisation mais également de ses propres réserves azotées (glutamine, arginine et protéines). En favorisant l'accumulation de nitrate, un excès d'azote disponible tardivement va diminuer l'aptitude des racines à la conservation. La transformation du nitrate en acides aminés pendant le stockage entraînera une consommation de matière sèche et en conséquence une perte de potentiel au forçage.

## Prélèvement théorique moyen d'azote par l'endive



## Éléments nécessaires au calcul de la dose d'azote prévisionnelle

Le besoin en azote dépend de la variété et varie entre 90 et 185 U pour des rendements moyens de 35 à 40 tonnes de racines récoltées par hectare et 20 à 25 tonnes de chicons commercialisables. Il est d'autant plus élevé que le cycle végétatif est long (de 120 à 180 jours) et que l'aptitude de la plante à le mobiliser au forçage est faible (entre 75% et 40% des réserves azotées sont utilisées respectivement par des hybrides à cycle court et long).

Le reliquat après récolte (Rf) est estimé à 30 U pour toutes les variétés sur la profondeur 0-90 cm. Chaque année, les nouveaux hybrides sont classés par comparaison à des références au besoin en N faible (type sensible), moyen (type tolérant) et élevé (type exigeant ou préférant) à partir des formes d'azote, de leur capacité d'accumulation au champ, de mobilisation au forçage, et de l'évaluation de leurs caractéristiques agronomiques (qualité morphologique et sanitaire, aptitude du chicon à la conservation post-récolte).

## Équation du bilan utilisée

La méthode du bilan azoté (Azobil, Azofert) est appliquée à partir d'une estimation de la minéralisation potentielle de la matière organique, d'une mesure du reliquat d'azote minéral à la sortie de l'hiver sur 3 horizons de 30 cm et en considérant un reliquat post-récolte de 30 U au total. Le type de variété va conditionner le paramétrage du besoin de la culture et peut conduire en cas de bilan négatif (excès d'azote) à reconsidérer le choix variétal. A l'extrême, la parcelle peut être rejetée si les fournitures en azote du sol sont, en l'absence de tout apport d'engrais, déjà supérieures aux besoins car des problèmes qualitatifs (notamment de tenue post-récolte des chicons) sont alors à craindre.

Pour tenir compte du temps d'occupation du sol, la quantité d'azote potentiellement minéralisable à partir de l'humus (Mh) est multipliée par un facteur 0,7 à 1,0 en fonction de la durée du cycle végétatif. L'ouverture du bilan se fait vers le 15 mars avant le semis (le contenu en azote de la culture Pi est donc nul). La fermeture du bilan se fait entre début septembre et fin novembre selon la précocité de la variété.

## Pratiques de fertilisation

Pour éviter un excès d'azote, un apport supérieur à 40 unités sera fractionné pour ajuster la dose au peuplement réel après la ou les levée(s).

Le 1<sup>er</sup> apport se fera au plus près du semis et le 2<sup>nd</sup> dès l'implantation définitive de la culture fin juin-début juillet. L'objectif du fractionnement n'est donc pas de procéder à une fertilisation tardive de l'endive mais d'assurer une meilleure répartition de l'azote au début du cycle.

L'azote sera préférentiellement apporté sous forme d'ammonitrate. Sous forme solide, il est moins hydrophile que le nitrate de chaux et limite les risques de brûlures des feuilles voire de perte de plantule par destruction du bourgeon principal (méristème).

## Outils de pilotage : ajustement en cours de culture

Il n'y a pas d'outils de pilotage de la fertilisation en cours de végétation.

**En fin de phase végétative**, la teneur en nitrate des racines est un des indicateurs de la maturité des plantes. La teneur la plus faible est à rechercher (maximum de 100 mg d'N nitrique par kg de matière sèche soit 440 ppm de nitrate environ) en complément d'autres critères liés à l'accumulation des réserves carbonées (rapport de masses fraîches entre feuilles et racine, calibre des racines, teneur en matière sèche, teneur en sucres réducteurs) et azotées.

Cette mesure peut être effectuée à l'aide de bandelettes réactives sur un extrait de jus de racine obtenu soit par pressage soit par broyage et centrifugation, soit directement sur la matière sèche par un laboratoire.

La teneur en azote total des racines est un critère d'évaluation de leur potentiel au forçage ou productivité en chicon. La **teneur optimale** dépend de chaque type de variété. Elle varie de 0,7-0,8% de la matière sèche pour une sensible à 1,4-1,5% pour une exigeante. Une teneur trop faible conduira à retarder l'arrachage.

NB : La comparaison des 2 méthodes montre que la valeur obtenue à l'aide de bandelette et exprimée en mg de nitrate ( $\text{NO}_3$ ) par litre de jus de racine est proche de celle obtenue sur la matière sèche et exprimée en mg d'azote nitrique (N de  $\text{NO}_3$ ) par kg de matière sèche (ex : 50 mg de  $\text{NO}_3$  par litre sur le jus correspondent approximativement à 50 mg d'azote N nitrique sur la MS).

**A l'arrachage**, un contrôle de la teneur en azote total des racines permet de décider de leur durée de conservation puis d'ajuster la conduite de forçage. Un excès d'azote dans la racine sera favorable à la productivité mais défavorable à la qualité morphologique et sanitaire des chicons notamment leur tenue post-récolte. La réduction des températures de forçage d'une part et de l'apport de solution nutritive d'autre part permettra de limiter ces éventuels effets néfastes. Une teneur sous-optimale conduira à des pratiques inverses pour stimuler la croissance.

## Remarques diverses

**L'endive est la tête de rotation.** Du fait de sa sensibilité à l'azote, les éventuels apports de matières organiques seront réalisés après sa culture, c'est-à-dire idéalement 5 années avant le retour de l'endive sur la même parcelle.

Relativement sensible aux excès de potasse et phosphore, l'endive est considérée respectivement comme « peu » et « moyennement » exigeante en ces éléments. Des teneurs de 1,3% à 1,8% de la matière sèche pour le potassium (exprimé en K) et 0,15 à 0,20% de la MS pour le phosphore (exprimé en P) sont optimales. Des différences variétales de capacité d'assimilation en K ont été observées mais pour l'heure sans possibilité de classement, comme cela a été fait vis-à-vis de l'azote.

## Contributeur

**Station Expérimentale de l'Endive  
APEF, Association des Producteurs d'Endives de France**

**Route de Cambrai - 62000 ARRAS**

**Tél. : 03.21.07.89.89**

**Courriel : [contact@endive.fr](mailto:contact@endive.fr)**

Toutes les fiches sont téléchargeables sur [www.comifer.asso.fr](http://www.comifer.asso.fr)



## ÉPINARD (*Spinacia oleracea*)

### Caractéristiques générales

• 6 500 ha d'épinard dont 4 500 environ sont cultivés pour l'industrie en France (2 800 ha en Bretagne et 1 700 ha en Nord Picardie) (source : CENALDI, moyenne 2006- 2010). Les autres types de production sont les cultures maraîchères destinées au marché frais et à la 4ème gamme. Les exploitations sont de type grandes cultures ou polyculture élevage. Les parcelles de production répondent à une sélection rigoureuse (irrigables, propres, homogènes, sans cailloux...).

• **Assurer la régularité de l'approvisionnement** industriel est un enjeu important. En effet, 130 000 tonnes d'épinards sont produits par an dont 85 000 tonnes sont livrées à l'industrie française. Production principalement destinée à la surgélation. L'enjeu qualitatif est d'assurer un bon développement foliaire, sans jaunissement, tout en respectant la réglementation européenne sur les nitrates (3 500 mg NO<sub>3</sub>/kg d'épinards frais ; 2 000 mg NO<sub>3</sub>/kg d'épinards surgelés ou conserve).

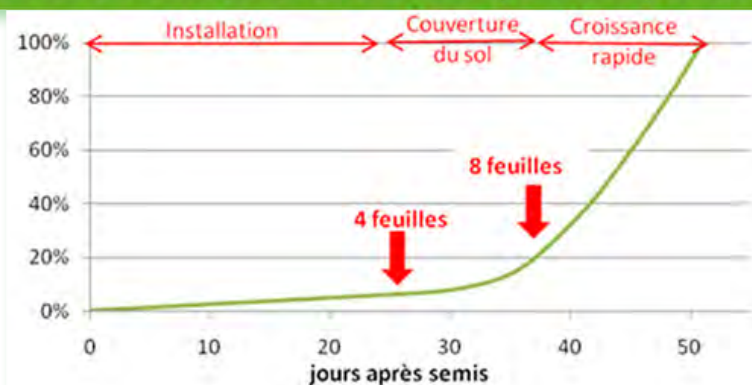
• La culture d'épinard peut se faire toute l'année, il est systématiquement cultivé en 1ère culture ou en culture dérobée. Par ailleurs, les cultures de printemps précoce peuvent faire l'objet d'une seconde coupe après la récolte. Les cycles sont variables : 35 jours en été (semis début juin/début juillet), 40-50 jours en automne (semis fin juillet/fin août), 40-70 jours au printemps (semis mi-février/mai) et 6 mois en hiver (semis fin septembre/octobre). Les cultures pour l'industrie sont majoritairement réalisées au printemps (Bretagne) et à l'automne (Nord Picardie).

• La faim d'azote se traduit par un jaunissement immédiat du feuillage, qui peut entraîner le déclassement de la culture (utilisation en « haché » et non en « branches » = feuilles entières), voire un refus de récolte.

• La croissance d'un épinard est exponentielle et la récolte a lieu au moment où les besoins en azote sont maximaux (4 t/ha/jour de matière fraîche produite). C'est à partir de la couverture du sol par le feuillage (entre 4 et 8 feuilles) que le développement de l'épinard devient intense. 80 % de l'azote est absorbé durant les deux dernières semaines du cycle. La récolte est déclenchée avant maturité, au tout début de la montée à graine. A ce stade, la culture mobilise 10 kg d'N/ha/jour.

La montée à graine est à craindre entre mai et juillet. En dehors de cette période, la date de récolte est plus facilement modulable, à condition que l'azote soit encore disponible dans le sol.

### Prélèvement d'azote par l'épinard



## Éléments nécessaires au calcul de la dose d'azote prévisionnelle

Le rendement machine est compris entre 25 à 30 tonnes/ha tous types de productions confondues, avec un taux de récolte de 40 à 60 %. On distingue 2 types d'épinards :

- Pour les fabrications « en branche » (= limbe entier), on cherche à limiter la présence de pétioles (coupe haute).
- Pour les fabrications « en haché », la récolte est retardée et la proportion de pétioles plus importante. Les rendements sont donc plus élevés qu'en branche.

La destination des cultures n'est pas toujours préétablie dans les plannings de fabrication.

Les besoins sont estimés **forfaitairement à 185 kg d'N/ha** pour des épinards de printemps et d'automne.

## Équation du bilan utilisée

Malgré des besoins équivalents au départ, le calcul de la dose d'azote conduit à des fumures plus importantes pour un épinard de printemps que pour un épinard d'été ou d'automne. En effet, les cultures de printemps précoces bénéficient peu de la minéralisation et sont les plus exposées à une faim d'azote. A l'inverse, les cultures d'été et d'automne profitent d'une plus grande minéralisation ainsi que des restitutions du précédent (pois, carotte, épinard...).

Le bilan s'ouvre au semis et se ferme à la récolte.

L'équation du bilan de masse est utilisée avec les paramètres suivants :

- Le reliquat  $R_i$  se mesure sur l'horizon 0-30 cm.
- Coefficient « temps » appliqué à la minéralisation annuelle =
  - 0,1 en printemps précoce
  - 0,2 au printemps
  - 0,3 en printemps tardif, été, automne
- $P_i = 0$
- $R_f = (N \text{ inextractible sur l'horizon 0-30 cm}) + (\text{« azote tampon » en cas de récolte retardée}^* = 50 \text{ kg/ha en moyenne})$

\* Les épinards sont récoltés en phase de croissance exponentielle, lorsque les mobilisations d'azote sont les plus importantes. Un stock d'azote tampon est donc nécessaire pour parer à tout retard de récolte, et éviter une dégradation de la qualité du feuillage (jaunissement, montée à graine prématurée).

## Pratiques de fertilisation et recommandations

L'azote est un élément-clé pour la culture d'épinard. Tout excès peut conduire à des teneurs excessives en nitrates sans gain de rendement, tandis qu'un rationnement entraîne le jaunissement du feuillage, la montée à graine et la réduction de la biomasse, sans possibilité de rattrapage.

L'épinard répond très bien aux effluents d'élevage. Il est préférable de faire ce type d'apport sur la culture précédente pour limiter le parasitisme.

L'azote minéral est souvent apporté au semis, sous forme ammonitrates. Le fractionnement est pratiqué sur les cycles longs, pour réduire le lessivage.

L'apport en végétation doit intervenir au stade 4 feuilles au plus tard sur les épinards de printemps et d'automne à cycle long (plus de 50 jours) et se limiter à 50 kg/ha pour éviter tout risque de dépassement des teneurs en nitrates à la récolte.

Sur épinards d'hiver, 1 ou 2 apports sont envisageables en février-mars.

Pour les secondes coupes d'épinard, un apport de 50 kg/ha est nécessaire.

En Picardie, Nord - Pas-de-Calais et Centre, des logiciels de bilan comme AZOFERT et AZOBIL sont régulièrement utilisés pour les conseils de fertilisation.

Lorsque l'utilisation du bilan azoté n'est pas possible pour des raisons pratiques, on raisonne plutôt en termes de dose-pivot qu'on ajuste en tenant compte de la date de semis, de l'effet précédent et de la connaissance du milieu (variété, type de sol).

Dans ce cas, les apports sont plafonnés à :

220 kg d'N/ha en culture d'hiver et de printemps précoce

170 kg d'N/ha pour les autres cultures.

## Devenir de l'azote après récolte

Les quantités d'azote présentes dans le sol au moment de la récolte de l'épinard peuvent être élevées et la culture restitue d'importantes quantités de déchets verts, riches en azote. Cet azote bénéficiera largement à la culture suivante qui est généralement mise en place rapidement après un épinard.

Pour cette culture suivante, on tiendra compte de l'effet précédent « épinard » dans le calcul du bilan :

- Si le reliquat initial n'est pas mesuré, tenir compte d'un Ri estimé (valeur référencée par l'UNILET)
- au niveau du Mr, en prenant une valeur de 25 kg N/ha.

En l'absence de culture suivante, il est recommandé de piéger l'azote en implantant rapidement une CIPAN après la récolte de l'épinard.

## Contributeur

UNILET

## Liens utile

[www.unilet.fr](http://www.unilet.fr)

Toutes les fiches sont téléchargeables sur [www.comifer.asso.fr](http://www.comifer.asso.fr)

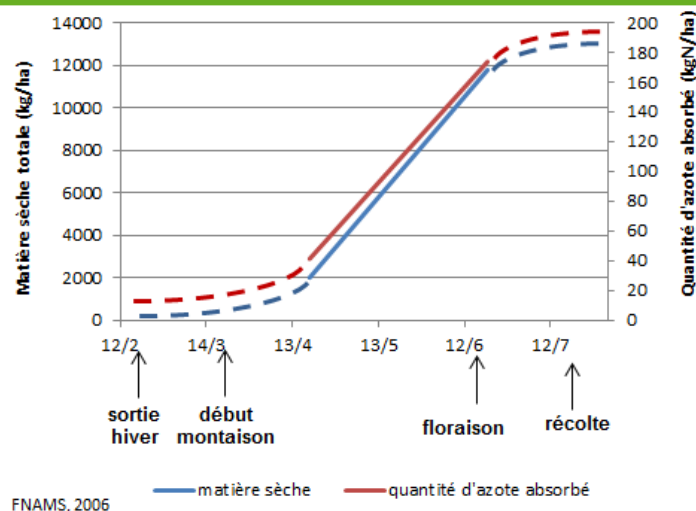
# FÉTUQUE ÉLEVÉE PORTE-GRAINE

## Caractéristiques générales

La féтуque élevée porte-graine, cultivée en France sur 2215 ha (GNIS, 2011), est une plante pérenne (2 à 3 récoltes). Cette culture, peut-être implantée en fin d'été en sol nu mais, en règle générale, le semis est réalisé sous un couvert de céréales à l'automne ou sous un couvert de pois au printemps. Le semis sous couvert est la plus fiable des techniques pour garantir une bonne installation de la culture. La récolte est effectuée fin juin/début juillet. Les bassins de production de cette culture sont le bassin Champenois, le centre-ouest, le sud-ouest et le sud est.

La féтуque élevée porte-graine, comme l'ensemble des cultures fourragères et à gazon porte-graine, s'intègre dans des systèmes de grandes cultures et contribue à sécuriser les approvisionnements de semences en France, tant en quantité qu'en qualité. C'est une source de diversification intéressante pour les exploitations de polyculture-élevage dans les différents bassins de production.

### Dynamique de la quantité d'azote absorbé et de la production de matière sèche de la féтуque élevée porte-graine



La dynamique d'absorption de l'azote de la féтуque élevée porte-graine se divise en 3 phases: (1) du semis jusqu'à la sortie d'hiver (fin février - début mars), les besoins en azote de la culture sont peu importants, ensuite on note (2) une phase d'absorption intense entre début montaison et pleine floraison, au-delà (3) en post-floraison, l'absorption en azote redevient faible. La dynamique de production de la matière sèche est similaire à celle de la quantité d'azote absorbé.

## Éléments nécessaires au calcul de la dose d'azote prévisionnelle

En cultures porte-graine, les besoins en azote de la plante ne sont pas liés à l'objectif de rendement grainier qui est très variable (parfois quelques centaines voire quelques dizaines de kilogrammes à l'ha...). Il est établi néanmoins qu'une quantité optimale d'azote est nécessaire pour obtenir le potentiel de rendement grainier.

Les besoins en azote de la fétuque élevée porte-graine ont été évalués, selon les références expérimentales obtenues, à **160 kg d'N/ha**.

Les productions éventuelles de fourrages, effectuées soit en précoupe, soit en repousse d'automne, ne sont pas prises en compte dans le calcul du bilan azoté : les besoins rapportés ici concernent exclusivement le cycle grainier.

## Équation du bilan utilisée

Un outil de pilotage, basé sur la méthode du bilan azoté et tenant compte des caractéristiques des cultures porte-graine (notamment les besoins), a été mis au point par la FNAMS et est à disposition des opérateurs de la filière semences (agriculteurs multiplicateurs et techniciens d'établissements semenciers). Cette feuille de calcul a été conçue en relation avec ARVALIS-Institut du végétal. Elle est mise à jour régulièrement et est enrichie des références des Chambres d'Agriculture notamment, concernant les teneurs en azote des fumures organiques. Pour plus d'information, envoyer un mail à : [fnams.brain@fnams.fr](mailto:fnams.brain@fnams.fr)

L'équation de la méthode du bilan utilisée en culture porte-graine est la suivante :

Besoins de la culture (kgN/ha)		Fournitures du sol (kgN/ha)				Dose d'azote à apporter (kg N/ha)
Besoins de la plante (*)	+ Azote non utilisable (**)	- Minéralisation des résidus de culture (**)	- Minéralisation de l'humus (**)	- Reliquat sortie hiver (***)	- Apports organiques (**)	

\* Valeur référencée par la FNAMS et consultable sur le site du [COMIFER](#)

\*\* Se référer aux postes du bilan détaillés sur le site du COMIFER

\*\*\* Valeur mesurée ou estimée (se renseigner auprès de la Chambre d'Agriculture)

## Pratiques de fertilisation

### Fertilisation à l'automne

Selon l'arrêté du 19 décembre 2011 relatif au programme d'actions national à mettre en œuvre dans les zones vulnérables, la période d'interdiction est plus courte pour les cultures porte-graine. La fertilisation azotée en début d'automne est, dans le cas de la fétuque élevée, destinée à développer la plante avant l'hiver pour favoriser la formation des futures talles reproductrices au printemps.

Après la récolte d'un couvert ou d'un précédent céréale, un apport d'automne entre 20 et 50 U peut être réalisé en fonction de l'état de la culture.

Après la récolte d'un couvert ou d'un précédent pois, l'apport d'automne est généralement inutile (entre 20 à 30 U parfois nécessaire).

## Fertilisation de printemps

Pour couvrir les besoins en azote de la fétuque élevée porte-graine à partir de la reprise de végétation, le fractionnement de la dose d'azote minéral est recommandé :

- 1<sup>er</sup> apport : entre 60 et 80 U sortie hiver (courant février)
- 2<sup>ème</sup> apport :  $X - \text{quantité apportée sortie hiver}$ ,  $X$  étant la quantité d'azote calculée par la méthode du bilan (courant mars). Si la quantité d'azote minérale à apporter est très importante, le fractionnement en 3 apports doit être envisagé, avec un 3<sup>ème</sup> apport en avril.

## Outil de pilotage : ajustement en cours de culture

Pas d'information

## Remarques diverses

La fétuque élevée porte-graine ne semble pas particulièrement affecté par une déficience du sol en oligo-éléments. Mais comme pour les autres cultures, une parcelle présentant de fortes carences en éléments comme le cuivre, le fer, le zinc, le soufre ou la magnésie doit être corrigée. (Source : La fétuque élevée porte-graine : Guide pratique FNAMS, 2002).

## Contributeur

Fédération Nationale des Agriculteurs Multiplicateurs de Semences

## Liens utile

[www.fnams.fr](http://www.fnams.fr)

Toutes les fiches sont téléchargeables sur [www.comifer.asso.fr](http://www.comifer.asso.fr)

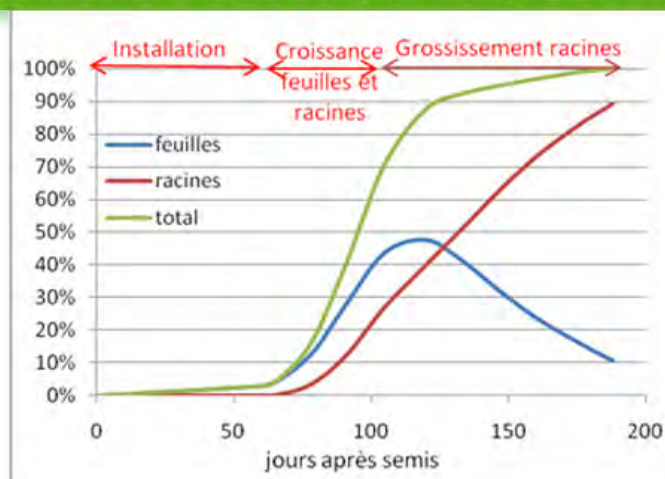


## GROSSE CAROTTE Type Flakkee (*Daucus carota*)

### Caractéristiques générales

- 1 000 à 1 200 ha en France de grosse carotte dont 550 ha pour la filière industrie (360 ha en Nord Picardie Centre et 190 ha en Bretagne) (source : CENALDI, moyenne 2006- 2010). Les exploitations sont de type grandes cultures ou polyculture élevage. Les parcelles de production répondent à une sélection rigoureuse (terres profondes, homogènes, sans cailloux...).
- **Assurer la régularité de l'approvisionnement** industriel est un enjeu important. En effet, 40 000 tonnes de racines par an sont livrées à l'industrie française, essentiellement destinées à être débitées en cubes, rondelles (macédoines, mélanges de légumes), râpées ou écrasées en purée. L'enjeu qualitatif est de limiter les problèmes sanitaires.
- Le cycle de la grosse carotte est de 6 mois en moyenne (5 à 8 mois selon la date de récolte et la destination). Le semis se déroule de début avril à mi-mai et les récoltes ont lieu d'octobre à novembre voire plus tard dans les zones non gélives. La date de récolte dépend des besoins industriels et intervient pendant la phase de croissance des racines.
- La grosse carotte est une culture très lente à se mettre en place du fait de sa faible densité (moins de 50 plantes au m<sup>2</sup>). Les prélèvements d'azote débutent avec le développement du feuillage. C'est à ce stade que les besoins instantanés sont les plus élevés. Ils se poursuivent ensuite durant toute la phase de grossissement des racines (besoins constants jusqu'au stade récolte).

### Prélèvement d'azote par la grosse carotte



## Éléments nécessaires au calcul de la dose d'azote prévisionnelle

Le rendement moyen machine est de 71 tonnes de racines/ha (Source : CENALDI, moyenne 2006-2010), avec un taux de récolte de 70 à 80 %.

Certaines parcelles peuvent néanmoins dépasser des rendements machine de 100 tonnes de racines/ha.

Les besoins sont estimés **forfaitairement à 200 kg d'N/ha.**

## Équation du bilan utilisée

La couverture du sol par la culture est lente, entre 2,5 et 3 mois.

L'ouverture du bilan se fait au semis et la fermeture a lieu à la récolte.  
L'équation du bilan de masse est utilisée avec les paramètres suivants :

- Le reliquat **Ri** se mesure sur les horizons 0-30 cm et 30-60 cm.
- **Pi = 0**
- **Rf (N inextractible sur les horizons 0-30 cm et 30-60 cm) = 15 à 20 kg N/ha en sol léger**

## Pratiques de fertilisation et recommandations

Le bilan azoté s'applique assez bien aux grosses carottes à condition de tenir compte des risques de lessivage en début de cycle. Il est par conséquent recommandé de fractionner les apports d'azote minéral :

- 1 apport au semis
- 1 apport complémentaire au stade 4 feuilles vraies.

La récolte intervenant avant maturité physiologique, on constate un épuisement de l'azote dans les 60 premiers centimètres du sol, sans incidence sur le rendement.

Au semis, la forme d'azote est indifférente (engrais incorporé au sol).

En végétation, la forme nitrique d'azote la plus rapidement utilisable par les plantes est préférable : on la trouve dans les engrais ammonitrates, nitrates de calcium ou de potassium.

Toute fumure organique doit être apportée à l'automne précédant l'implantation des carottes.

En Picardie, Nord - Pas-de-Calais et Centre, des logiciels de bilan comme AZOFERT et AZOBIL sont régulièrement utilisés pour les conseils de fertilisation.

La méthode PILAZO développée par le Ctifl est utilisée sur carotte de type Nantaise mais n'a pas été adaptée aux carottes de type industrie pour le moment.

La méthode du bilan est bien adaptée aux zones de production avec des sols à faible teneur en matière organique (Val de Loire, Picardie, Nord - Pas-de-Calais par exemple) et dans le cas d'un cycle complet de la culture, ce qui n'est pas toujours le cas, la récolte étant parfois réalisée en phase de croissance terminale des racines.

En l'absence de bilan azoté, les apports sont plafonnés à 180 kg d'N/ha.

## Contributeur

**UNILET**

## Liens utiles

[www.unilet.fr](http://www.unilet.fr)

Toutes les fiches sont téléchargeables sur [www.comifer.asso.fr](http://www.comifer.asso.fr)

## HARICOT (*Phaseolus vulgaris*)

### Caractéristiques générales

- 30 000 ha de haricots verts (**source : CENALDI, moyenne 2006-2010**) sont cultivés pour l'industrie en France dont 12 000 ha en Bretagne - Pays de la Loire, 7 000 ha en Nord Picardie Centre et 11 000 hectares dans le Sud Ouest. Les surfaces de haricots grains secs et demi-secs sont de 10 000 ha. La majorité des surfaces sont irriguées. Les exploitations sont de type grande cultures ou polyculture élevage. Les parcelles de production répondent à une sélection rigoureuse (pas de cailloux, etc)

- Assurer la régularité de l'approvisionnement industriel est un enjeu important. En effet, 375 000 tonnes par an de légumes sont livrées à l'industrie (appertisation et surgélation). Les haricots blancs sont vendus sous divers labels géographiques : Coco de Paimpol, mogette de Vendée, haricots de Castelnaudary, haricot Tarbais, Lingot du Nord, Haricot de Soissons.

Deux enjeux qualitatifs se dégagent sur haricot :

- L'homogénéité du calibre et l'aptitude à la cueillette pour les haricots gousses et l'homogénéité de la maturité et de la couleur du grain pour les haricots écosés
- Limiter les problèmes liés à la verse. Depuis 10 ans, la sclérotiniose est la maladie la plus redoutée sur haricot, elle est favorisée par les excès de végétation et donc d'azote.

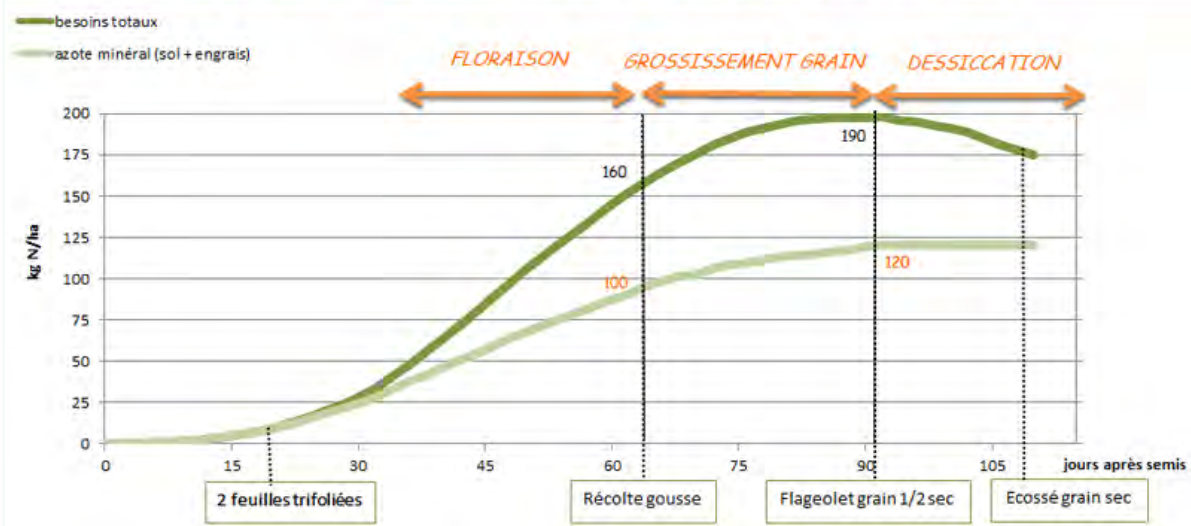
- Le haricot est une **culture d'été** nécessitant des températures supérieures à 10°C. Les semis s'échelonnent entre Avril et Août. En fonction de la durée du cycle, à partir de mi-Mai à mi-Juillet au Nord, de fin Avril jusqu'à début Août au Sud.

Dans le Sud Ouest, 2/3 des surfaces sont en « double culture » (2 cycles se suivent), mais le phénomène de double-culture est en fait, plus répandu si on considère l'ensemble des haricots cultivés « en dérobée » derrière un autre légume : petit pois, carotte, épinard, maïs doux. Le haricot vert est fréquemment conduit en « dérobée ».

Les conditions estivales et irriguées sont favorables à l'expression du potentiel de minéralisation de l'azote organisé, mais celui-ci peut aussi varier fortement et rapidement. Le temps d'interception par la culture est faible. Les récoltes se déroulent entre début Juillet et mi-Octobre.

- La courbe de l'absorption d'azote ne diffère pas fondamentalement d'un type de haricot à un autre. C'est le positionnement de la récolte par rapport aux phases du cycle qui varie. Le cycle d'une récolte en gousses « mangetout » dure 60 à 80 jours. Alors qu'une récolte en grains demi-secs et secs a un cycle de 90 à 130 jours

## Courbe de nutrition azotée du haricot



La récolte des mangetouts est réalisée avant maturité physiologique, en pleine phase de croissance verte et d'assimilation azotée. À cette période, le rendement peut progresser de 2 t/ha/j, et l'assimilation de 3-4 kg N/ha/j. Une récolte anticipée pénalise le rendement, un retard de quelques jours dégrade la qualité.

**Aucun stress azoté** n'est tolérable dans la période de récolte, c'est pourquoi le reliquat visé à la récolte ne peut se limiter à l'azote inextractible.

## Éléments nécessaires au calcul de la dose d'azote prévisionnelle

Les rendements par hectare sont très variables, en fonction du type variétal et de l'état sanitaire, mais également de la date de récolte : 12 à 13 tonnes brut récolte machine/ha en moyenne pour les haricots verts (fourchette comprise entre 6 et 18t/ha) et de 6 tonnes brutes en moyenne pour les flageolets récolte machine (fourchette comprise entre 50 et 100q/ha) et 4 tonnes pour le sec. Par ailleurs, le taux de récolte est également source d'imprécision : il est estimé en moyenne à 66% en gousses et 80% en grains. C'est pourquoi on ne raisonne pas en termes d'objectif de rendement.

Les besoins sont estimés **forfaitairement à 160 kg/ha** pour une récolte en gousses extrafines ou très fines, à **180 kg/ha** pour une récolte en gousse de gros calibre et à **190 kg/ha** pour un flageolet ou haricot blanc sec.

## Équation du bilan utilisée

L'équation du bilan de masse est utilisée avec les paramètres suivants :

L'ouverture du bilan se fait au moment du semis donc la quantité d'azote absorbé par la culture à l'ouverture du bilan est nulle ( $P_i=0$ ). Le bilan se ferme à la récolte.

**Rf = N inextractible sur l'horizon 0-30 cm + « azote tampon » en cas de récolte retardée\* = 30 kg/ha en moyenne pour les haricots verts, 10 kg N/ha pour les haricots écosés récoltés en mi-sec**

\* Les haricots sont récoltés en phase de croissance exponentielle, lorsque les besoins d'azote sont les plus importants. Un stock d'azote tampon est donc nécessaire pour parer à tout retard de récolte.

**Le reliquat azoté sortie hiver (Ri)** peut être une approximation du reliquat à l'ouverture du bilan pour les semis de printemps, en sols peu filtrants, mais la mesure du reliquat proche du semis est préférable. En culture dérobée, la mesure des reliquats au semis en routine n'est plus possible (forte variabilité instantanée, manque de temps pour l'analyse).

Les reliquats de la culture précédente, fréquemment elle-même une culture légumière, sont souvent importants, de même que les résidus de récolte à C/N faible.

Le reliquat Ri se mesure sur la profondeur d'enracinement, 30 cm pour les cycles courts et 45 cm pour les cycles longs.

Coefficient « temps » appliqué à la minéralisation annuelle :

0,4 pour les cycles courts

0,6 pour les cycles longs

Les souches indigènes de bactéries fixatrices présentes dans le sol sont de qualité variable. L'inoculation est aléatoire et non développée commercialement. La **fixation symbiotique** est faible, variable et tardive, elle peut permettre toutefois de compléter les besoins de fin de cycle. Elle est estimée à **30 kg d'N/ha** pour les haricots gousses et à **50 kg d'N/ha** pour les grains écosés dans le bilan.

## Devenir de l'azote après récolte

Les quantités d'azote présentes dans le sol ou restituées à la récolte peuvent être relativement importantes, il est donc nécessaire d'en tenir compte pour la gestion de l'azote en postrécolte :

- Dans le bilan prévisionnel de la culture à suivre :
  - o Si le reliquat initial n'est pas mesuré, tenir compte d'un Ri estimé (valeur référencée par l'UNILET)
  - o La minéralisation à court terme des résidus de récolte (Mr) apportera 35 kg à 40 kg N/ha selon le développement de la culture.
- Si aucune culture n'est prévue, l'implantation d'une culture CIPAN est recommandée.

## Pratiques de fertilisation et recommandations

Du fait des nombreuses contraintes à l'utilisation en routine du bilan, on raisonne plutôt en termes de dose-pivot qu'on ajuste en tenant compte de la date de semis, de l'effet précédent et de la connaissance du milieu (variété, type de sol) à décliner régionalement.

Les **apports sont plafonnés** à 100 kg d'N/ha pour les haricots gousses et à 120 kg d'N/ha pour les haricots grains.

Un stock d'azote minéral de **50 kg d'N/ha au semis** est nécessaire pour permettre un bon démarrage de peuplement et une croissance homogène jusqu'à la floraison, sans inhiber la formation des nodosités. La localisation d'engrais « starter » (15 à 20 kg N/ha) est pratiquée dans certaines régions et bien valorisée notamment par les semis précoces.

Un apport complémentaire (au plus tard à la floraison pour les sols filtrants) peut être nécessaire lorsque la croissance devient intense. Pour les exploitations qui disposent d'un équipement de fertigation, il est possible d'intervenir un peu plus tard et à petites doses : jusqu'à deux apports de 30 kg/ha.

Des logiciels de bilan azoté comme AZOBIL ou AZOFERT sont régulièrement utilisés pour les haricots dans la moitié nord de la France sur des parcelles de première culture.

## Outil de pilotage : ajustement en cours de culture

**Aucun outil de pilotage** n'est commercialisé sur haricot. Des mesures instantanées permettant de suivre l'évolution de l'azote nitrique dans la solution du sol peuvent être utiles afin d'ajuster le complément nécessaire en végétation.

Un jaunissement brutal de la culture indique une faim d'azote mais cet indicateur est trop tardif et peu fiable du fait de l'interaction avec d'autres paramètres (Soufre, magnésium, manganèse et génétique).



## Contributeur

**UNILET**

## Liens utile

[www.unilet.fr](http://www.unilet.fr)

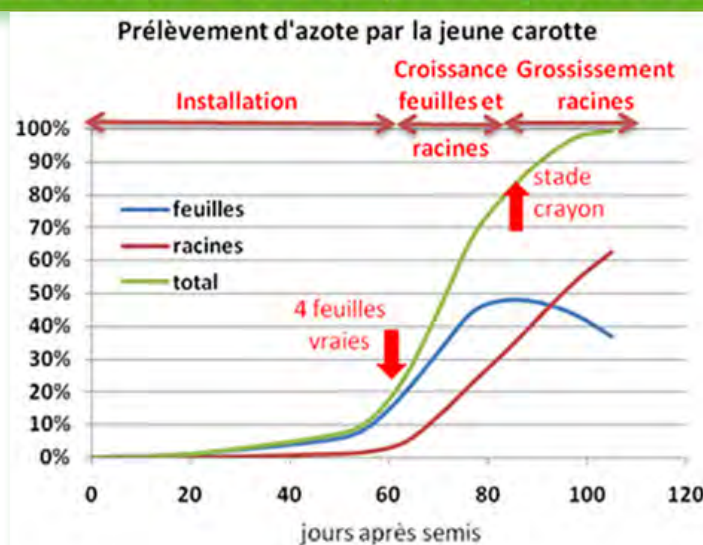
Toutes les fiches sont téléchargeables sur [www.comifer.asso.fr](http://www.comifer.asso.fr)

## JEUNE CAROTTE OU BABY CAROTTE Type Amsterdam (Daucus carota)

### Caractéristiques générales

- 2 000 ha de jeune carotte dont 1 300 ha en Nord Picardie Centre et 700 ha en Bretagne. (source : CENALDI, moyenne 2006-2010). Les exploitations sont de type grandes cultures ou polyculture élevage. Les parcelles de production répondent à une sélection rigoureuse (terres sableuses, irrigables, propres, homogènes, peu de cailloux...)
- **Assurer la régularité de l'approvisionnement** industriel et la concomitance avec les récoltes de pois sont des enjeux importants. En effet, 90 000 tonnes de racines par an sont livrées à l'industrie française, principalement pour les fabrications de pois-carotte (conservé et surgelé). Les enjeux qualitatifs sont de limiter les problèmes sanitaires et maintenir un feuillage en bon état jusqu'à la récolte (arrachage par les feuilles), et d'obtenir des racines de diamètre compris entre 8 et 20 mm. Certaines usines recherchent cependant des calibres supérieurs.
- Le cycle de la jeune carotte s'étale sur 85 à 115 jours suivant la date de semis. Les semis ont lieu de fin février à mi-mai et les récoltes de début juin à mi-août.
- Après une phase d'installation qui dure 2 à 2,5 mois selon la date de semis, la jeune carotte entre dans une phase de croissance active du feuillage puis des racines. Les besoins en azote s'intensifient à partir du stade « 4 feuilles vraies », avec des prélèvements estimés à 2 kg N/ha/jour durant la phase de développement foliaire. L'assimilation se poursuit pendant la phase de grossissement des racines qui correspond au dernier mois précédant la récolte. Le rendement augmente alors de 1,5 t/ha/jour. La récolte intervient durant la phase de grossissement des racines.

### Prélèvement d'azote par la jeune carotte



## Éléments nécessaires au calcul de la dose d'azote prévisionnelle

Le rendement moyen machine est de 43 tonnes de racines/ha (Source : CENALDI, moyenne 2006-2010), avec un taux de récolte de 70 à 80 %.

Selon le type d'implantation (en plein, sur planche ou sur billon), certaines parcelles peuvent dépasser des rendements machine de 60 tonnes de racines/ha.

Les besoins sont estimés **forfaitairement à 110 kg d'N/ha**.

Les excès d'azote entraînent un développement excessif du feuillage et un risque sanitaire accru. A l'inverse, un manque d'azote limite le développement végétatif et rend la récolte plus difficile.

## Équation du bilan utilisée

L'installation de la culture est lente, notamment pour les semis précoces (février). La culture couvre le sol dans le mois précédent la récolte.

Le bilan s'ouvre au semis et se ferme à la récolte.

L'équation du bilan de masse est utilisée avec les paramètres suivants :

- Le reliquat  $R_i$  se mesure sur l'horizon 0-30 cm.
  - Coefficient « temps » appliqué à la minéralisation annuelle = 0,4
  - $P_i = 0$
  - $R_f = (N \text{ inextractible sur l'horizon 0-30 cm}) + (\text{« azote tampon » en cas de récolte retardée}^* = 20 \text{ kg N/ha}) = 35 \text{ kg N/ha en sol léger}$
- \* Les jeunes carottes étant récoltées en phase de croissance active, un stock d'azote tampon est nécessaire pour parer à tout retard de récolte et éviter un stress nutritionnel (dégradation du feuillage qui pénaliserait le rendement, la récolte étant effectuée par préhension des fanes).

## Pratiques de fertilisation et recommandations

Les apports sont généralement fractionnés pour limiter le lessivage, risqué en sols sableux et irrigués :

- 1 apport au semis
- 1 apport complémentaire à 4 feuilles vraies au plus tard.

Au semis, la forme d'azote est indifférente (engrais incorporé au sol).

En végétation, la forme nitrique d'azote la plus rapidement utilisable par les plantes est préférable : ammonitrates, nitrates de calcium ou de potassium.

Les logiciels de bilan AZOFERT et AZOBIL sont régulièrement utilisés dans les régions Nord - Pas-de-Calais et Picardie pour les conseils de fertilisation.

La méthode PILAZO développée par le Ctifl est utilisée sur carotte de type Nantaise mais n'a pas été adaptée aux carottes de type industrie pour l'instant.

En l'absence de bilan azoté, les apports sont plafonnés à 100 kg d'N/ha.

### Devenir de l'azote après récolte

L'azote restant dans le sol au moment de la récolte des jeunes carottes et celui issu de la minéralisation des résidus de culture bénéficiera à la culture suivante.

## Calcul de la fertilisation azotée

Pour celle-ci, on tiendra compte de l'effet précédent « jeune carotte » dans le calcul du bilan :

- si le reliquat initial n'est pas mesuré, tenir compte d'un Ri estimé (valeur référencée par l'UNILET)
- au niveau du Mr, en prenant une valeur de 20 kg N/ha.

En l'absence de culture suivante, il est recommandé de piéger l'azote en implantant rapidement une CIPAN après la récolte des jeunes carottes.

### Contributeur

UNILET

### Liens utile

[www.unilet.fr](http://www.unilet.fr)

Toutes les fiches sont téléchargeables sur [www.comifer.asso.fr](http://www.comifer.asso.fr)

## Lin oléagineux d'hiver et de printemps

### Caractéristiques générales

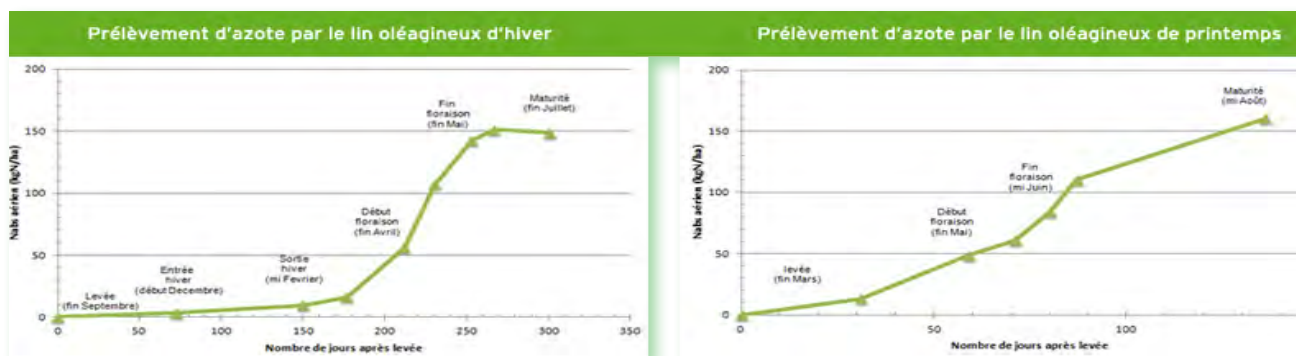
• En 2010, le lin oléagineux (production de graines) occupait 18 000 ha en France pour une production de 35 000 tonnes. Les principales régions productrices sont les suivantes par ordre décroissant de surface : Centre, Poitou-Charentes, Pays-de-Loire et Picardie.

La graine de lin contient de l'ordre de 44 % d'huile (sur graines propres et sèches) riche en acide alpha-linolénique (oméga 3). La collecte est essentiellement valorisée en alimentation animale sous forme de graines entières.

• Il existe deux types de culture de lin oléagineux : Le lin d'hiver tolérant au froid et ne nécessitant pas de vernalisation et le lin de printemps.

Selon les régions, le semis du lin d'hiver est généralement réalisé de mi-septembre à fin-octobre et la récolte de début juillet à mi-août. Le lin de printemps est semé de fin-février à fin-mars et récolté de mi-juillet à début-septembre.

• La date d'ouverture du bilan prévisionnel est la reprise de végétation à la sortie de l'hiver pour le lin d'hiver et le semis pour le lin de printemps. Dans les deux cas le bilan se clôture à la fin d'absorption de l'azote (2 à 3 semaines avant la récolte). Les apports de fertilisation azotée sont réalisés à la reprise de végétation sur le lin d'hiver (de début février à fin février selon les régions) et principalement au moment du semis sur le lin de printemps (1er février dans le calendrier national zone vulnérable).



### Éléments nécessaires au calcul de la dose d'azote prévisionnelle

- Le rendement national moyen a été relativement stable autour de 20-21 q/ha sur la période 2001 à 2010
- **Les besoins en azote du lin oléagineux** par unité de production sont **en moyenne** de **4,5 kg d'N/q** avec des variations selon les régions (source : Flénet, 2004)
- La quantité d'azote minéral dans le sol à la fermeture du bilan (**Rf**) est de **30 kg d'N/ha** sur 90 cm
- La quantité d'azote absorbé par la culture à l'ouverture du bilan (**Pi**) est de **quelques kg à 30 kg d'N/ha** pour le lin d'hiver et **0 kg d'N/ha** pour le lin de printemps
- La fourniture d'azote par le sol (**PO**) varie de **50 à plus de 100 kg d'N/ha** selon la durée des cycles (lin d'hiver ou de printemps) et les types de sol milieu

## Équation du bilan utilisée

L'équation du bilan de masse et l'équation d'efficience avec le CAU sont paramétrées en France. L'équation utilisée dépend de la région et des types de sol (selon disponibilité de références régionales)

**Bilan de masse :** Le lin peut s'enraciner jusqu'à une profondeur de 90 cm environ. La quantité d'azote minéral dans le sol à l'ouverture du bilan est un poste très variable en raison de la diversité des sols, des cultures précédentes (nature, adéquation du rendement et de la fertilisation) des apports de produits organiques et de la gestion de l'interculture. Le lin est le plus souvent précédé par une céréale à paille récoltée l'été précédent son implantation. Sauf dérogation, avant le lin de printemps, il est donc nécessaire d'implanter une culture intermédiaire piège à nitrate dans les zones vulnérables. Le lin d'hiver, lui, couvre le sol pendant l'hiver.

La quantité d'azote absorbé par la culture de lin d'hiver à l'ouverture du bilan est également potentiellement très variable en fonction de la date de semis, du climat et de la gestion de la culture précédente. Toutefois, dans la pratique, les dates de semis conseillées (et le plus souvent réalisées) ont été définies de façon à obtenir le plus souvent un niveau de croissance de 0.2 t/ha, valeur considérée comme optimale pour concilier une tolérance au froid hivernal suffisante, un risque de verse au printemps réduit et une préservation du rendement potentiel. Ceci correspondant à une quantité d'azote absorbé dans les plantes entière voisine de 15 kg d'N/ha.

**Méthode CAU :** Les rares références disponibles montrent une grande variabilité du CAU. Le CAU moyen est l'ordre de 0,65 (0,8 en lin d'hiver et 0,5 en lin de printemps).

La mesure de la quantité d'azote absorbé par les témoins non fertilisés doit être réalisée de préférence vers la fin de la floraison pour le lin d'hiver et à maturité pour le lin de printemps. Une diminution de la quantité d'azote est en effet souvent observée entre la fin de la floraison et la maturité sur lin d'hiver. Ce phénomène n'est pas observé sur lin de printemps, en effet l'accumulation d'azote se poursuit jusqu'à maturité (source : données Alternatech de 1996 à 2001, Picardie).

## Conseil de fertilisation du CETIOM

A titre indicatif, en l'absence d'apport organique régulier, la dose d'apport d'azote est généralement comprise entre 70 et 130 kg d'N/ha.

### Lin d'hiver

Il est conseillé de fractionner les apports en 2 passages si la dose le justifie :

- 50 kg d'N/ha à la reprise de végétation ;
- le complément 3 à 4 semaines plus tard.

### Lin de printemps

L'apport peut être réalisé au semis. Si nécessaire, un apport sous forme d'engrais solide peut être réalisé avant l'apparition des boutons floraux.

Une grille très simplifiée de calcul de dose est également proposée par le CETIOM (brochure lin graine de printemps du CETIOM)

## Outil de pilotage : ajustement en cours de culture

Le CETIOM ne propose pas d'outil de pilotage pour l'ajustement de l'apport.



## Remarques diverses

**Un excès de fertilisation** conduit à une réduction de la teneur en huile des graines récoltées et favorise la verse.

### Contributeur

**CETIOM**

### Liens utile

[www.cetiom.fr](http://www.cetiom.fr)

Toutes les fiches sont téléchargeables sur [www.comifer.asso.fr](http://www.comifer.asso.fr)

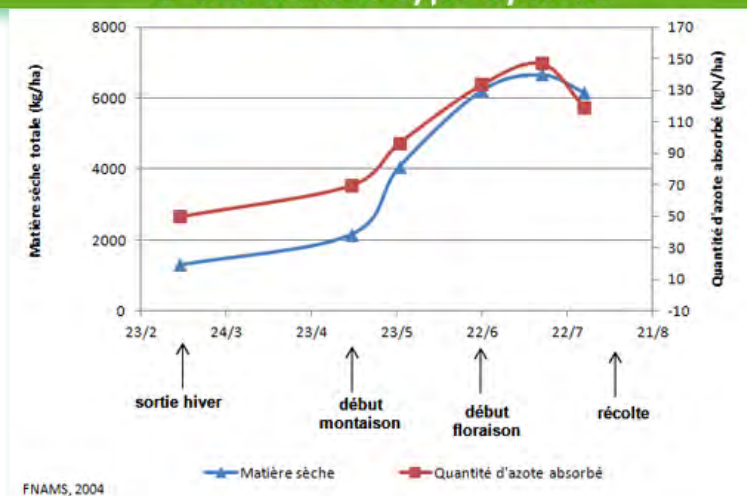
# OIGNON PORTE-GRAINE

## Caractéristiques générales

L'oignon porte-graine, cultivé en France sur 2150 ha (GNIS, 2011), est une plante bisannuelle. En zone sud, les plantations sont systématiquement réalisées à l'automne (avant le 15 novembre). En zone nord, la majorité des plantations est réalisée au printemps (février - mars) mais les plantations d'hiver (septembre - octobre) sont possibles. Pour les plantations d'automne, la récolte a lieu fin juillet-début août de l'année suivante et pour les plantations de printemps, la récolte est réalisée au cours du mois d'août de la même année. Les bassins de production de cette culture sont le sud-ouest du bassin parisien, le centre-ouest, le sud-ouest et le sud-est.

L'oignon porte-graine, comme l'ensemble des cultures potagères porte-graine, s'intègre dans des systèmes de grandes cultures et contribue à sécuriser les approvisionnements de semences en France et pour le reste du monde, tant en quantité qu'en qualité. C'est une source de diversification intéressante pour les exploitations de polyculture dans les différents bassins de production.

### Dynamique de l'azote absorbé et de la production de matière sèche de l'oignon porte-graine, plantation d'automne d'une variété type hybride



Le bulbe d'oignon planté constitue une réserve en azote non négligeable d'environ 30 kg N/ha. La dynamique d'absorption de l'azote de l'oignon porte-graine se divise en 3 phases : (1) de la plantation jusqu'à la sortie de l'hiver - stade 7 feuilles : 2 mois pour une plantation de printemps ou 7 mois après une plantation d'automne), les besoins en azote de la culture progressent lentement, ensuite on note (2) une phase d'absorption intense entre début montaison et début floraison, au-delà (3) pendant la phase de floraison des ombelles et de remplissage des grains, la quantité d'azote absorbé augmente peu ou pas. La dynamique de production de la matière sèche est similaire à celle de la quantité d'azote absorbé.

## Éléments nécessaires au calcul de la dose d'azote prévisionnelle

En cultures porte-graine, les besoins en azote de la plante ne sont pas liés à l'objectif de rendement grainier qui est très variable (parfois quelques centaines voire quelques dizaines de kilogrammes à l'ha...). Il est établi néanmoins qu'une quantité optimale d'azote est nécessaire pour obtenir le potentiel de rendement grainier.

Les besoins en azote de l'oignon porte-graine - **plantation automne** ont été évalués, selon les références expérimentales obtenues, à **150 kg d'N/ha**.

Les besoins en azote de l'oignon porte-graine - **plantation printemps** ont été évalués, selon les références expérimentales obtenues, à **70 kg d'N/ha**.

La durée du cycle plus longue d'une plantation d'automne favorise une production de biomasse plus importante, ceci explique pourquoi les besoins de la culture sont supérieurs à ceux enregistrés pour une plantation de printemps.

## Équation du bilan utilisée

Un outil de pilotage, basé sur la méthode du bilan azoté et tenant compte des caractéristiques des cultures porte-graine (notamment les besoins), a été mis au point par la FNAMS et est à disposition des opérateurs de la filière semences (agriculteurs multiplicateurs et techniciens d'établissements semenciers). Cette feuille de calcul a été conçue en relation avec ARVALIS-Institut du végétal. Elle est mise à jour régulièrement et est enrichie des références des Chambres d'Agriculture notamment, concernant les teneurs en azote des fumures organiques. Pour plus d'information, envoyer un mail à : [fnams.brain@fnams.fr](mailto:fnams.brain@fnams.fr)

L'équation de la méthode du bilan utilisée en culture porte-graine est la suivante :

Besoins de la culture (kgN/ha)		Fournitures du sol (kgN/ha)				Dose d'azote à apporter (kg N/ha)
Besoins de la plante (*)	+ Azote non utilisable (**)	- Minéralisation des résidus de culture (**)	- Minéralisation de l'humus (**)	- Reliquat sortie hiver (***)	- Apports organiques (**)	

\* Valeur référencée par la FNAMS et consultable sur le site du [COMIFER](#)

\*\* Se référer aux postes du bilan détaillés sur le site du COMIFER

\*\*\* Valeur mesurée ou estimée (se renseigner auprès de la Chambre d'Agriculture)

## Pratiques de fertilisation

Pour couvrir les besoins en azote de l'oignon porte-graine tout au long du cycle cultural, le fractionnement de la dose d'azote minéral est recommandé :

### Pour une plantation d'automne

- 1<sup>er</sup> apport : sortie hiver (entre X/2 et X, X étant la quantité d'azote calculée par la méthode du bilan)
- 2<sup>ème</sup> apport : avant début montaison (entre 0 et X/2)

### Pour une plantation de printemps

- 1<sup>er</sup> apport : plantation (X/2, X étant la quantité d'azote calculée par la méthode du bilan)
- 2<sup>ème</sup> apport : avant début montaison (X/2)

## Outil de pilotage : ajustement en cours de culture

Pas d'information

### Contributeur

**Fédération Nationale des Agriculteurs Multiplicateurs de Semences**

### Liens utile

[www.fnams.fr](http://www.fnams.fr)

Toutes les fiches sont téléchargeables sur [www.comifer.asso.fr](http://www.comifer.asso.fr)

## POIS POTAGER (Pisum sativum)

### Caractéristiques générales

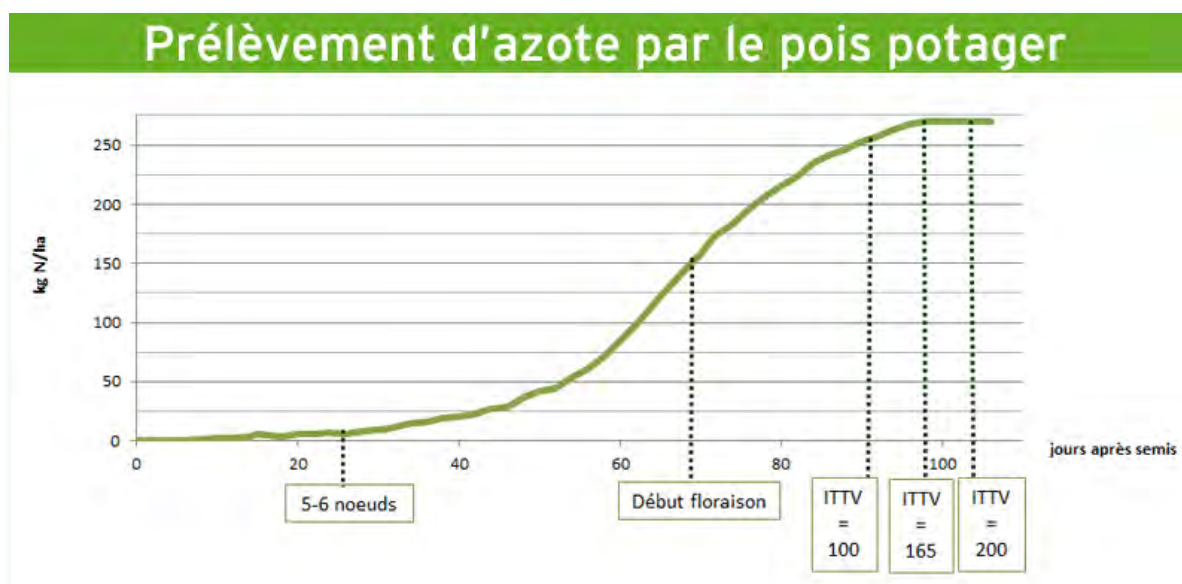
- 25 000 ha de petits pois sont cultivés pour l'industrie en France dont 15 000 ha en Nord Picardie Centre, 8 000 ha en Bretagne, et 2 000 hectares dans le Sud Ouest (source : CENALDI, moyenne 2005- 2010) auxquels viennent s'ajouter en Flandre 5 à 10 000 ha à destination des industries Belges. Les exploitations sont de type grandes cultures ou polyculture élevage. Les parcelles de production répondent à une sélection rigoureuse (propres, homogènes, sans cailloux).

- **Assurer la régularité de l'approvisionnement** industriel est un enjeu important. En effet, 175 000 tonnes de petit pois par an sont livrées à l'industrie française. L'autre enjeu est de limiter les problèmes sanitaires qui comme le mildiou, le botrytis et le sclérotinia sont favorisés par les excès de végétation et donc d'azote et augmentent la présence de grains tachés.

- Le cycle du pois potager est de 70 à 110 jours. Le semis s'échelonne de Février à Mai et les récoltes se déroulent entre fin Mai et fin Juillet. Le petit pois est fréquemment suivi d'une culture dérobée ou d'une céréale.

- Après une phase d'implantation assez longue dépendante des températures, l'assimilation s'intensifie pendant la mise en place des étages florifères. Elle atteint 8 kg/ha/j. La croissance se poursuit tout au long du remplissage des gousses. Lorsque les grains atteignent leur taille finale et commencent à durcir, les mobilisations d'azote ralentissent.

La tendreté des grains (ITTV) est un indicateur objectif de récolte (équilibre sucre/amidon).



## Éléments nécessaires au calcul de la dose d'azote prévisionnelle

Le rendement varie en fonction de la variété (précocité, type de grains) et de la maturité des graines (mesure tendérométrique : 100-200). Les rendements de petits pois sont en moyenne de 7 tonnes brut/ha récolté machine (fourchette comprise entre 5 et 10t/ha). Le taux de récolte est en moyenne de 85%.

Les besoins sont estimés **forfaitairement, à 270 kg d'N/ha.**

Les bactéries fixatrices sont naturellement présentes dans les sols français. En conditions propices au fonctionnement des nodosités, la fixation est capable de couvrir 75% des besoins azotés (200kg N/ha).

En conditions de surfertilisation azotée, on observe une consommation de luxe (+30 kg/ha en moyenne) et une réduction de la part symbiotique.

### Devenir de l'azote après récolte

Les quantités d'azote restituées à la récolte peuvent être relativement importantes, il est donc nécessaire d'en tenir compte pour la gestion de l'azote en post-récolte :

- Dans le bilan prévisionnel de la culture qui suit immédiatement la culture de pois, La minéralisation à court terme des résidus de récolte (Mr) apportera 40 à 65 kg N/ha.
- Si aucune culture n'est prévue, l'implantation d'une culture CIPAN est recommandée.

## Pratiques de fertilisation

**Aucun apport d'azote** n'est nécessaire sur pois potager.

Certaines situations particulières peuvent justifier une fertilisation :

- Conditions de levée difficiles (semis précoces, terres froides)
- Variétés courtes (il faut favoriser l'élongation des entrenœuds pour la récolte machine)
- Parasitisme conduisant à une absence de nodulation (maladies telluriques, larves de sitones...)

Dans ces situations, l'apport est plafonné à **50 kg d'N/ha**

### Contributeur

UNILET

### Liens utile

[www.unilet.fr](http://www.unilet.fr)

Toutes les fiches sont téléchargeables sur [www.comifer.asso.fr](http://www.comifer.asso.fr)



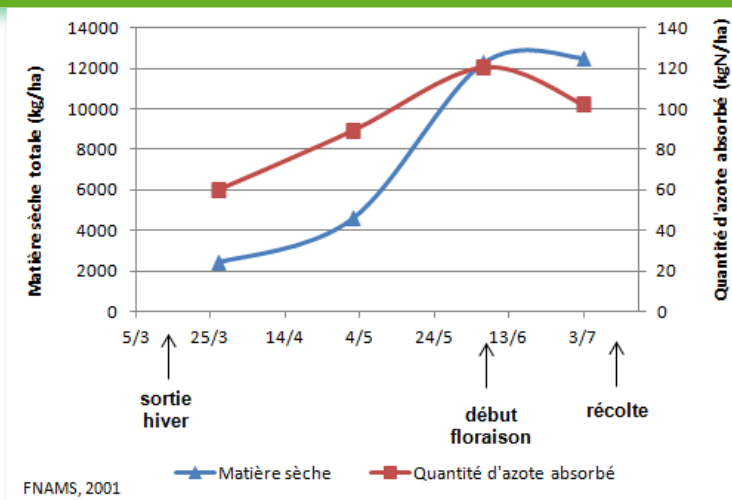
## RAY-GRASS ANGLAIS PORTE-GRAINE

### Caractéristiques générales

Le ray-grass anglais (RGA) porte-graine, cultivé en France sur 3445 ha (source GNIS, 2011), est une plante pérenne (1 à 2 récoltes). Cette culture est, en règle générale, implantée en sol nu à la fin de l'été. Des semis de printemps sous couvert de blé tendre sont réalisés depuis quelques années dans certaines régions comme la Picardie. Selon la gamme de précocité et les régions de production, la récolte est effectuée entre début juillet et fin août. Les bassins de production de cette culture sont la Champagne, la Picardie, le centre-ouest et la bordure est de la Normandie.

Le ray-grass anglais, comme l'ensemble des cultures fourragères porte-graine, s'intègre dans des systèmes de grandes cultures et contribue à sécuriser les approvisionnements de semences en France, tant en quantité qu'en qualité. C'est une source de diversification intéressante pour les exploitations de polyculture-élevage dans les différents bassins de production.

### Dynamique de la quantité d'azote absorbé et de la production de matière sèche du ray-grass anglais porte-graine



La dynamique d'absorption de l'azote du ray-grass anglais porte-graine se divise en 3 phases: (1) du semis jusqu'à la sortie d'hiver (fin février - début mars), les besoins en azote de la culture sont peu importants, ensuite on note (2) une phase d'absorption intense entre début montaison et pleine floraison, au-delà (3) en post-floraison, l'absorption en azote redevient faible. La dynamique de production de la matière sèche est similaire à celle de la quantité d'azote absorbé.

### Éléments nécessaires au calcul de la dose d'azote prévisionnelle

En cultures porte-graine, les besoins en azote de la plante ne sont pas liés à l'objectif de rendement grainier qui est très variable (parfois quelques centaines, voire quelques dizaines de kilogrammes à l'ha...). Il est établi néanmoins qu'une quantité optimale d'azote est nécessaire pour obtenir le potentiel de rendement grainier.

Les besoins en azote du ray-grass anglais porte-graine ont été évalués, selon les références expérimentales obtenues, à 170 kg N/ha.

# Calcul de la fertilisation azotée

Les productions éventuelles de fourrages, effectuées soit en précoupe, soit en repousse d'automne, ne sont pas prises en compte dans le calcul du bilan azoté : les besoins rapportés ici concernent exclusivement le cycle grainier.

## Équation du bilan utilisée

Un outil de pilotage, basé sur la méthode du bilan azoté et tenant compte des caractéristiques des cultures porte-graine (notamment les besoins), a été mis au point par la FNAMS et est à disposition des opérateurs de la filière semences (agriculteurs multiplicateurs et techniciens d'établissements semenciers). Cette feuille de calcul a été conçue en relation avec ARVALIS-Institut du végétal. Elle est mise à jour régulièrement et est enrichie des références des Chambres d'Agriculture notamment, concernant les teneurs en azote des fumures organiques. Pour plus d'information, envoyer un mail à : [fnams.brain@fnams.fr](mailto:fnams.brain@fnams.fr)

L'équation de la méthode du bilan utilisée en culture porte-graine est la suivante :

Besoins de la culture (kgN/ha)		Fournitures du sol (kgN/ha)				Dose d'azote à apporter (kg N/ha)
Besoins de la plante (*)	+ Azote non utilisable (**)	- Minéralisation des résidus de culture (**)	- Minéralisation de l'humus (**)	- Reliquat sortie hiver (***)	- Apports organiques (**)	

\* Valeur référencée par la FNAMS et consultable sur le site du [COMIFER](#)

\*\* Se référer aux postes du bilan détaillés sur le site du COMIFER

\*\*\* Valeur mesurée ou estimée (se renseigner auprès de la Chambre d'Agriculture)

## Pratiques de fertilisation

Pour couvrir les besoins en azote du RGA porte-graine tout au long du cycle cultural, le fractionnement de la dose d'azote minéral est recommandé.

Entre début montaison (courant mars) et floraison (courant juin), réaliser 2 apports d'azote minéral est un minimum à respecter, mais le fractionnement en 3 apports apparaît comme la stratégie idéale pour mettre l'azote à disposition de la plante quand elle en a réellement besoin.

## Outil de pilotage : ajustement en cours de culture

Pas d'information

## Remarques diverses

Le RGA porte-graine ne semble pas particulièrement affecté par une déficience du sol en oligo-éléments. Mais comme pour les autres cultures, une parcelle présentant de fortes carences en éléments comme le cuivre, le fer, le zinc, le soufre ou la magnésie doit être corrigée.

(source : RGA porte-graine : techniques culturales FNAMS, 1998).

## Contributeur

Fédération Nationale des Agriculteurs Multiplicateurs de Semences

## Liens utile

[www.fnams.fr](http://www.fnams.fr)

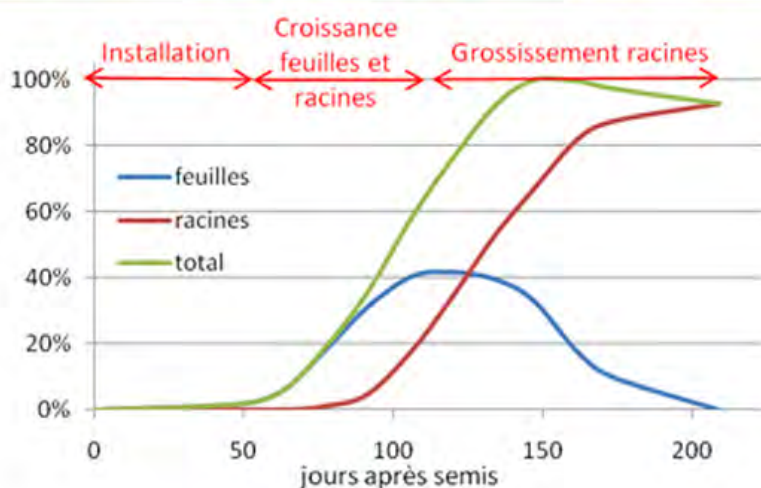
Toutes les fiches sont téléchargeables sur [www.comifer.asso.fr](http://www.comifer.asso.fr)

## SALSIFIS/SCORSONERE (*Tragopogon porrifolius*/ *Scorzonera hispanica*)

### Caractéristiques générales

- 700 ha de salsifis sont cultivés pour l'industrie en France dont 70 % en Nord Picardie (source : CENALDI, moyenne 2006- 2010). La production est destinée à la conserve et au surgelé. Les exploitations sont de type grandes cultures ou polyculture élevage. Les parcelles de production répondent à une sélection rigoureuse (sols sableux ou sablo-limoneux, profonds, homogènes, sans cailloux...).
- **Assurer la régularité de l'approvisionnement** industriel est un enjeu important. En effet, 21 000 tonnes de salsifis par an sont livrées à l'industrie française. L'enjeu qualitatif est d'assurer une croissance régulière de la culture, permettant un développement harmonieux des racines.
- Le cycle du salsifis dure de 8 à 10 mois. Le semis a lieu en avril et les récoltes s'échelonnent de novembre à février de l'année suivante.
- La mobilisation de l'azote est maximale durant la phase de développement du feuillage (entre août et septembre). A cette période, une alimentation non limitante en éléments minéraux comme en eau est décisive pour assurer le potentiel racinaire. Par la suite, le grossissement des racines se poursuit tandis que le feuillage se dégrade progressivement. Les prélèvements sont alors en diminution du fait de la dégradation progressive du feuillage et du transfert de l'azote des feuilles vers les racines.

### Prélèvement d'azote par la scorsonère



### Éléments nécessaires au calcul de la dose d'azote prévisionnelle

Le rendement moyen machine est de 28 tonnes de racines/ha (Source : CENALDI, moyenne 2006-2010), avec un taux de récolte de 60 à 70 %.

Certaines parcelles peuvent néanmoins atteindre des rendements machine de 35 tonnes de racines/ha.

Les besoins sont estimés **forfaitairement à 260 kg d'N/ha.**

## Équation du bilan utilisée

La culture ne couvre le sol qu'au bout de 2 à 2,5 mois.

Le salsifis est normalement récolté à maturité physiologique, après les premiers gels.

Les cultures sont systématiquement irriguées : l'irrigation est indispensable dans les zones sableuses avec une pluviométrie irrégulière l'été.

Le bilan s'ouvre au semis et se ferme à la récolte.

L'équation du bilan de masse est utilisée avec les paramètres suivants :

- Le reliquat **Ri** se mesure sur les horizons 0-30 cm et 30-60 cm.
- **Pi** = 0
- **Rf** (N inextractible sur les horizons 0-30 cm et 30-60 cm) = 15 à 20 unités en sols sableux ou sablo-limoneux

## Pratiques de fertilisation et recommandations

Vu la longueur du cycle et le niveau des besoins immédiats, le fractionnement des apports d'azote est recommandé :

- 1 apport au stade 3-4 feuilles
- 1 apport complémentaire 3 à 4 semaines plus tard, avant le recouvrement du sol par la végétation.

Une grande partie des parcelles est soumise à un bilan azoté. En Nord - Pas-de-Calais - Picardie et dans le Centre, les logiciels AZOFERT ou AZOBIL sont régulièrement utilisés.

En l'absence de bilan azoté, les apports sont plafonnés à 220 kg d'N/ha.

### Contributeur

UNILET

### Liens utile

[www.unilet.fr](http://www.unilet.fr)

Toutes les fiches sont téléchargeables sur [www.comifer.asso.fr](http://www.comifer.asso.fr)

# TABAC

## Caractéristiques générales

En 2011, il y avait environ 6000 ha plantés répartis sur les 7 coopératives françaises de producteurs de tabac qui se réunissent elles mêmes en une union des coopératives (voir ci-dessous carte de la production de tabac en France avec les coopératives). Les bassins de production sont rattachés aux coopératives. En 2011, 49 départements étaient concernés par la production en France métropolitaine.

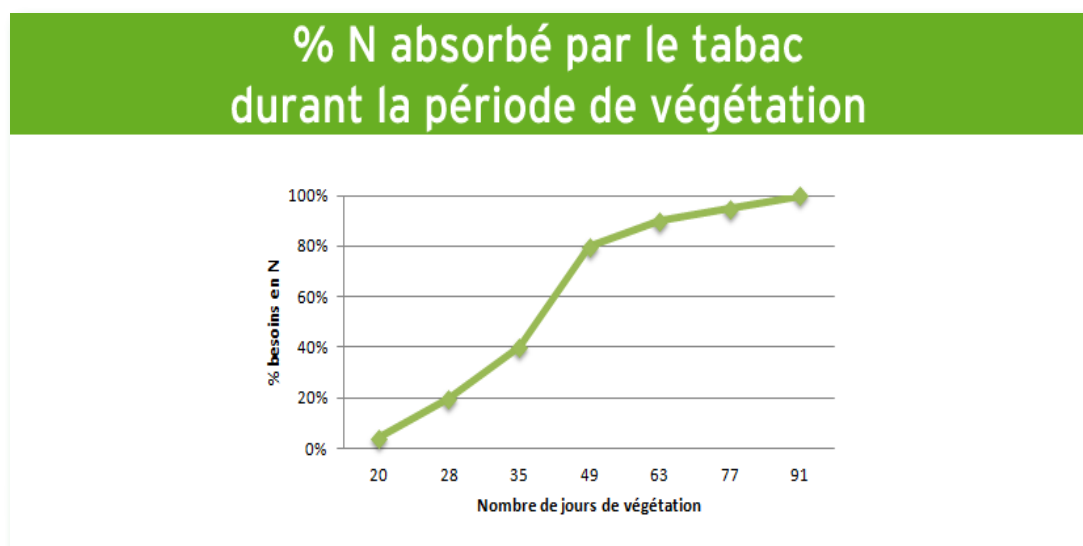


- Le tabac est une plante sarclée issue de minuscules graines qui sont très souvent enrobées afin de faciliter leur semis en pépinière. Le semis et l'élevage des plants se font sous serre au printemps (à partir de début mars). Les plants sont transplantés au champ, 2 mois après leur élevage en flottaison en pépinière (semis flottant pour la plupart - avec des plateaux de polystyrène remplis de terreau et mis à flotter dans des bacs). Les plantations s'effectuent à partir de la mi-mai.

- La durée de végétation au champ est de **90 à 150 jours** selon les types de tabac et leur mode de séchage. Le tabac Burley est récolté plante entière (en tiges) au bout de 90-110 jours de végétation et séché pendant 2 mois dans des séchoirs, à l'air libre. Le tabac Virginie est récolté en feuilles en 4 passages au moins, en fonction de la maturité des feuilles et séché dans des fours pendant une semaine pour chaque fournée. La durée de végétation de ce type de tabac peut aller de 100 à 150 jours au champ.

- Le tabac a de gros besoins en éléments fertilisants sur une période courte, **80% des besoins** doivent être satisfaits sur les 60 premiers jours d'un cycle végétatif moyen de 90-110 jours. Ce cycle végétatif du tabac jusqu'à la maturité est comparable à celui du maïs.

Le graphique ci-dessous donne l'absorption de l'azote par la plante durant la période de végétation :





# Calcul de la fertilisation azotée

Le tabac est une culture peu exigeante en  $P_2O_5$  et exigeante en  $K_2O$ . Le tableau ci-dessous donne les préconisations en unités fertilisantes (hors azote) pour les 2 types de tabac les plus cultivés en France.

Unités fertilisantes par tonne de tabac		VIRGINIE	BURLEY	
			Récolte en tiges <sup>(2)</sup>	Récolte en feuilles
$P_2O_5$	Besoins /T de rendements <sup>(1)</sup>	9	8	8
$K_2O$	Besoins /T de rendements <sup>(1)</sup>	50	90	90
MgO	Besoins /T de rendements <sup>(1)</sup>	11	30	20

<sup>(1)</sup> : rendement exprimé en quantité de feuilles après séchage et à humidité de livraison

<sup>(2)</sup> : si tiges non restituées à la parcelle après effeuillage

## Éléments nécessaires au calcul de la dose d'azote prévisionnelle

- Les rendements en feuilles de tabac après séchage sont de 2800 à 3000 Kg/ha
- Les besoins en azote sont les suivants : 30 kgN/ha par tonne de feuilles sèches produites pour le tabac type VIRGINIE et 85kgN/ha par tonne de feuilles produites pour le tabac type BURLEY
- La quantité d'azote déjà absorbé,  $P_i = 0$
- Les reliquats post-récolte (Rf) réalisés sur 60 cm montrent que la culture de tabac laisse 50 unités d'azote/ha sous formes nitrique et ammoniacale.

## Équation du bilan utilisée

L'équation du bilan de masse est utilisée en France, le tabac explore le sol jusqu'à 60 cm. Le bilan s'ouvre à la plantation (mi-mai), la mesure du reliquat azoté (Ri) est réalisée à partir de mi-avril et se mesure sur 60 cm de profondeur. La fermeture du bilan correspond à la fin d'absorption d'azote par le tabac que l'on situe fin août à mi septembre selon la date plantation.

## Pratiques de fertilisation

La fumure du tabac s'applique soit en totalité soit en fractionnée surtout pour les tabacs séchés à l'air naturel (Brun et Burley) : 2/3 à la plantation et 1/3 en localisé au binage environ 3 semaines après. La ferti-irrigation est utilisée afin de réduire les apports tout en les adaptant au mieux au cycle végétatif de la culture.

L'ammonitrate reste la forme d'engrais la plus utilisée pour les apports d'azote.

Il est recommandé de privilégier les formes nitriques :

- sur terrains froids,
- derrière un retournement de prairie (pour éviter les intoxications ammoniacales)
- et pour les apports tardifs dans la période de culture.

## Outils de pilotage : ajustement en cours de culture

En cours de culture, les ajustements se font en fonction des signes visuels de carence constatés au champ. Les photographies des carences existantes sont exploitées et les ajustements se font de façon progressive par pulvérisations foliaires ou par « fertigation » de petites quantités de l'élément nutritif concerné. Les carences souvent constatées sur le tabac sont : les carences en azote, en potassium et en magnésium.

Pour préciser la nature des carences, un descriptif illustré élaboré en collaboration avec l'INRA, est disponible sur le [www.anitta.fr](http://www.anitta.fr).

Pour affiner le diagnostic et y apporter des solutions, il est recommandé au producteur de contacter son technicien.

## Remarques diverses

Le tabac est sensible aux chlorures qui pénalisent sa combustibilité et son goût au fumage. Il est donc préconisé d'apporter des engrais pauvres en cet élément.

La plante est un bon extracteur en éléments traces métalliques (ETM), notamment le Cadmium. Il est préconisé d'apporter des fertilisants pauvres en ETM. L'épandage des boues d'épuration est à proscrire sur les terres concernées par une rotation avec la culture du tabac.

## Contributeur

**INRA**  
**ANITTA**

## Liens utile

[www.inra.fr](http://www.inra.fr)  
[www.anitta.fr](http://www.anitta.fr)

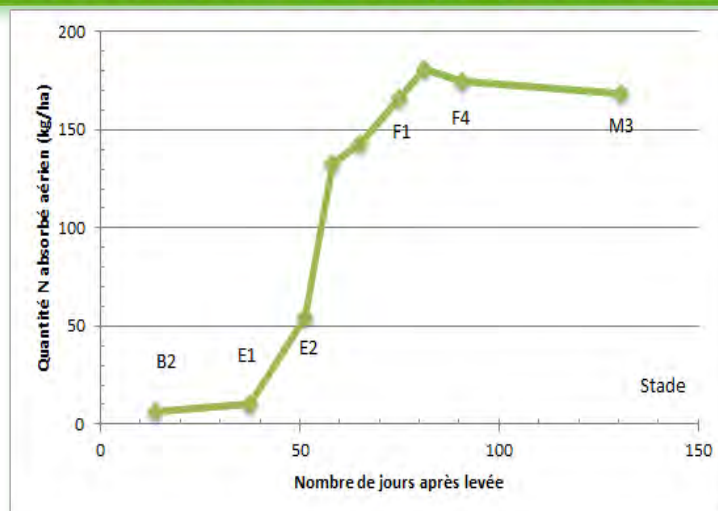
Toutes les fiches sont téléchargeables sur [www.comifer.asso.fr](http://www.comifer.asso.fr)

## TOURNESOL

### Caractéristiques générales

- En 2011, le tournesol occupait 738 000 ha en France pour une production de 1 935 000 tonnes. Les principales régions productrices sont les suivantes par ordre décroissant de surface : Midi-Pyrénées, Poitou-Charentes, Centre et Aquitaine.
- La graine de tournesol contient de l'ordre de 50 à 55 % d'huile (sur graines entières propres et sèches). L'huile constitue la principale valorisation de la graine de tournesol. Elle est principalement utilisée en alimentation humaine.
- Le semis est généralement réalisé de début avril à mi-mai et les récoltes de fin août à fin septembre. La période d'ouverture du bilan prévisionnel va du semis jusqu'à la récolte. Les apports de fertilisation azotée interviennent au moment du semis dans la moitié des cas ou en végétation dans l'autre moitié.
- Selon les milieux et les systèmes de culture, le besoin en fertilisation azotée du tournesol varie de 0 à environ 100 kg d'N/ha.
- Le tournesol doit pouvoir absorber de l'ordre de 150 kg d'N/ha (plante entière) pour que l'azote ne limite pas l'élaboration du rendement.

### Prélèvement d'azote par le tournesol



### Éléments nécessaires au calcul de la dose d'azote prévisionnelle

- Sur la période 2001 à 2010, le rendement national moyen a varié de 22 (2001 et 2003) à plus de 26 q/ha (2007).
- Les **besoins en azote du tournesol** par unité de production sont de **4,5 kg d'N/q** (source : Héliotest, CETIOM, 2012).
- La quantité d'azote minéral dans le sol à la fermeture du bilan (**Rf**) est de **20 à 40 kg d'N/ha**. Rf est estimé à la fin d'absorption de l'azote par la culture.
- La quantité d'azote absorbé par la culture à l'ouverture du bilan (**Pi**) est de **0 kg d'N/ha**.
- La fourniture d'azote par le sol (**PO**) est de **60 à plus de 200 kg d'N/ha** selon les milieux (rarement moins de 90 kg d'N/ha).

## Équation du bilan utilisée

L'équation du bilan de masse et l'équation d'efficience avec le CAU sont paramétrées en France. L'équation utilisée dépend de la région, des types de sol et des outils utilisés. (selon les disponibilités de références régionales).

**Bilan de masse** : le tournesol peut s'enraciner profondément si les conditions de croissance et la profondeur du sol le permettent (jusqu'à plus de 120 cm). En revanche, son système racinaire est très sensible à la structure du sol.

Dès lors que la fertilisation azotée est bien ajustée au besoin de la culture, le reliquat d'azote minéral du sol à la récolte du tournesol est très faible compte tenu de la capacité de la culture à « vider » le sol de son eau et de son azote : de l'ordre de 10 unités par couche de sol de 30 cm colonisée par les racines (Reau et al., 1997).

La quantité d'azote minéral dans le sol à l'ouverture du bilan est un paramètre très variable en raison de la diversité des sols, des cultures précédentes (nature, adéquation du rendement et de la fertilisation) des apports de produits organiques et de la gestion de l'interculture. Le tournesol est le plus souvent précédé par une céréale à paille récoltée l'été précédent son implantation. Sauf dérogation, il est donc nécessaire d'implanter une culture intermédiaire piège à nitrate dans les zones vulnérables.

**Méthode CAU** : le tournesol a une forte aptitude à extraire l'azote du sol (probablement supérieure à celle de la plupart des autres cultures) que ce soit en termes de profondeur ou de teneur en azote résiduelle dans le sol. Les postes de fourniture d'azote à la culture par le sol sont donc souvent sous-estimés.

Le coefficient apparent d'utilisation (CAU) de l'azote du tournesol est en moyenne de 0.8 (Reau et al., 1997 ; Wagner et al., 2002 ; Champolivier et al., 2002). Cette moyenne recouvre une forte variabilité. Dans les situations particulières, il est préférable de constituer un référentiel spécifique pour ajuster ce CAU aux conditions.

Le tournesol sans apport d'azote est souvent capable d'extraire au moins 90 kg d'N/ha du sol pendant son cycle, quelles que soient les conditions de cultures.

La méthode Héliotest propose un indicateur précoce de cette disponibilité en azote du sol en début de cycle : il s'agit du stade d'apparition d'une différence visuelle entre une bande de parcelle fertilisée au semis (60 à 80 kg d'N/ha) et le reste de la parcelle n'ayant pas reçu cet apport (Wagner et al, 2002). Les hypothèses sous-jacentes sont les suivantes :

- l'apparition d'une différence visuelle traduit un état de carence azotée sur la partie non fertilisée ;
- plus cette différence visuelle apparaît tôt, plus la carence est intense ; cela se traduit par une relation positive entre le stade et l'INN au stade « 12 feuilles » ; si la différence visuelle apparaît après le stade « 14 feuilles », elle n'a pas de conséquence sur le rendement ;
- l'intensité de la carence au stade « 12 feuilles » sur le témoin sans apport d'azote est un indicateur fiable des fournitures du sol.

Il convient de prendre quelques précautions pour la détermination au champ de la fourniture d'azote par le sol (PO). Si la culture est capable de poursuivre l'absorption d'azote jusqu'à maturité physiologique dans certaines conditions, il est fréquent que la quantité d'azote mesurée dans les plantes à maturité soit inférieure à celle mesurée au stade MO (chute des fleurs ligulées). L'origine de cette diminution en fin de cycle n'est pas clairement identifiée. Il est possible que la fragilisation des feuilles les plus âgées (base de la tige) dû à leur dessèchement en fin de cycle (ces feuilles restent toutefois accrochées à la tige) soit l'une des causes de ces pertes si des précautions toutes particulières ne sont pas prises lors du prélèvement pour les collecter. Compte tenu de ce comportement, il est recommandé de réaliser les prélèvements au stade MO, stade où le maximum de présence d'azote dans les organes en place est le plus fréquemment observé.

## Pratiques de fertilisation

En 2011, à l'échelle de la France, 25% des surfaces en tournesol recevaient des apports réguliers de matières organiques (17% en 2009, 20% en 2006) : de 15-16% dans le Sud et en Bourgogne à 36-44% en Poitou-Charentes et Rhône-Alpes. Cette année-là, 19% en avait reçu dans l'interculture précédent le tournesol.

Une majorité des parcelles (74%) ont reçu de l'azote sous forme minérale : c'est la pratique la plus courante dans toutes les régions. La fréquence d'impassse totale d'azote, estimée à 16% des surfaces, est stable depuis plusieurs années.

Lorsqu'il y a apport d'engrais minéral, la quantité d'azote apporté est en moyenne de 56 unités (au semis ou en végétation). On observe peu de variabilité selon les régions et les types de sol. Quand il y a eu 2 apports (semis + végétation ; moins de 10 % des situations), la dose moyenne apportée est plus élevée : 79 unités.

Sources : enquêtes postales conduites par le CETIOM, 2011

## Conseil du CETIOM

Compte tenu des doses relativement faibles conseillées (de 0 à 100 kg d'N/ha), celles-ci peuvent être amenées en une fois, de préférence en végétation (des stades 6 feuilles à 14 feuilles). Ces apports en végétation permettent de synchroniser la disponibilité de l'azote apporté par l'engrais avec la période de besoin maximum de la culture et de mettre en œuvre la technique de la bande azotée (Héliotest).

Une grille très simplifiée de calcul de dose est également proposée par le CETIOM (brochure tournesol du CETIOM)

## Outils de pilotage

Le CETIOM propose la méthode Héliotest qui est une combinaison d'outil prévisionnel et de pilotage.

## Contributeur

**CETIOM**

## Liens utile

[www.cetiom.fr](http://www.cetiom.fr)

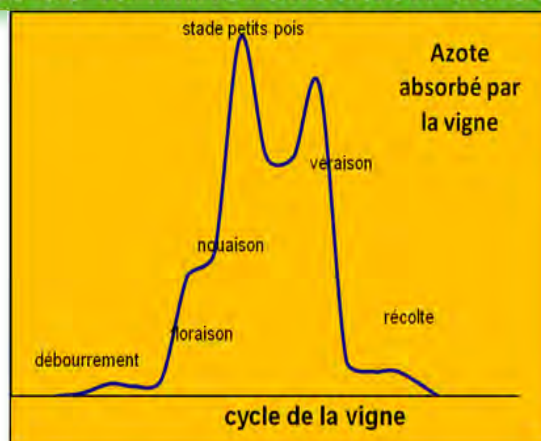
Toutes les fiches sont téléchargeables sur [www.comifer.asso.fr](http://www.comifer.asso.fr)

## VIGNE

### Caractéristiques générales

- La vigne est cultivée dans différentes régions du fait de sa grande adaptabilité aux conditions pédoclimatiques. On peut distinguer schématiquement trois zones. Une zone à climat continental incluant les vignobles alsacien, champenois, bourguignon et beaujolais. Une zone à climat atlantique avec le Bordelais, le Sud-Ouest, le Cognac et la vallée de la Loire. Et enfin, les vignobles à climat méditerranéen qui sont la Vallée du Rhône, le Languedoc-Roussillon, la Provence et la Corse. Le raisin de table est principalement produit en Provence et dans le Sud-Ouest.
- La vigne débourre en mars-avril (fonction du cépage et des conditions climatiques), avec une floraison en mai-juin et des vendanges entre août et octobre.
- L'azote est l'élément auquel la vigne est le plus sensible. Un excès provoque une vigueur exacerbée, des problèmes de rendement trop important et une qualité des raisins dépréciée (moins bonne maturité, pourriture). Une carence induit des problèmes de rendement trop faible et une fermentescibilité des moûts plus faible (risque d'apparition de mauvais goûts).
- Du débourrement au stade floraison, l'azote nécessaire à la pousse végétative est fourni, en grande partie, par les réserves contenues dans les structures pérennes (tronc et racines) et accumulées à la fin du cycle végétatif précédent. Les stades floraison-nouaison constituent un pic important d'absorption. Le début de la véraison également, mais à un moindre niveau.
- L'azote des feuilles est le résultat de l'absorption et de la croissance de la plante durant la première partie du cycle végétatif. L'azote des baies est principalement le résultat de l'absorption d'azote durant la phase estivale.

### Dynamique de nutrition de la vigne et de la minéralisation du sol



(Fiche 5 Groupe national fertilisation de la vigne)

### Éléments nécessaires au calcul de la dose d'azote prévisionnelle

Les besoins en azote de la vigne sont modestes car les exportations (baies ou grappes) sont faibles. Ces besoins se situent autour de **30 à 60 kg/ha** pour des productions de 6 à 10 t/ha et jusqu'à **60 à 90 kg/ha** pour des productions de 10 à 25 t/ha. Ils peuvent être satisfaits, tout au moins en partie, par l'azote fourni par la minéralisation de la matière organique du sol. C'est la principale source d'alimentation pour la plante, elle dépend des conditions climatiques (température et humidité) et du type de sol (taux d'argile et de calcaire, pH).



Toutefois, la teneur en matière organique des sols de vignoble diminue depuis de longues années, sauf dans les cas d'enherbement ou de restitution au sol des bois de taille.

La gestion de la fertilisation azotée doit également se réfléchir à partir des éléments suivants :

- Entretien du sol

L'enherbement va concurrencer la vigne au niveau des prélèvements d'azote. Il limite également la minéralisation en diminuant l'humidité du sol. Si ces effets sont souvent recherchés afin de diminuer la vigueur, son implantation, dans un objectif uniquement, par exemple, d'amélioration de la portance, peut nécessiter des apports azotés complémentaires, à la vigne ou au chai.

Le travail du sol peut favoriser la minéralisation et accélérer la mise à disposition de l'azote contenu dans la matière organique.

- Sensibilité à la pourriture grise : éviter les apports d'azote dans les parcelles sensibles.
- Les amendements organiques contiennent plus ou moins d'azote. Il convient d'en tenir compte dans le raisonnement.

L'azote jouant un effet important sur la plante du point de vue qualitatif, il convient de trouver le juste équilibre entre le développement optimal de la vigne et la qualité des raisins, en fonction de l'objectif produit que l'on vise.

## Équation du bilan utilisée

La méthode du bilan n'est pas encore adaptée sur la vigne, en raison notamment de sa pérennité et de la mise en réserves qui la caractérise. En effet le cycle de la vigne de l'année "n" est le résultat de 3 cycles imbriqués : n-1 pour les réserves, n pour l'en cours, n+1 car l'élaboration des primordia foliaires se fait en année "n" de mai à fin juillet.

## Pratiques de fertilisation

La gestion de la matière organique (MO) du sol est prioritaire. Si la minéralisation annuelle de la MO du sol ne suffit pas à couvrir les besoins de la vigne, des apports minéraux peuvent être envisagés. Par exemple en climat méditerranéen où le manque d'eau peut limiter la minéralisation, des apports spécifiques d'azote peuvent être nécessaires.

Les apports d'azote organique peuvent être réalisés soit dans le cadre de la nutrition azotée de la vigne (objectif engrais), soit, de façon indirecte, dans le cadre du maintien ou de l'augmentation du stock de matière organique (MO) du sol (objectif amendement). Dans ce dernier cas, les apports peuvent être relativement importants, cet entretien ou cette augmentation du taux de MO du sol étant réalisés tous les 3-4 ans, pour des questions pratiques (limitation du passage du tracteur, quantités, temps). Le cas particulier de l'apport d'amendement organique à la plantation est à prendre en considération (voir paragraphe Doses d'apport).

Dans le cas du raisin de table et compte tenu des niveaux de production qui peuvent être élevés, des apports limités d'engrais azotés peuvent se pratiquer jusqu'à la fermeture de la grappe.

## Époques d'apport

Pour que l'azote soit efficace, il doit être apporté de façon à ce qu'il soit disponible au niveau des racines de la vigne à partir de la floraison. Il convient donc, pour déterminer la période d'apport la plus adéquate, de prendre en compte plusieurs paramètres :

- La forme d'azote apporté : la plante n'absorbant l'azote que sous forme minérale, principalement sous forme nitrate, il faut prendre en compte les éventuelles étapes pour passer de la forme apportée à la forme minérale. C'est le cas notamment pour passer de la forme organique à la forme minérale.

- Les conditions climatiques : ces conditions vont influencer à deux niveaux. D'une part sur le développement des micro-organismes du sol, qui permettra entre autre la transformation de l'azote apporté vers la forme nitrate. D'autre part sur la migration de l'azote vers les racines, du fait des précipitations. La partie la plus importante du système racinaire de la vigne se situant vers 20-50 cm de profondeur (variable, en fonction notamment du mode d'entretien du sol) une certaine quantité de précipitations est nécessaire à la migration de l'azote à cette profondeur.
- Le type de sol : la vitesse de migration de l'azote en profondeur est également sous l'influence du type de sol. Elle sera plus rapide en sol sableux (moyenne 1,25 m/an) qu'en sol argileux (moyenne 0,6 m/an - Lacherez-Bastin, 2005). Champagnol (1984) donne comme ordre de grandeur de cette migration, 6,5 fois la hauteur de pluie pour un sol sableux et 2,5 pour un sol argileux.

En fonction de ces paramètres, l'apport d'azote peut varier de façon assez importante suivant la forme apportée et les conditions pédo-climatiques : courant d'hiver pour une forme organique, jusqu'en milieu-fin de printemps pour une forme nitrate sur sol léger et climat humide.

Un apport est également possible après vendanges (début d'automne). Cette pratique n'est pas ou peu utilisée en France actuellement, mais pourrait devenir intéressante dans le cas de millésimes secs où la mise en réserves de l'azote dans les parties pérennes de la vigne est rendue difficile durant l'été par la moindre minéralisation au niveau du sol, liée au manque d'eau. Cette technique demande tout de même à être étudiée (notamment concernant les quantités à épandre), de façon à ne pas perdre une partie de l'azote apportée par lixiviation.

## Doses d'apport

Les doses d'apport sont très variables en fonction du rendement visé, du type de sol et de l'entretien du sol. Sur vignes en production, les doses peuvent donc varier de 0 (en cas d'objectif faible rendement) à 90 kg N/ha (en cas d'objectif fort rendement).

La plantation est à considérer à part, l'objectif étant avant tout l'augmentation de la teneur en matière organique du sol. Les quantités d'azote mises en jeu, par l'apport d'amendement organique, peuvent alors être très importantes (150 à 250 kg N /ha pour un apport de 30 à 50 t de compost de fumier /ha, 500 à 550 kg N /ha pour un apport de 60 t de compost de déchets verts /ha par exemple). Ces apports sont fonction du taux initial de matière organique du sol, qui peut être très faible en vigne, d'où une diversité de pratique importante. Ces quantités d'azote organique parfois conséquentes ont toutefois un impact faible vis-à-vis des flux azotés perdus car les produits utilisés génèrent peu d'azote disponible et donc lixiviable.

Dans le cas du raisin de table, les apports d'azote se détermineront en fonction de l'objectif de rendement : de 30 à 50 kgN/ha pour des productions de 8 t/ha à 70-80 kgN/ha pour des productions de 25 à 30 t/ha

## Vignes enherbées

Sur vigne enherbée et en cas de nécessité, l'apport est à réaliser sur le rang. Dans les autres cas, il peut se faire sur toute la surface.

L'apport particulier d'azote pour la mise en place d'un enherbement, réalisé au début du printemps ou en début d'automne, est également à signaler. Cet azote est destiné à favoriser la pousse initiale du couvert herbacé et donc à être absorbé par ce couvert. Les quantités mises en jeu restent faibles (de l'ordre d'une trentaine de kg/ha).

## Apport par voie foliaire

Cet apport a pour objectif une augmentation de l'azote assimilable des moûts (pour une meilleure fermentescibilité de ces moûts) et une augmentation de l'expression aromatique de certains cépages blancs, riches en thiols variétaux. Cet apport vise donc à une amélioration qualitative du vin, une mauvaise fermentescibilité des moûts entraînant des problèmes de déviations métaboliques et l'apparition de mauvais goûts (réduction, acescence en particulier). Les apports foliaires sont réalisés aux environs de la véraison, soit, en fonction de la précocité des millésimes et en fonction des vignobles, entre la mi-juillet et fin septembre. Les quantités apportées varient entre 10 et 20 kg N/ha.

## Outils de pilotage : ajustement en cours de culture

L'observation est actuellement le préalable indispensable pour déterminer la nutrition azotée de la vigne, par l'intermédiaire de l'évaluation de la vigueur (en plus de la connaissance du potentiel de production). Le développement de la pourriture grise, le nombre de rognage, la couleur des feuilles, la grosseur des sarments, le niveau d'entassement du feuillage, l'importance des entre-cœurs peuvent être des indicateurs de la vigueur de la parcelle. Sauf cas de carence, la quantification et l'interprétation sont toutefois rendues délicates par le caractère subjectif de cette évaluation.

Il est donc nécessaire de réaliser des mesures : diamètre du sarment, poids moyen du sarment ou poids des pétioles. Ces mesures sont simples mais difficiles à systématiser. De plus, elles nécessitent des référentiels régionaux.

Les autres outils viennent en complément : analyse foliaire, analyse du moût, analyse de terre (taux de matière organique et C/N), capteurs optiques (indice chlorophyllien, fluorescence...).

## Remarques diverses

La vigne est sensible à la carence en potassium et à la carence en magnésium, avec un lien entre les deux du fait de l'antagonisme d'absorption K/Mg.

La chlorose ferrique peut également être un problème sur sol calcaire.

Elle est également sensible aux carences et toxicités en bore et en manganèse, aux toxicités en cuivre et aluminium (uniquement à la plantation).

En raisin de table, le dessèchement de la rafle (conséquence d'une sous nutrition magnésienne) demeure l'accident végétatif d'origine minérale le plus courant, mais le flétrissement des baies (ou fla) lié à une déficience potassique refait son apparition depuis quelques années.

Voir fiches fertilisation élaborées par le Groupe National Fertilisation de la vigne :

<http://www.vignevin.com/publications/brochures-techniques/fertilisation-de-la-vigne.html>

## Contributeur

**Institut Français de la Vigne et du vin**

**Bureau National Interprofessionnel du Cognac**

**Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes**

**Chambres d'Agriculture : Côte d'Or, Gard, Gironde, Hérault, Rhône, Pyrénées-Orientales, Saône-et-Loire, Vaucluse**

**Comité Interprofessionnel du Vin de Champagne**

**Domaine Expérimental La Tapy**

**Institut National de la Recherche Agronomique**

## Liens utile

[www.vignevin.com](http://www.vignevin.com)

[www.cognac.fr](http://www.cognac.fr)

[www.ctifl.fr](http://www.ctifl.fr)

[www.chambres-agriculture.fr](http://www.chambres-agriculture.fr)

[www.champagne.fr](http://www.champagne.fr)

[www.domainelatapy.com](http://www.domainelatapy.com)

[www.inra.fr](http://www.inra.fr)

Toutes les fiches sont téléchargeables sur [www.comifer.asso.fr](http://www.comifer.asso.fr)

## 2

**Glossaire****En cours de rédaction**

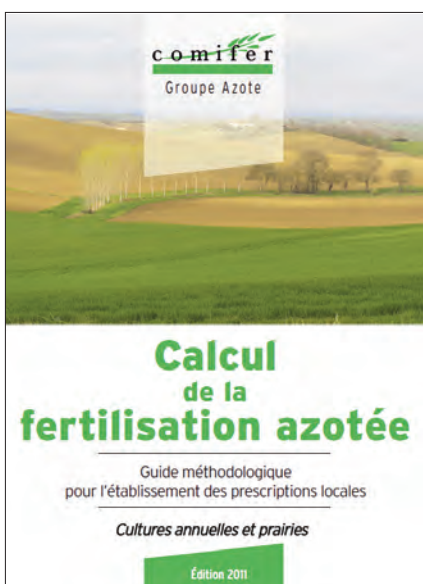
# Calcul de la fertilisation azotée

## Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales

---

Cultures annuelles et prairies

---



Le nouveau guide établissant les règles de calcul de la fertilisation azotée selon la méthode du bilan prévisionnel vient utilement actualiser la 1<sup>ère</sup> édition de 1996. Il est applicable aux cultures annuelles et aux prairies et sera complété avec des fiches par espèce téléchargeables sur le site du COMIFER.

Ce nouveau guide est utilisable dans tous les systèmes de production (raisonné, biologique, intégré...) parce qu'il appréhende toutes les sources d'azote possibles (azote issu de la fixation symbiotique chez les légumineuses, azote organique des cultures intermédiaires ou des résidus du précédent et azote minéral des engrais).

Ce guide COMIFER s'adresse aux agriculteurs et à tous les acteurs de la formation et du conseil.

Les prescripteurs peuvent décliner la méthode dans leur contexte régional ou selon les spécificités de certaines cultures. L'expérimentation doit toujours valider les paramètres et estimations nécessaires pour proposer un conseil opérationnel.

**CALCUL DE LA FERTILISATION AZOTÉE** - Mai 2013

ISBN 978-2-910393-09-0



9 782910 393090

Éditions **COMIFER**