



comifer

Groupe Azote



Calcul de la fertilisation azotée

Guide méthodologique
pour l'établissement des prescriptions locales

Cultures annuelles et prairies

Édition 2011

Calcul de la fertilisation azotée

Brochure éditée par le



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
Philippe DUGAST	GPN
Rémi DUVAL	Institut Technique de la Betterave
Philippe EVEILLARD	UNIFA
Julien GALLIENNE	APCA
Bernard GODDEN	Centre Wallon de Recherches Agronomiques
Olivier GOUJARD	K+S Kali France
Jean GRALL	Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne
Marc HERVÉ	K+S Nitrogen 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 Seine Maritime
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

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

¹ Comité français d'étude et de développement de la fertilisation raisonnée.

Sommaire

INTRODUCTION

Introduction au raisonnement de la fertilisation azotée9

PARTIE 1

Chapitre 1

Les flux d'azote dans un sol cultivé15

Chapitre 2

Le bilan de masse prévisionnel d'azote et ses adaptations21

Chapitre 3

La détermination des postes du bilan prévisionnel d'azote25

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

Les apports d'azote et les modalités d'application51

Chapitre 5 : Le fractionnement et les outils de pilotage

Le fractionnement et les outils de pilotage61

Chapitre 6 : Calcul d'un bilan prévisionnel sur prairie

Calcul d'un bilan prévisionnel sur prairie65

Chapitre 7

L'origine des références, une clarté nécessaire81

PARTIE 2

Glossaire85

Annexe 1 : Exemple d'une fiche de calcul du bilan prévisionnel d'azote87

Annexe 2 : Bilan dynamique et utilisations des jours normalisés89

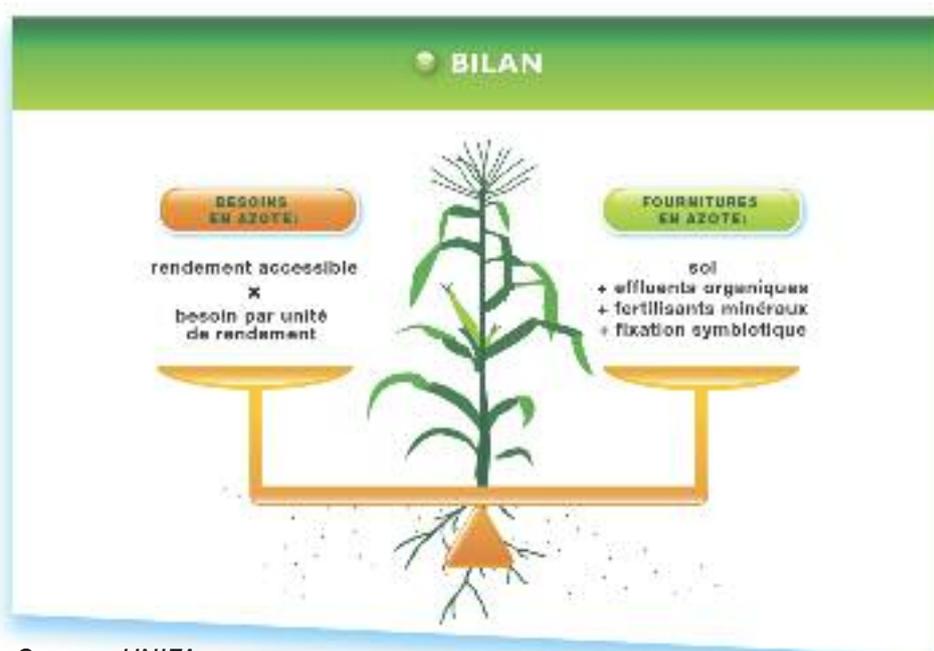


Introduction au raisonnement de la fertilisation azotée

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^{er} 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^{er} 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.

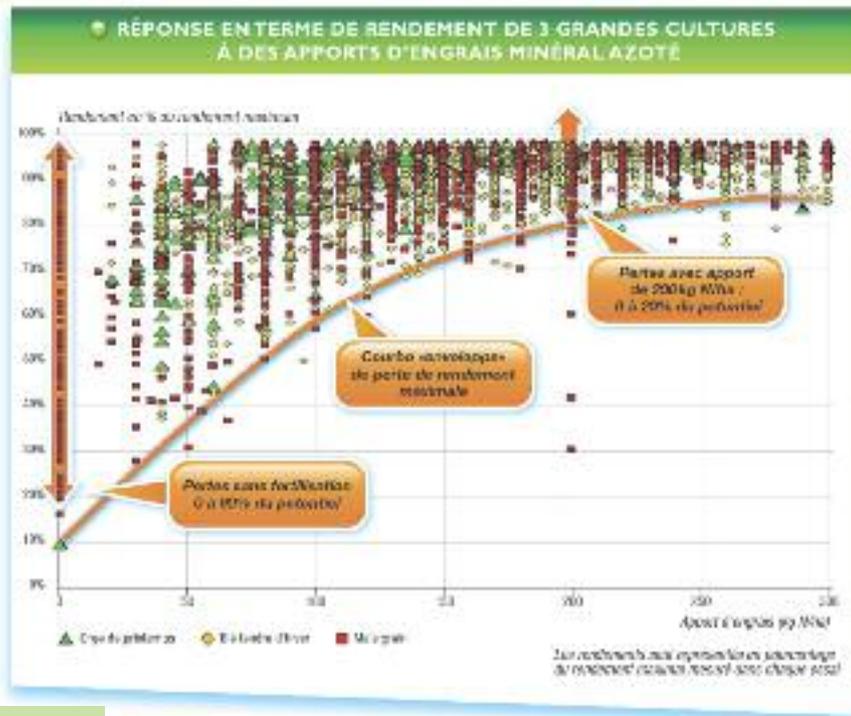


Figure 1

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.

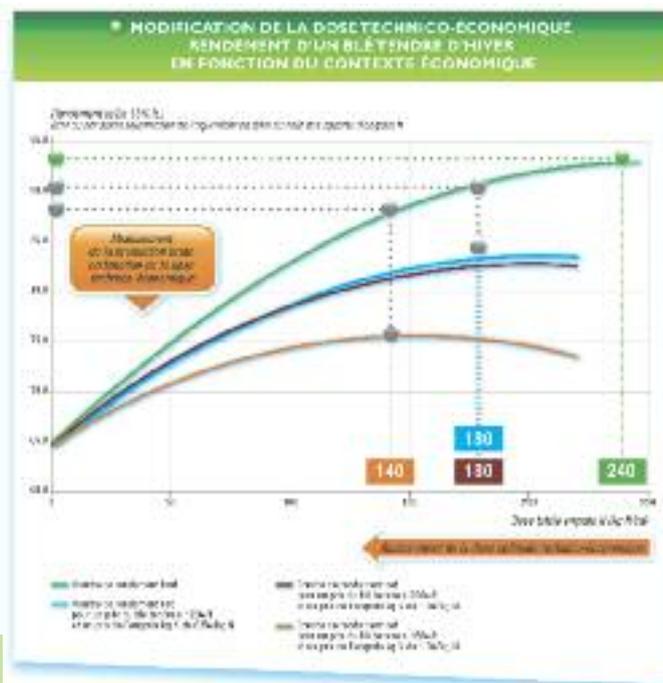


Figure 2

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 lixiviation¹ 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 1991² 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.

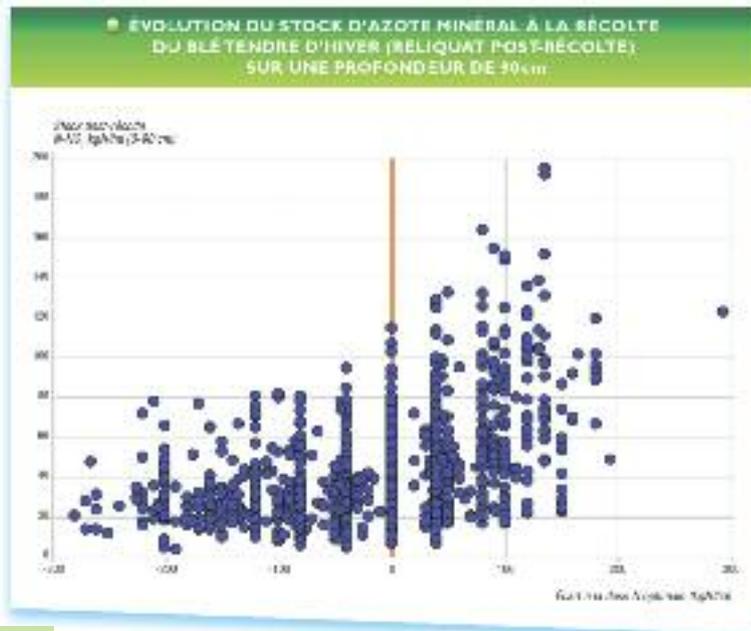


Figure 3

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'émission³ fixe aux états membres des objectifs de réduction des émissions de NH₃ 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.

¹ 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.

² 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.

³ 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 (NH_4^+), l'ion nitrite (NO_2^-) et l'ion nitrate (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 (NO_3^-) que ammoniacale (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 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**⁴ de l'azote nitrique

⁴ 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.

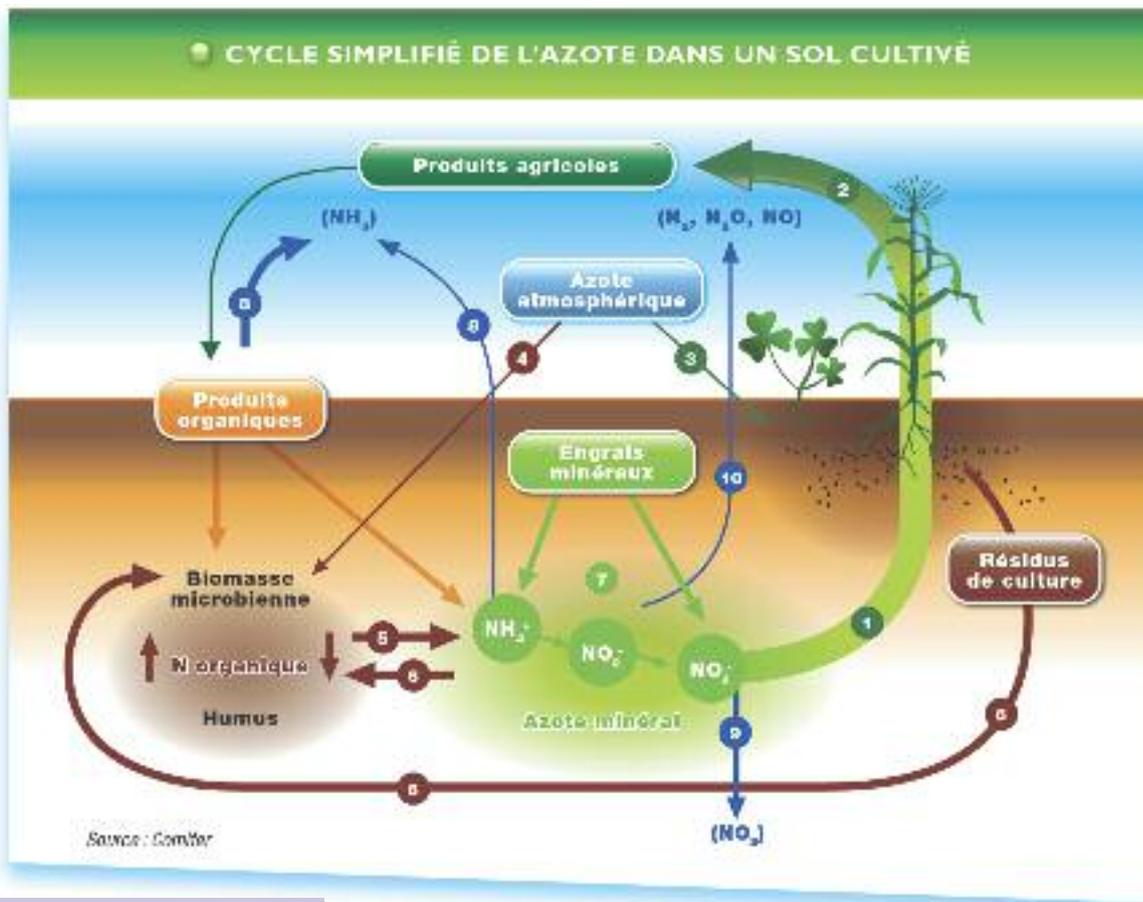


Figure 4

- | | |
|---------------------------------|---------------------|
| 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).

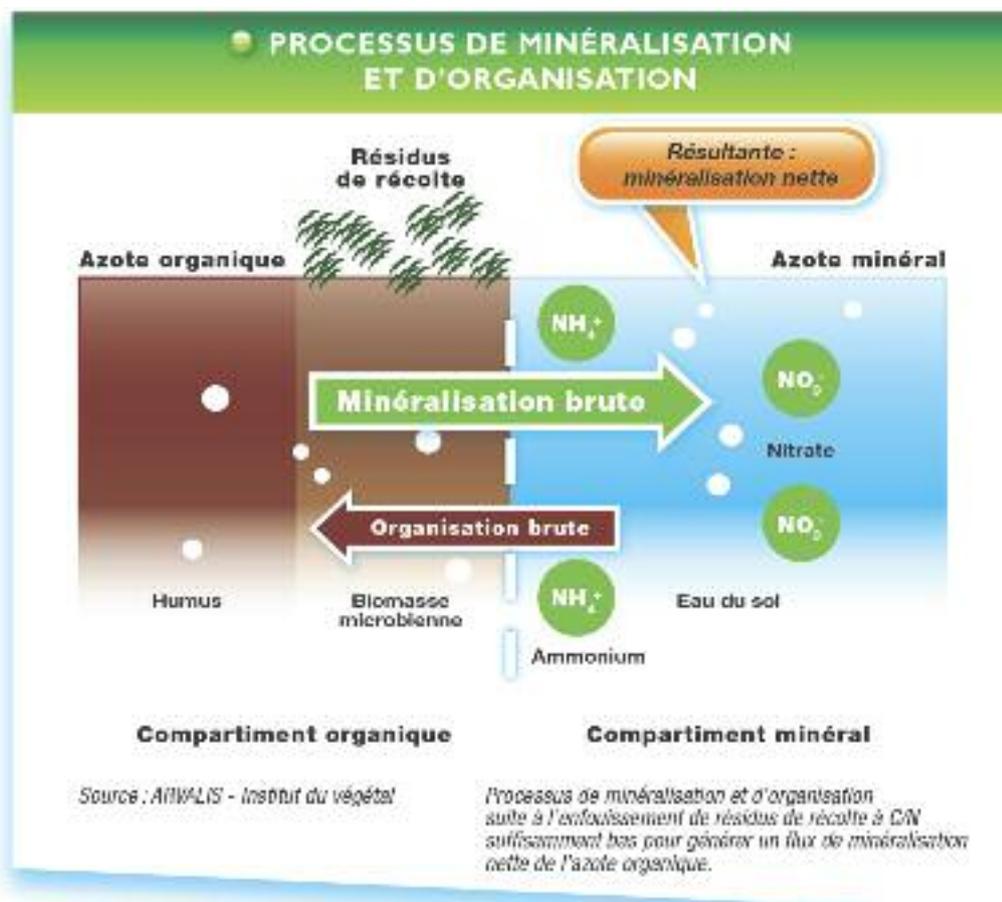


Figure 5

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 10 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 (déficit 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 (NH_4^+) énergiquement fixé par les charges négatives de la phase solide du sol, l'ion nitrate (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 _f	Quantité d'azote minéral dans le sol à la fermeture du bilan
R _i	Quantité d'azote minéral dans le sol à l'ouverture du bilan
Entrée d'azote dans le système sol-plante	
M _h	Minéralisation nette de l'humus du sol*
F _s	Fixation symbiotique d'azote atmosphérique par la culture
F _{ns}	Fixation non symbiotique d'azote atmosphérique
M _{hp}	Minéralisation nette due à un retournement de prairie
M _r	Minéralisation nette de résidus de récolte
M _{rCi}	Minéralisation nette de résidus de culture intermédiaire
M _{pro1}	Minéralisation nette de l'azote organique d'un PRO n°1 apporté avant l'ouverture du bilan
M _{pro2}	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 _{irr}	Azote apporté par l'eau d'irrigation
X	Apport d'azote sous forme d'engrais minéral de synthèse
X _{pro}	Azote de la fraction minérale d'un PRO apporté après la date d'ouverture du bilan
Sorties d'azote du système sol-plante	
P _f	Quantité d'azote absorbé par la culture à la fermeture du bilan
P _i	Quantité d'azote absorbé par la culture à l'ouverture du bilan
I _x	Organisation par voie microbienne aux dépens de l'azote minéral apporté sous forme d'engrais de synthèse ou de fraction minérale du PRO
G _s	Pertes du sol par voie gazeuse (dénitrification pour l'essentiel)
G _x	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 _{pro})
L	Pertes par lixiviation du nitrate

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 : $G_s = F_n$.
- 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, en raison de sa faible valeur, on néglige généralement le terme A (dépôt atmosphérique). 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 (I_x et G_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.

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 (cf. fiches cultures à paraître ultérieurement).

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 (fiches culturales à paraître prochainement).

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 à paraître ultérieurement.

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 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).

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 nitrrique** 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^{ème} 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 :

$$[6] \quad \text{Stock Nmin} = \text{Teneur Nmin} \times \text{Ep} \times \text{DaG} / 10$$

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/m³)

[6bis] $DaG = Da \times (100 - \% \text{ vol EG}) / 100$

Avec : Da = densité apparente de la terre fine (t/m³)

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

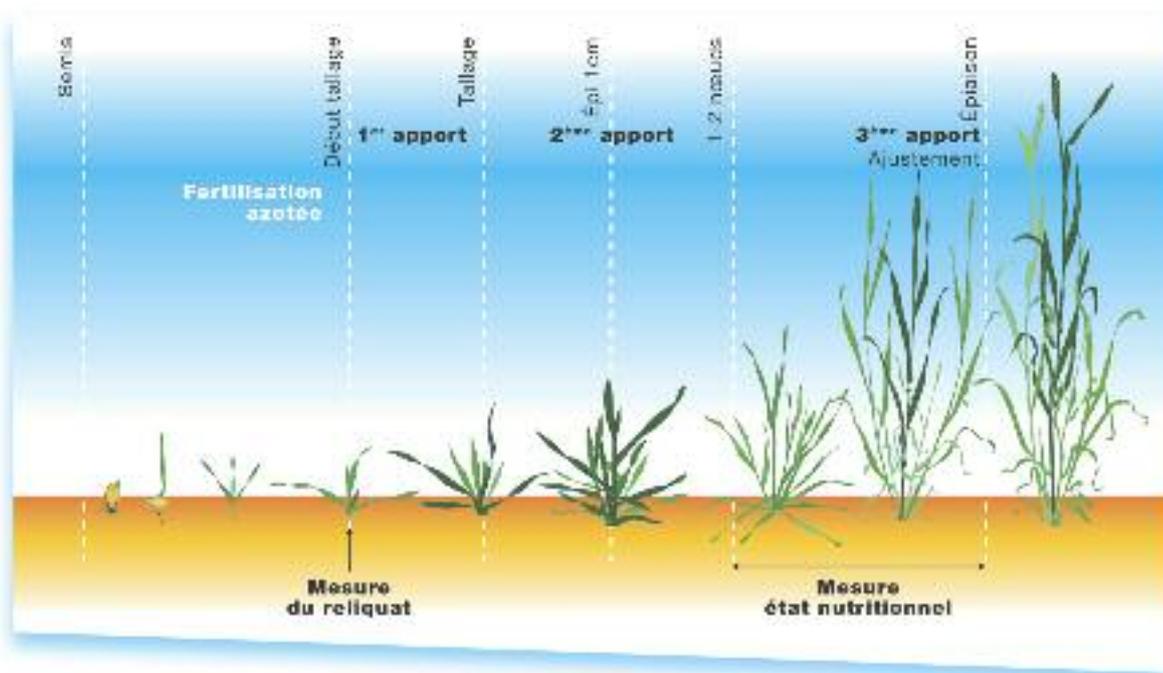
Le tableau 1 fournit des exemples de calculs de stock d'azote.

		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 ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺
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 2010**

Attention, ces valeurs sont des moyennes indicatives. Des écarts importants peuvent être observés entre les parcelles.
SOLS PROFONDS (limons moyens profonds, limons moyens sableux, limons argileux profonds, limons argilo-sableux)

culture en place / précédent	nombre parcelles	reliquat d'azote minéral (kg N/ha)				nombre parcelles	reliquat 90-120 cm
		0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	TOTAL		
blé / céréales pailles enlevées	40	15	10	16	41	1	10
blé / céréales pailles enfouies	72	15	11	15	41	5	8
blé / betteraves	346	14	9	8	31	15	4
blé / colza	204	17	12	15	44	2	10
blé / pois et haricots de conserve	17	17	21	41	79	---	---
blé / pois protéagineux	41	19	14	23	56	2	29
blé / pomme de terre consommation	46	17	20	31	68	1	11
blé / pomme de terre féculé	18	17	12	18	47	1	15
blé / lin fibre	13	13	9	12	34	1	18
blé / féverole	113	18	12	18	48	---	---
blé / maïs grain	80	13	7	9	29	---	---
blé / maïs fourrage	50	17	12	14	43	---	---
blé / oignon	10	17	19	29	65	---	---
blé / épinard	3	17	20	42	79	---	---
escourgeon / pailles enlevées	29	18	9	10	35	---	---
escourgeon / pailles enfouies	30	15	7	8	30	---	---
colza / pailles enlevées	17	13	5	5	23	---	---
colza / pailles enfouies	20	15	6	5	26	---	---
orge de printemps / betterave	11	11	12	10	33	---	---
labour / pailles enlevées	22	15	17	20	52	---	---
labour / pailles enlevées + CIPAN	21	19	15	10	44	---	---
labour / pailles enlevées + fumier bovins	27	19	16	19	56	---	---
labour / pailles enlevées + fumier bovins + CIPAN	73	22	16	11	49	---	---
labour / pailles enfouies	137	15	15	18	48	---	---
labour / pailles enfouies + CIPAN	136	15	12	9	36	---	---
labour / pailles enfouies + vinasses août-sept	28	20	19	19	58	---	---
labour / pailles enfouies + vinasses août-sept + CIPAN	152	18	16	10	44	---	---
labour / pailles enfouies + vinasses août-sept + écumes	3	19	21	21	61	---	---
labour / pailles enfouies + vinasses août-sept + écumes + CIPAN	62	20	17	12	49	---	---
labour / pailles enfouies + vinasses oct-nov	3	32	23	31	86	---	---
labour / pailles enfouies + écumes	11	13	14	17	44	---	---
labour / pailles enfouies + écumes + CIPAN	14	17	14	9	40	---	---
labour / pailles enfouies + fientes	5	16	24	31	71	---	---
labour / pailles enfouies + fientes + CIPAN	31	20	18	12	50	---	---
labour / pailles enfouies + compost de fientes	6	18	18	23	59	---	---
labour / pailles enfouies + compost de fientes + CIPAN	56	17	14	10	41	---	---
labour / pailles enfouies + fumier volailles + CIPAN	7	16	11	12	39	---	---
labour / pailles enfouies + boues urbaines déshydratées + CIPAN	19	18	24	19	61	---	---
labour / pailles enfouies + compost déchets verts	3	17	12	14	43	---	---
labour / pailles enfouies + compost déchets verts + CIPAN	10	19	13	11	43	---	---
labour / pailles enfouies + matière organique fermentescible	56	18	18	20	56	---	---
labour / pailles enfouies + matière organique fermentescible + CIPAN	192	17	16	11	44	---	---
labour / pailles enfouies + fumier de champignon + CIPAN	10	16	13	10	39	---	---
labour / pailles enfouies + type humocal + CIPAN	58	17	13	9	39	---	---
labour / maïs grain	10	13	8	9	30	---	---



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

5 mars 2010

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.

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 organique⁵ 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).

⁵ 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.

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

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 exogènes et type de produit

	Jamais	5-10 ans		3-4 ans		1-2 ans		Facteurs multiplicateurs en +	
		A	BC	A	BC	A	BC	Retour-prairie	CI
Résidus de récolte		A	BC	A	BC	A	BC	Retour-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 1/2	0,90	1,00	0,95	1,05	1,00	1,10	1,02	1,1	
Enfouis 1/1	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.

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)

CaCO₃ = 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 $Mh = f(TN_{org})$, il est utile de borner le résultats du produit $TN_{org} * Km$ dans les sols à forte teneur en azote organique et pour des valeurs extrêmes d'argile et/ou de CaCO₃.

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 F_t 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

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	
	Situation 1	Situation 2
	1,7% MO	3% MO
%Nt	0,11	0,174
Prof	30	30
DaG	1,5	1,5
TNorg	4,95	7,83
A	170	170
CaCO3	0	0
Fsyst	1,1	1,1
Km standard	0,14	0,14
Km	0,15	0,15
JN	44	44
Mh	32	51

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

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 mesure de %Nt dans les années suivant le retournement permet de mieux estimer le terme **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

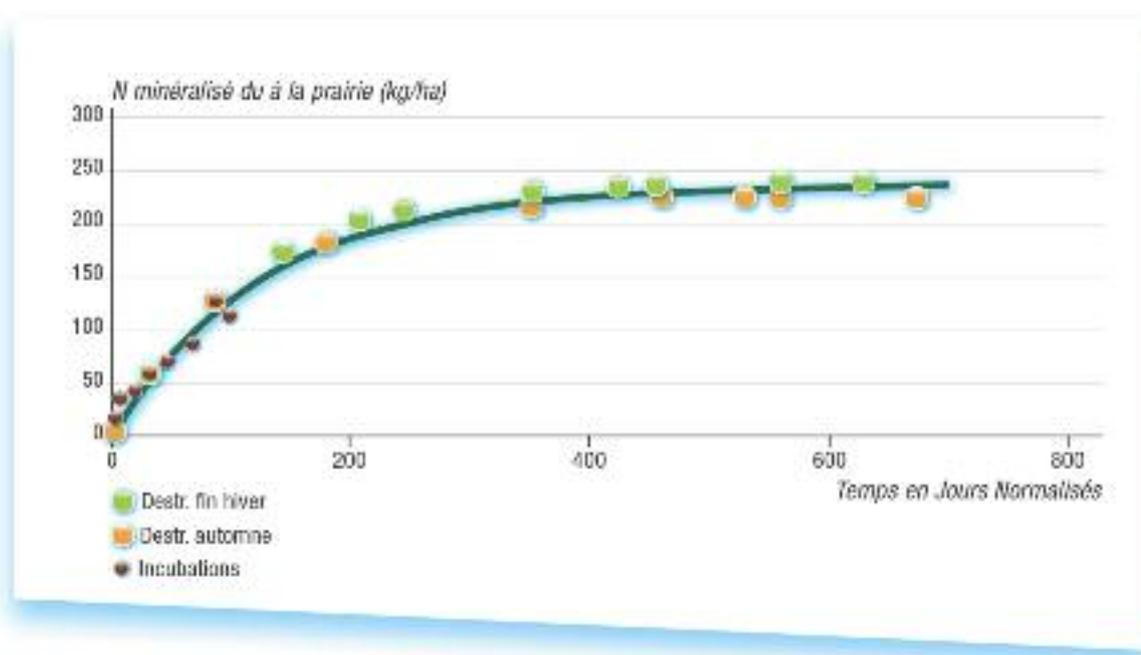
b - Destruction d'automne			Age de la prairie				
			< 18 mois	2-3 ans	4-5 ans	6-10 ans	> 10 ans
Rang de la culture post destruction	1	blé	10	30	50	60	70
	2	maïs ou blé	0	0	0	0	0
	3	maïs ou blé	0	0	0	0	0

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).

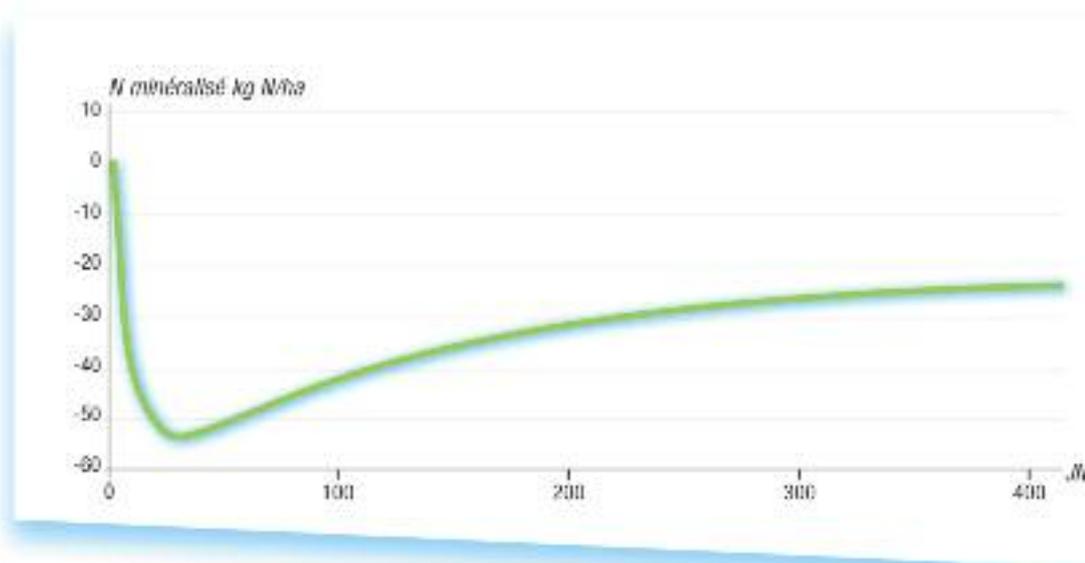
Nature du précédent	Mr (KgN/ha)
Betterave	20
Carotte	10
Céréales pailles enfouies	-20
Céréales pailles enlevées ou brûlées	0
Colza	20
Endive	10
Féverole	30
Lin fibre	0
Luzerne (retournement fin été / début automne) : année n+1	40
Luzerne retournement fin été / début automne) : année n+2	20
Luzerne (retournement printemps)	En cours d'étude
Maïs fourrage	0
Maïs grain	-10
Pois protéagineux	20
Prairie	0
Pois, Haricots de conserve	20
Pomme de terre	20
Tournesol	-10
Ray-Grass dérobé	-10
Jachère	Voir tableau 6

Tableau 5 : Poste Mr (kgN/ha) en fonction de la nature des résidus de la culture précédente. Sources : D'après AZOBIL © INRA sauf pour luzerne (Justes et al. 2001).

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 : Poste Mr (kgN/ha) en fonction de la nature des résidus de jachère précédente.

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.

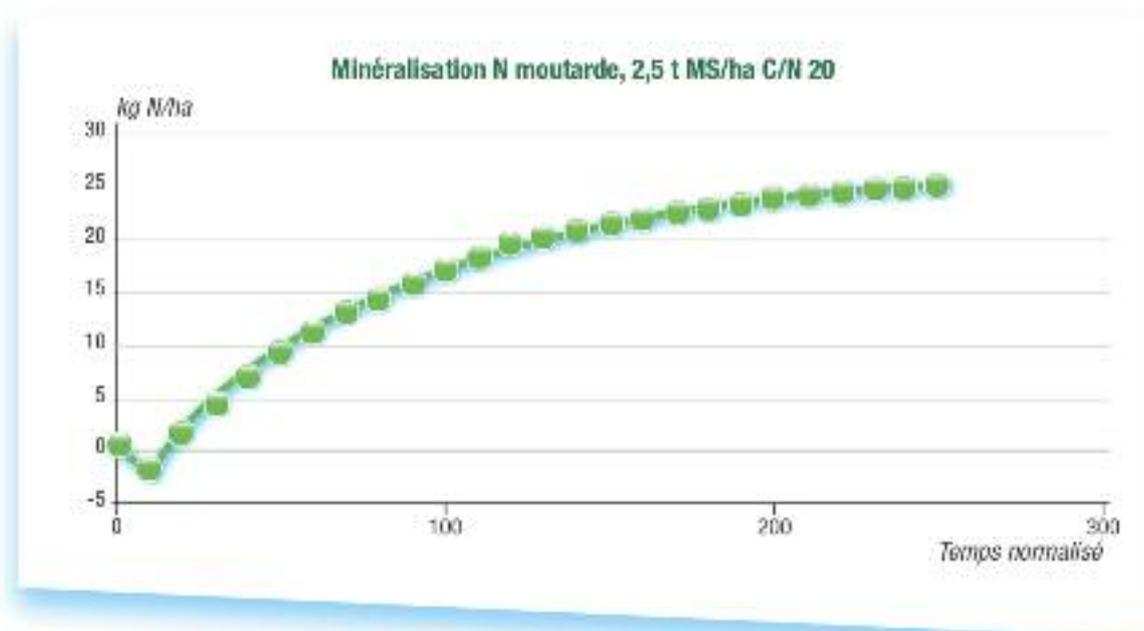
Les critères retenus pour estimer la contribution des cultures intermédiaires à la nutrition azotée de la culture suivante sont (tableau 7) :

- l'espèce (graminées, crucifères,...)
- le niveau de croissance ;
- la date de destruction ;
- la date d'ouverture du bilan.

Espèce	Niveau de croissance (1)	Date d'ouverture du bilan prévisionnel			
		Février (betterave, céréales de printemps,...)		avril (Maïs, pomme de terre,...)	
		Date de destruction de la CI		Date de destruction de la CI	
		Novembre à décembre	Janvier et au delà	Novembre à décembre	Janvier et au delà
Seigle et phacélie	Faible ou moyen	0	5	0	5
	Élevé	10	10	5	10
Ray-grass italien et autres graminées	Faible ou moyen	10	15	5	10
	Élevé	15	20	10	15
Crucifères	Faible ou moyen	10	15	0	10
	Élevé	15	20	5	15
Légumineuses	Faible ou moyen	25	30	20	25
	Élevé	30	30	30	30

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.

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 le plus répandu. 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. 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).

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

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

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

Q = volume ou masse de produit épandue par hectare

Keq = coefficient d'équivalence engrais 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 bilan soit effectué par une méthode statique ou dynamique. En effet à la date d'ouverture du bilan, une partie de l'azote du produit résiduaire apporté par le PRO avant l'ouverture du bilan peut se retrouver dans le reliquat d'azote minéral (terme R_i), dans l'azote absorbé par la culture (terme P_i), ou être perdue par lixiviation ou pertes gazeuses (termes L , I_x).

Les tableaux 8 et 9 proposent des fourchettes de valeurs des coefficients d'équivalence engrais minéral efficace (Keq) selon le produit épandu, la culture réceptrice et l'époque d'épandage, obtenus à partir d'expérimentations au champ où Keq représente le rapport entre la quantité d'azote apporté par un engrais minéral (le plus souvent de l'ammonitrate) et la quantité d'azote total apporté par le PRO qui permet la même absorption d'azote.

Ce coefficient a le plus souvent été calculé sur la base de mesures d'azote absorbé à maturité et intègre donc l'effet de l'azote du PRO à l'échelle du cycle cultural entier et non pas uniquement sur la période du bilan. Pour des PRO apportés avant l'ouverture du bilan sur des cultures d'automne (blé, colza...), une partie du Keq ainsi calculé ne devrait pas être comptabilisé dans le bilan.

En conséquence, dans le tableau 8, pour des PRO apportés avant l'ouverture du bilan ont été distingués un Keq calculés à l'échelle du cycle cultural (le plus souvent diffusé, et utilisé dans le cas des écritures CAU) et un Keq sur la période « du bilan » (pour lequel on ne dispose que de peu de références).

Par exemple dans le cas d'un apport de fientes en fin d'été avant colza, le Keq sur la période du bilan (sortie d'hiver - récolte) n'est que de 0,05 à 0,10 alors que le Keq à l'échelle du cycle entier est de 0,35 à 0,55. L'essentiel de l'azote fourni par les fientes est libéré avant l'ouverture du bilan et se retrouve à cette étape, dans les termes P_i et R_i , ou peut être perdu (L , I_x).

Exemples de types PRO	Cultures concernées	Périodes d'apport	Coefficient d'équivalence engrais (Keq)	
			Keq sur la période bilan	Keq sur tout le cycle
Fumier de bovins (pailleux et décomposés)	Cultures de printemps	Printemps	0,15 à 0,30	
		Été-automne	0,05 à 0,20	
Compost de fumiers de bovins	Cultures de printemps	Printemps	0,10 (compost de plus de 10 mois) à 0,30	
	Cultures de printemps	Été automne avant CIPAN *	0,10 à 0,15	
Fumier de volailles	Toutes cultures de printemps et d'automne (céréales)	Sortie d'hiver - Printemps	0,35 à 0,55	
	Colza	Fin d'été	0,10 à 0,20	0,35 à 0,55
	Cultures de printemps	Été automne avant CIPAN *	0,12 à 0,16	
Compost de fumiers de volailles	Cultures de printemps	Printemps	0,10 (compost de plus de 10 mois) à 0,40	
	Cultures de printemps	Été automne avant CIPAN *	0,08 à 0,15	
Fientes de volailles (toutes catégories)	Toutes cultures de printemps et d'automne (céréales)	Sortie d'hiver - Printemps	0,40 à 0,70	
	Colza	Fin d'été	0,05 à 0,10	0,35 à 0,55
	Cultures de printemps	Été automne avant CIPAN *	0,12 à 0,16	
Lisier de porcs	Toutes cultures de printemps et d'automne	Sortie d'hiver - Printemps	0,6 à 0,75	
	Colza	Fin d'été	0,05 à 0,10	0,50 à 0,65
	Cultures de printemps	Été automne avant CIPAN *	0,05 à 0,10	
Lisier de bovins	Cultures de printemps	Printemps	0,2 à 0,55	
	Cultures d'automne	Fin d'été	0,05 à 0,15	0,35 à 0,45
	Cultures de printemps	Été automne avant CIPAN *	0,10 à 0,15	
Compost d'ordures ménagères	Cultures de printemps	Printemps	0 à 0,10	
Compost urbain	Cultures de printemps	Été automne avant CIPAN *	0 à 0,10	
Vinasse de sucrerie	Cultures de printemps	Été (avant CIPAN) *	0,10 à 0,15	
		Automne	0,15 à 0,30	
		Fin d'hiver - Printemps	0,40 à 0,60	

Tableau 8 : Keq des principaux PRO. Sources : Brochure « Fertiliser avec les engrais de ferme » 2001 (IE, ITAVI, ITCF, ITP), « fertilisation des légumes frais de plein champ » 2008 Chambres d'Agriculture de Bretagne, brochure Plan de fumure azotée Picardie, données Azofert INRA/LDAR.

* 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.

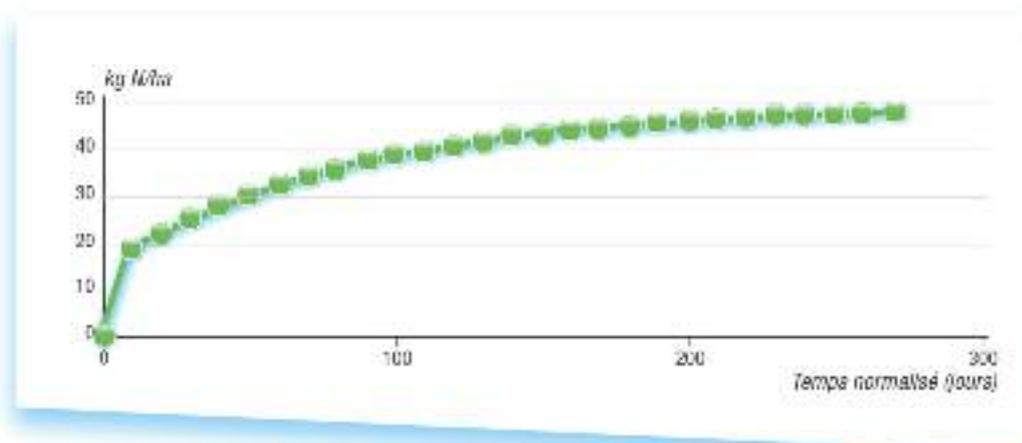
Exemples d'effluents d'élevage épandus sur prairies	Période d'apport	Mode d'apport	Régions régulièrement arrosées	Régions à déficit estival marqué
Fumier de bovins	Automne - hiver	En surface	0,3	0,2
Fumier de bovins	Printemps	En surface	0,1	0,05
Compost de fumier de bovins	Automne - hiver	En surface	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	En surface	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 K_{eq} 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/hade 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 10 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. 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 NO₃⁻ / 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) 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 :

$$[13] \quad CAU = (NabsX - NabsTON) / X$$

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

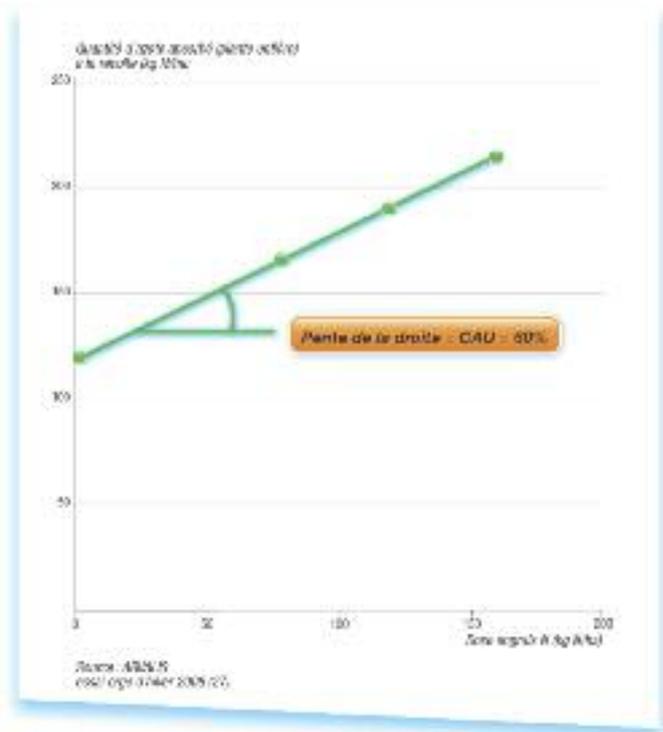
NabsTON = quantité d'azote absorbé par le couvert sans apport d'azote (kgN/ha)

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

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 où le sol est nu. 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 sont disponibles (cf. exemple en figure 7). Elles sont généralement issues de calculs fréquentiels à partir de modèles de drainage. Quelques situations agronomiques 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...).

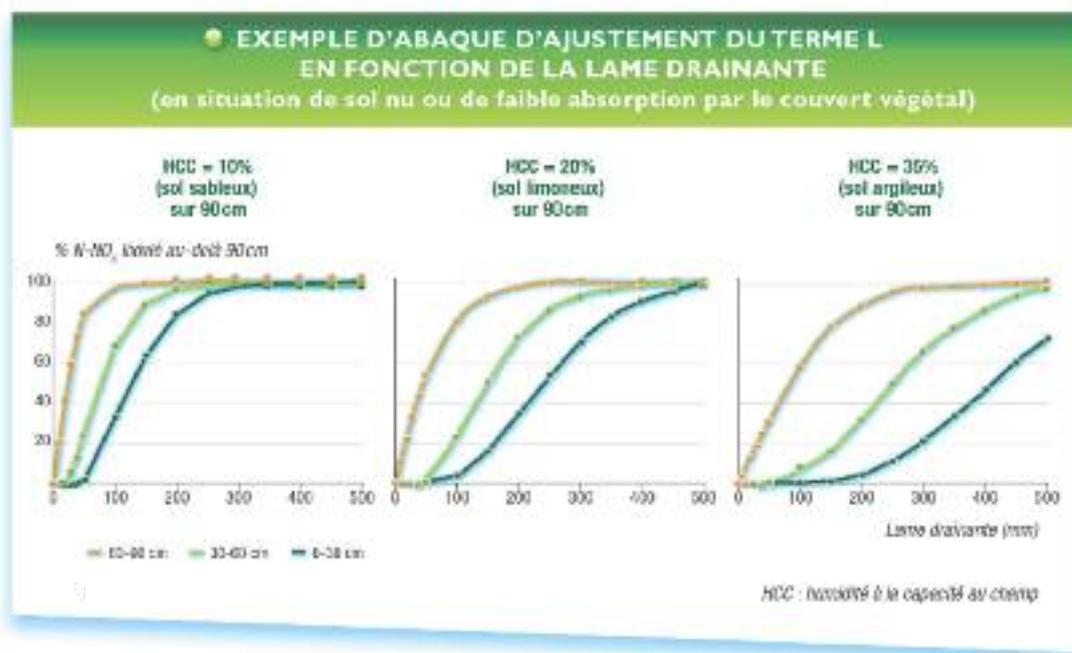


Figure 7

L'ordonnée représente la perte en azote sous forme nitrique 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 . Les fiches cultures à paraître prochainement fourniront des exemples de R_f .

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)

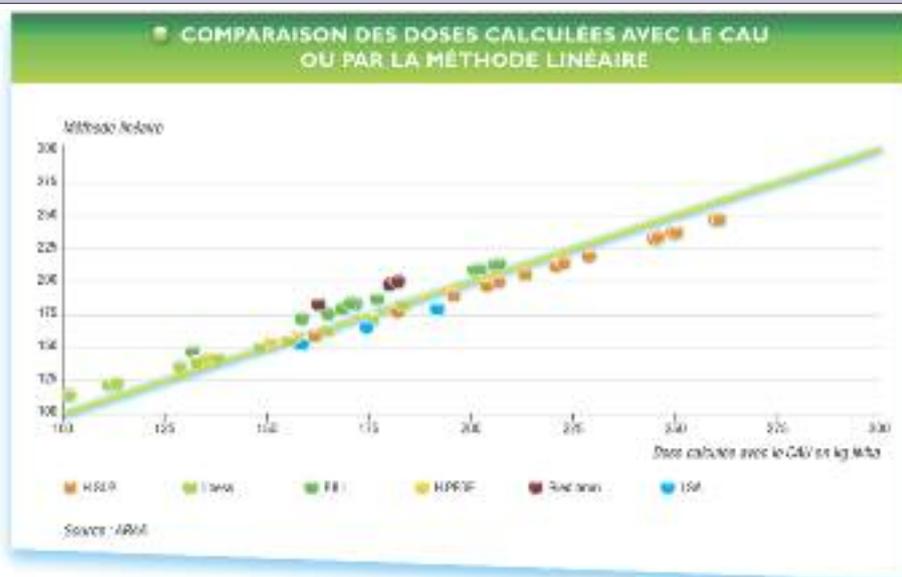
La région Alsace a développé un référentiel de raisonnement de la fertilisation azotée du maïs sur la base d'une équation d'efficacité : $P_f = PO + (X + X_a) \times CAU$.

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'III	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'III irriguée	110	90
	Plaine del'III non irriguée	90	90
	Ochsenfeld irrigué	100	60
	Autres sols du Piémont	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 MrCI :

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

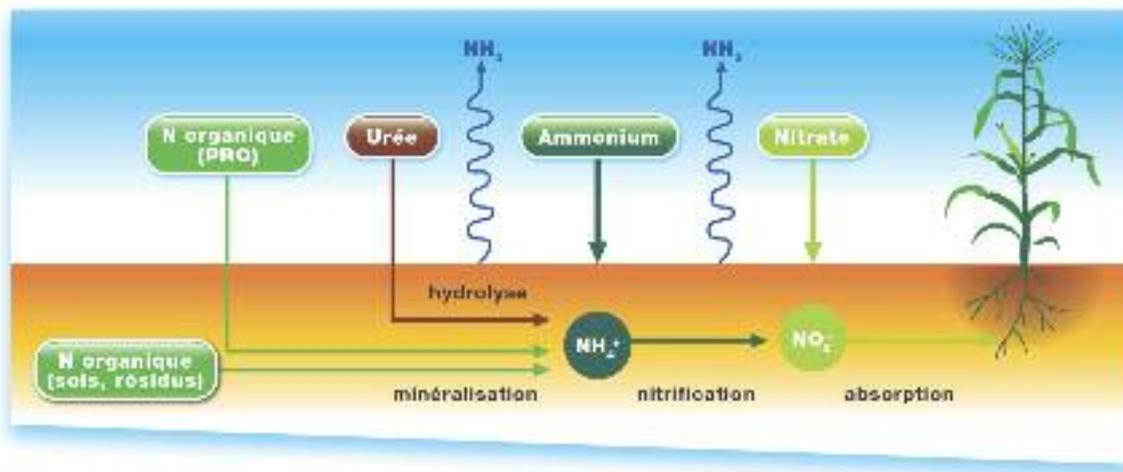
La vitesse de minéralisation de l'azote organique des PRO dépend du type de produit et des conditions du milieu (température et humidité du sol principalement). L'hydrolyse de l'urée après la dissolution des granules est rapide. Elle s'opère sous l'action de l'enzyme uréase présente dans le sol plus 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 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 NH₄⁺ se traduit par la libération d'un proton qui par conséquent acidifie localement le sol⁶. 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 NH₃. Cette émission résulte d'équilibres physico-chimiques entre l'ammonium (NH₄⁺) dissoute et l'ammoniac (NH₃). Les produits résiduaux 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 NH₃ 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 NH₄⁺ (sulfate > phosphate > nitrate). Les engrais nitriques (nitrate de calcium, nitrate de potassium) ne sont pas concernés.

⁶ 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).

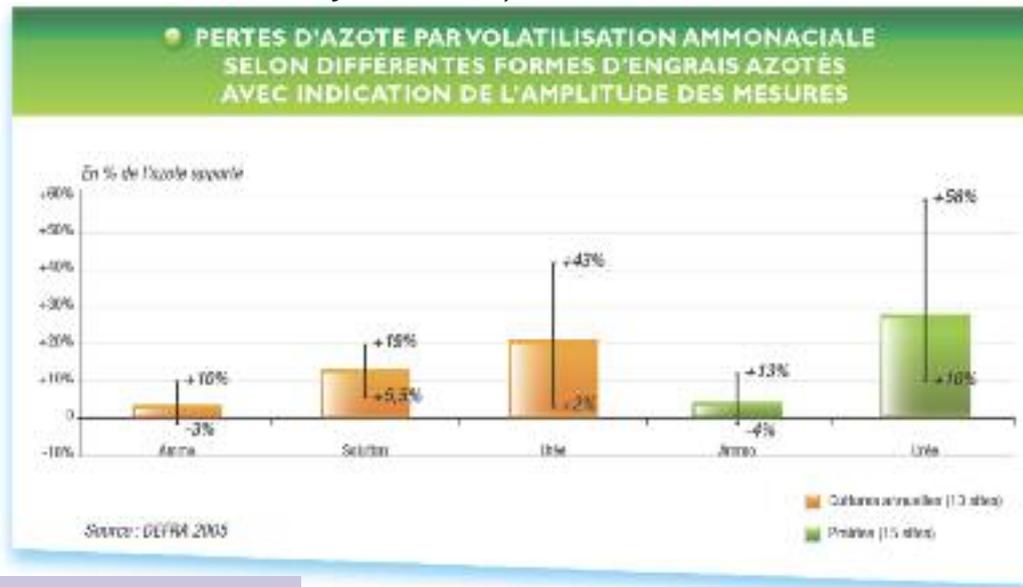


Figure 8

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

Choix de la forme	Préférer la forme nitrrique aux formes uréique ou ammoniacale
Positionnement	Avant semis : enfouir ou localiser En couverture : apporter en période de forte croissance
Conditions d'apport	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.

Conditions climatiques	Éviter le temps chaud et sec Épandre avant la pluie en faisant attention au risque de ruissellement ou de lessivage
État du sol	Éviter les sols compactés ou desséchés
Dilution du lisier	Si possible diluer le lisier pour favoriser son infiltration dans le sol ⁷
Incorporation	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.

⁷ 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.

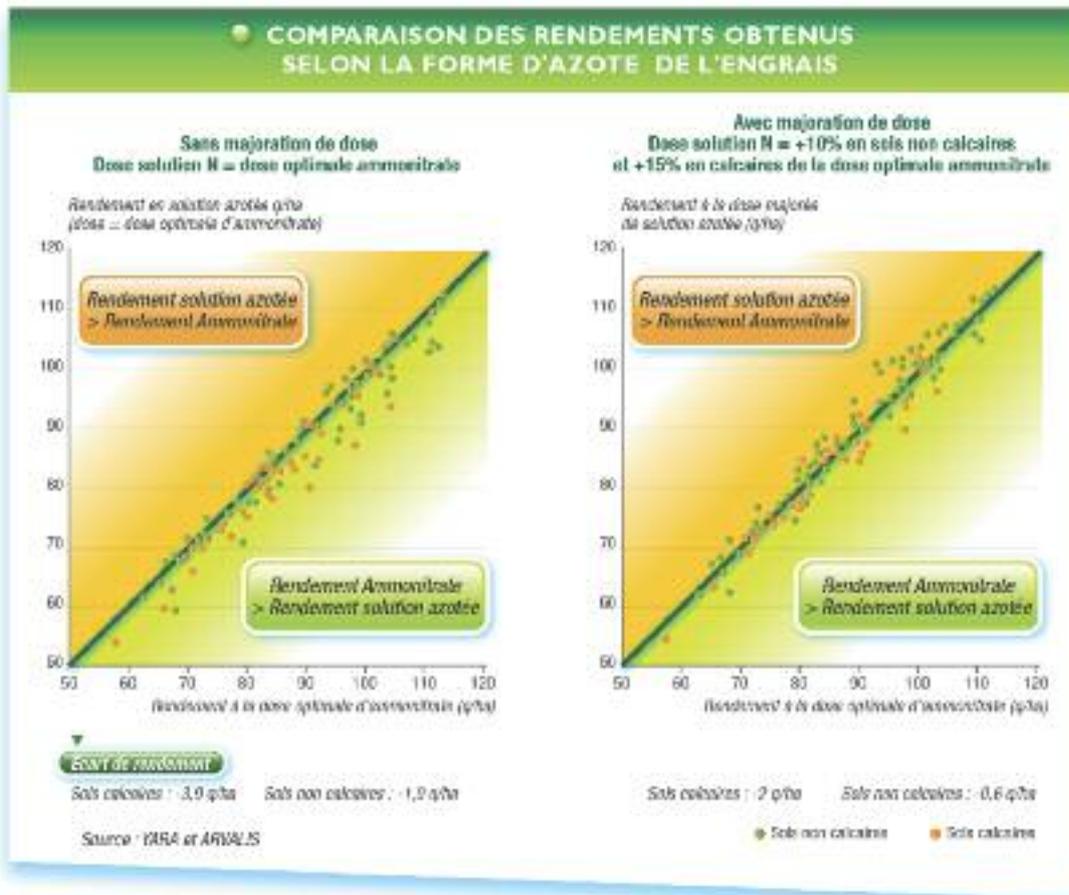


Figure 9

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

Exemples de types de PRO	Teneur en azote total (kg N par tonne ou m ³ de produit brut)	Pourcentage d'azote minéral (N-NH ₄ et N-NO ₃) par rapport à N total
Fumiers de bovin Pailleux	3 à 10	2 à 25 %
Fumiers de bovins décomposés	4 à 12	
Compost de fumiers de bovins	5 à 8	0 à 10 %
Fumiers de volailles	10 à 30	10 à 35 %
Fientes sèches de volailles (70% MS)	10 à 50	5 à 30 %
Lisier de poules pondeuses	7 à 26	10 à 60 %
Lisiers de porcs	2 à 8	50 à 80 %
Lisiers de bovins	1 à 4	40 à 60 %
Compost urbain	5 à 10	0 à 15 %
Compost de déchets verts	6 à 12	0 à 10 %
Vinasse de sucrerie	10 à 40	0 à 5 %

Tableau 13 : teneur en azote total et proportion d'azote ammoniacal de produits résiduaux organiques. Sources : Brochure « Fertiliser avec les engrais de ferme » 2001 (IE, ITAVI, ITCF, ITP), « fertilisation des légumes frais de plein champ » 2008 (Chambres d'Agriculture de Bretagne), Base de données du LDAR, Institut de l'Élevage - CRA des Pays de la Loire « Typologie des engrais de ferme de bovin Mai 2003, Etude ITAVI OFIVAL « Caractérisation des fumiers, lisiers et fientes de volaille » 2003.

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 biphase 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 2003/2003 soit avec la norme française NF U 42-001 d'application obligatoire. Les principales dénominations d'engrais et les exigences de teneurs minimales dans la norme sont rappelées dans le tableau 14.

Catégories UNIFA	Dénominations dans la norme	Teneur(s) minimale(s) (1)
Simple N		
Ammonitrates	Ammonitrate	20% N nitrique + ammoniacal
	Sulfonitrate d'ammoniaque Sulfonitrate magnésien	25% N ammoniacal + nitrique et 5% N nitrique 19% N ammoniacal + nitrique, 6% N nitrique et 5% MgO soluble dans l'eau
Solution azoté	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
	Ammoniac anhydre	80% N ammoniacal
	Cyanamide calcique Cyanamide calcique nitraté	18% N total 18% N total avec 1% minimum de N nitrique
	Nitrate de chaux Nitrate 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 avec MgO et/ou SO ₃	15% N total
Composés NP, NK, NPK, OM		
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 ₂ O ₅ avec 3% de N et 5 % de P ₂ O ₅
NK - NPK	Engrais NK	18% de N + K ₂ O avec 3% de N et 5% de K ₂ O
	Engrais NPK	20% de N + P ₂ O ₅ + K ₂ O avec 3% de chaque
Organo - minéraux	Engrais organo-minéral - N - NPK - NP - NK	Contenant au minimum 1% de N organique 3% N 7% de N + P ₂ O ₅ + K ₂ O avec 2% de chaque élément 7% de N + P ₂ O ₅ + K ₂ O avec 2% de N et 4% de K ₂ O 7% de N + P ₂ O ₅ + K ₂ O avec 2% de N et 4% de K ₂ 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 ₃ / MgO
Ammonitrate calcaire	Granulé	20 - 28%	0	50%	50%	
Ammonitrate soufré	Granulé	20 - 28%	0	50%	50%	SO ₃ MgO facultatif
Sulfonitrates	Granulé	19 - 27%	0	73%	27%	SO ₃ 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 de chaux (calcium)	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

Contenu 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 référant 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 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 de la norme française NF U 42-001 rendue d'application obligatoire. Les engrais azotés incorporant certains inhibiteurs sont dans le règlement européen CE 2003-2003. Les engrais qui ne sont repris ni dans la norme française ni dans le règlement européen doivent faire l'objet d'une homologation 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
Type d'engrais	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
Composition particulière	UF : Urée formaldéhyde IBDU : Isobutylidène diurée CDU : Crotonylidène diurée	N-(n-butyl) thiophosphorique triamide (NBPT)	Nitrapyrine Dicyandiamide Diméthyl pyrazol phosphate (DMPP)	enrobant à base de soufre S ou de polymères synthétiques
Mode d'action	hydrolyse du N de synthèse organique	Inhibition de l'hydrolyse de l'urée	Inhibition de la nitrification	Délitage ralenti des granulés
Durée de l'effet	2 à 3 mois	1 à 2 semaines	6 à 8 semaines	3 à 18 mois
Effets revendiqués	Limite la lixiviation	Limite la volatilisation	Limite la lixiviation et les émissions de N ₂ O	Limite la lixiviation
Obligations légales	NF U 42-001 RCE 2003/2003	RCE 2003/2003	DCD : RDC 2003/2003 DMPP : 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 NO₃	++	++	+	+	-
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 ₃	jus pression	base tige, pétiole	JUBIL	INRA ARVALIS	méthode bilan (X)	X - 40	■	■	■	■						
teneur NO ₃	jus pression	base tige, pétiole	RAMSES	INVIVO	dose base (APM Azote potentiellement minéralisable)	sans excès	■	■	■	■						
teneur NO ₃	jus pression	base tige, pétiole	RAMSES 2	INVIVO	méthode bilan EPICLES(X)	X - 40	■	■								
teneur NO ₃	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.

1 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 contrainte 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, 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)

$$[15] \quad P_f = N_{\text{exp}} + N_{\text{réserves}}$$

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

$N_{\text{réserve}}$: 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 ($N_{\text{réserve}}$) 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 :

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

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 :

$$[17] \quad P_0 = M_h + N_{\text{rest}} + F_s$$

Avec : M_h : fourniture d'azote minéral par le sol (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 fauchée et sans légumineuses, 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 :

$$[18] \quad X + X_a = [N_{\text{exp}} - (M_h + N_{\text{rest}} + F_s)] / \text{CAU}$$

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

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

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 :
 - la fourniture d'azote minéral par le sol N_0
 - la contribution directe des restitutions au pâturage de l'année N_{rest}
 - 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

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 hivernal / Pousse estivale	Nul		Moyen		Fort
	Forte	Pâture 10 t MS	Fauche + pâture 11 t MS	Pâture 9 t MS	Fauche + pâture 10 t MS
Ralentie	Pâture 8 t MS	Fauche + pâture 9 t MS	Pâture 7 t MS	Fauche + pâture 8 t MS	Foin (+ pâture) 6 t MS
Très faible à nulle	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 10% 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
Vache laitière l lait/j	15 l ou V. taries*	13
	20 l (<6000 l/an)*	16
	25 l (6-8000 l/an)*	17
	30 l (8-9000 l/an)*	18
Vache allaitante vêlage hiver vêlage automne	650 kg + veau 150	19
	700kg + veau 250	22
Bovin en croissance	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^{ère} 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"> > sécurise les stocks par une prise en compte d'une valorisation moyenne définie par l'éleveur au regard des années passées > généralisable sur l'ensemble du territoire sans référentiel de production 	<ul style="list-style-type: none"> > raisonnement à niveau de production constant : n'explore pas forcément la potentialité de la prairie > 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. > il manque une bonne estimation des besoins par lot d'animaux (complémentarité avec méthode 3)
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"> > recherche du potentiel de production de la prairie qui permet une utilisation optimisée de la SAU > ajustement des niveaux de la fertilisation (optimum) pour atteindre le niveau de production recherché (cf. courbes de réponse N, Castillon et al, 1999) 	<ul style="list-style-type: none"> > 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. > difficilement extrapolable sur tout le territoire
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"> > sécurise l'alimentation des troupeaux > généralisable sur l'ensemble du territoire sans référentiel de production > cible les objectifs de productions par catégorie d'animaux / parcelles correspondantes 	<ul style="list-style-type: none"> > ne prend pas en compte l'évolution de la génétique des troupeaux : augmentation des capacités d'ingestion... ? > approche limitée au pâturage : quid des besoins en N des prairies de fauches > limité dans le temps : quid de l'alimentation des prairies en début d'été... ? > 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... > n'intègre pas l'alimentation complémentaire, ni la sévérité du pâturage

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

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.

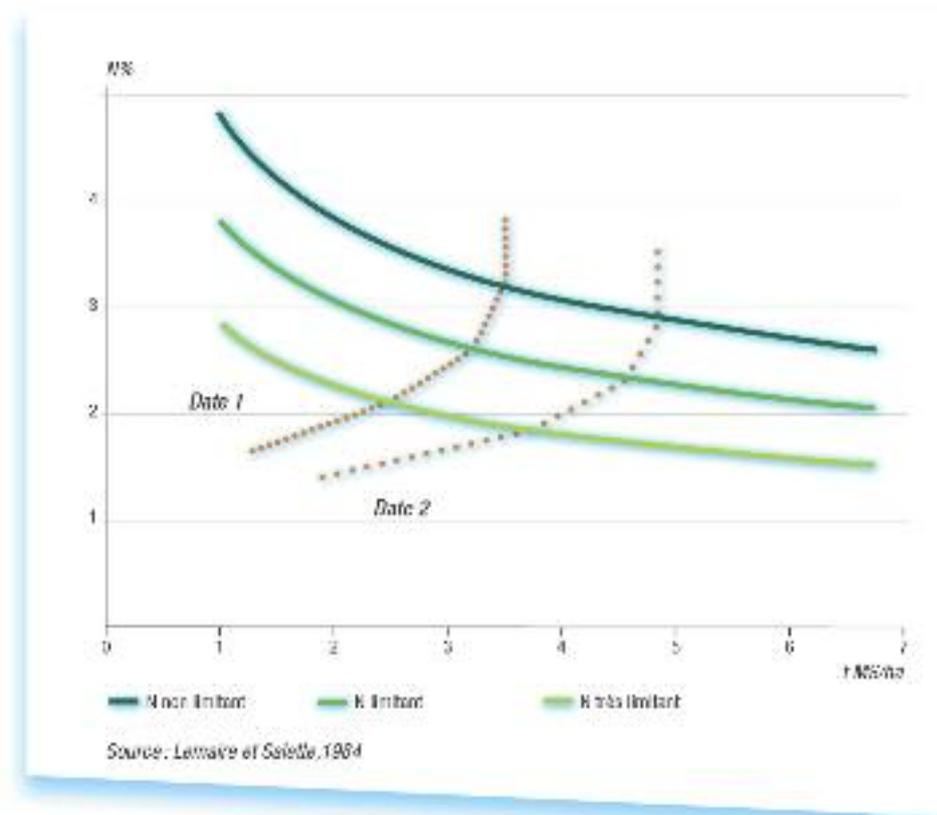


Figure 10

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 ^{er} cycle	15

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

Estimation de la fourniture d'azote par le sol : Mh

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. De même que pour les cultures, on peut y ajouter les apports atmosphériques s'ils sont connus et importants.

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 à la difficulté de prédiction de cette quantité, car on n'a 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.

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 ON 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).

Le tableau 21 rassemble une synthèse des résultats expérimentaux disponibles. 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.

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 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)

	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) pour les prairies du Grand Ouest. Les quantités indiquées concernent les prairies jeunes (< 5 ans) et **agées (> 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 en kg N/ha/an pour les prairies de Bretagne

	Pousse estivale très ralentie à nulle	Pousse estivale moyenne	Bonne pousse estivale
Entretien azoté antérieur faible ¹ : pas ou peu d'épandage d'azote organique ou pâture extensive ou faible fertilisation N minéral	40	60	100
Situations intermédiaires	60	90	120
Entretien azoté antérieur fort ¹ : épandage d'azote organique fréquents ou pâture intensive ou fertilisation N minérale élevée	80	120	160

1 : depuis plus de 15 ans

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.

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 met 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'Élevage (brochure Trèfle blanc 2005)

Le tableau 23 fournit les quantités d'azote fixé dans la biomasse récoltée (Nleg), 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 (Nleg, 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.

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 P₀.

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.

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

%N_{pro} : teneur en azote total de l'effluent (% par unité de volume ou de masse)

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

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

Proposition d'un tableau de référence

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).

Sur prairie de graminées de plus de 6 mois, les apports de lisier sont autorisés jusqu'au 1^{er} octobre (dans le cadre des 4^e programmes d'action de la Directive nitrates). 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.

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 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 régions intensives du Grand Ouest et du Sud Ouest des régions moins intensives du Grand Est et du Centre (tableau 24).

	Grand Ouest et Sud Ouest	Autres régions
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.

Conclusion

Malgré la diversité des références proposées pour le calcul du bilan azoté des prairies, celle-ci reste dans la plupart des situations observées, comprise 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 sèches 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 ¹⁵N 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)	7,7x1,15 = 8,8	9,6x1,15=11
Exportations (kg N/t MS)	30	30
Exportations	264	330
Fourniture d'azote par le sol	120	140
Restitutions au pâturage	530 JP/ha = 5,3x9 kg N = 48	670 JP/ha = 6,7x9 kg N = 60
Contribution du trèfle blanc	0	0
Total sources d'azote	168	200
Solde d'azote	96	130
CAU	0,7	0,7
solde d'azote à apporter	137	185
Effet direct des engrais de ferme	0	30 m ³ L. porc x4 kg N/m ³ x0,6 = 72
Azote minéral à apporter	140	113
Répartition possible	50 N + 3x30 N	Lisier porc en 1 ^{er} apport puis 3x40 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)	8,6x1,15 = 9,9 (5 t foin, 5 t pâture)	7,7x1,15 = 8,8
Exportations (kg N/t MS)	30 (pâture) et 20 (foin précose)	30
Exportations	250	264
Fourniture d'azote par le sol	110	120
Restitutions au pâturage	330 JP/ha = 3,3x9 kg N = 30	540 JP/ha = 5,4x9 kg N = 50
Contribution du trèfle blanc	0	65
Total sources d'azote	140	235
Solde d'azote	110	30
CAU	0,7	0,7
solde d'azote à apporter	157	45
Effet direct des engrais de ferme	30 m ³ L. porc x4 kg N/m ³ x0,6=72	30 t compost bovin x 3 kg N/tx0,25=18
Azote minéral à apporter	85	25
Répartition possible	1 ^{er} apport lisier porc puis 50/35 N	Sortie d'hiver
Lixiviation "théorique" en hiver (kgN/ha)	10 - 30	20 - 45

Source : Institut de l'élevage

	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	$(630$ UGB.JP20)/24x9 = 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 Keq	$(40 \times 2 \times 0,5)$ = 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 tous 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.

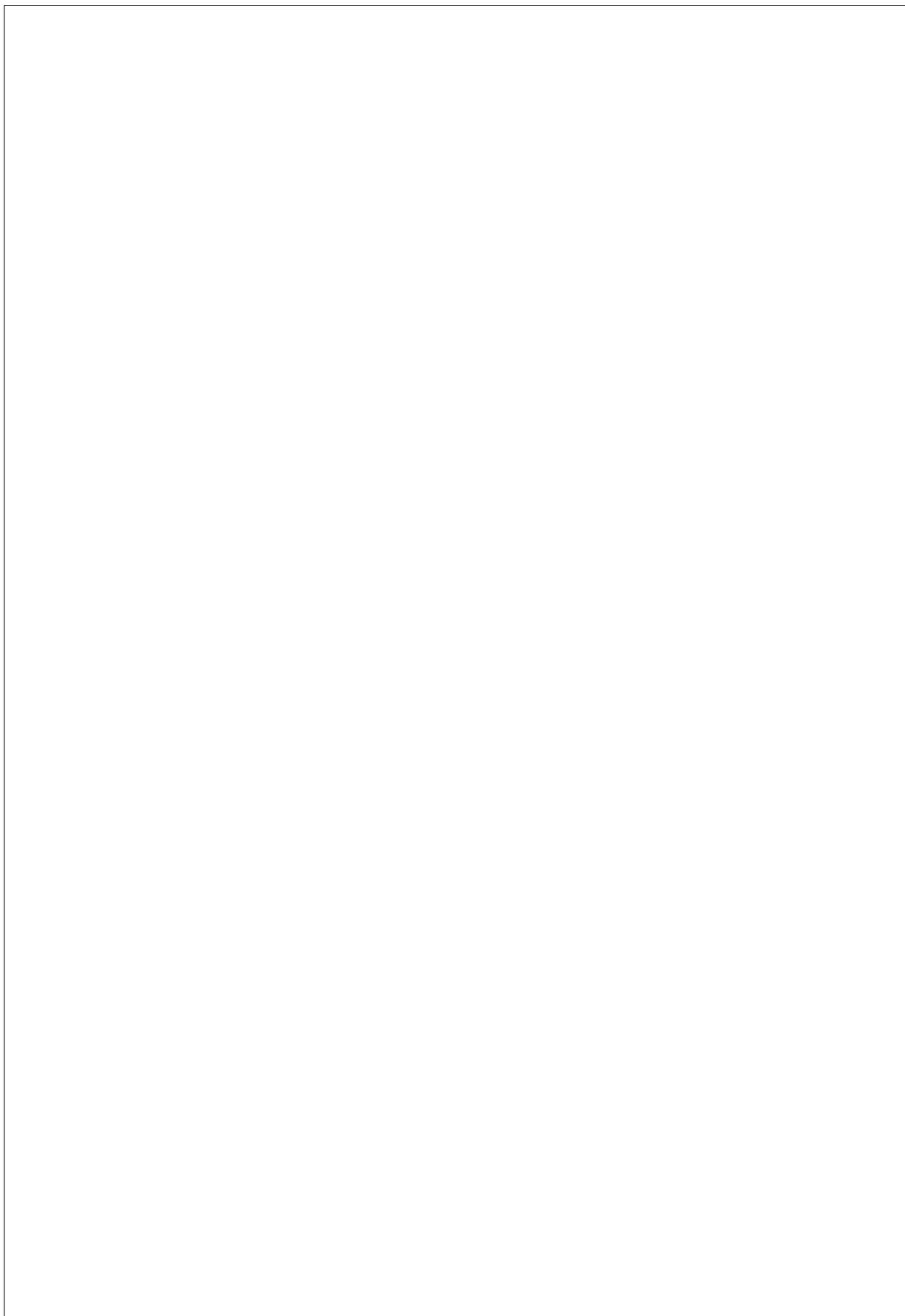
La prescription doit éviter les écueils liés à la motivation des acteurs locaux

- 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

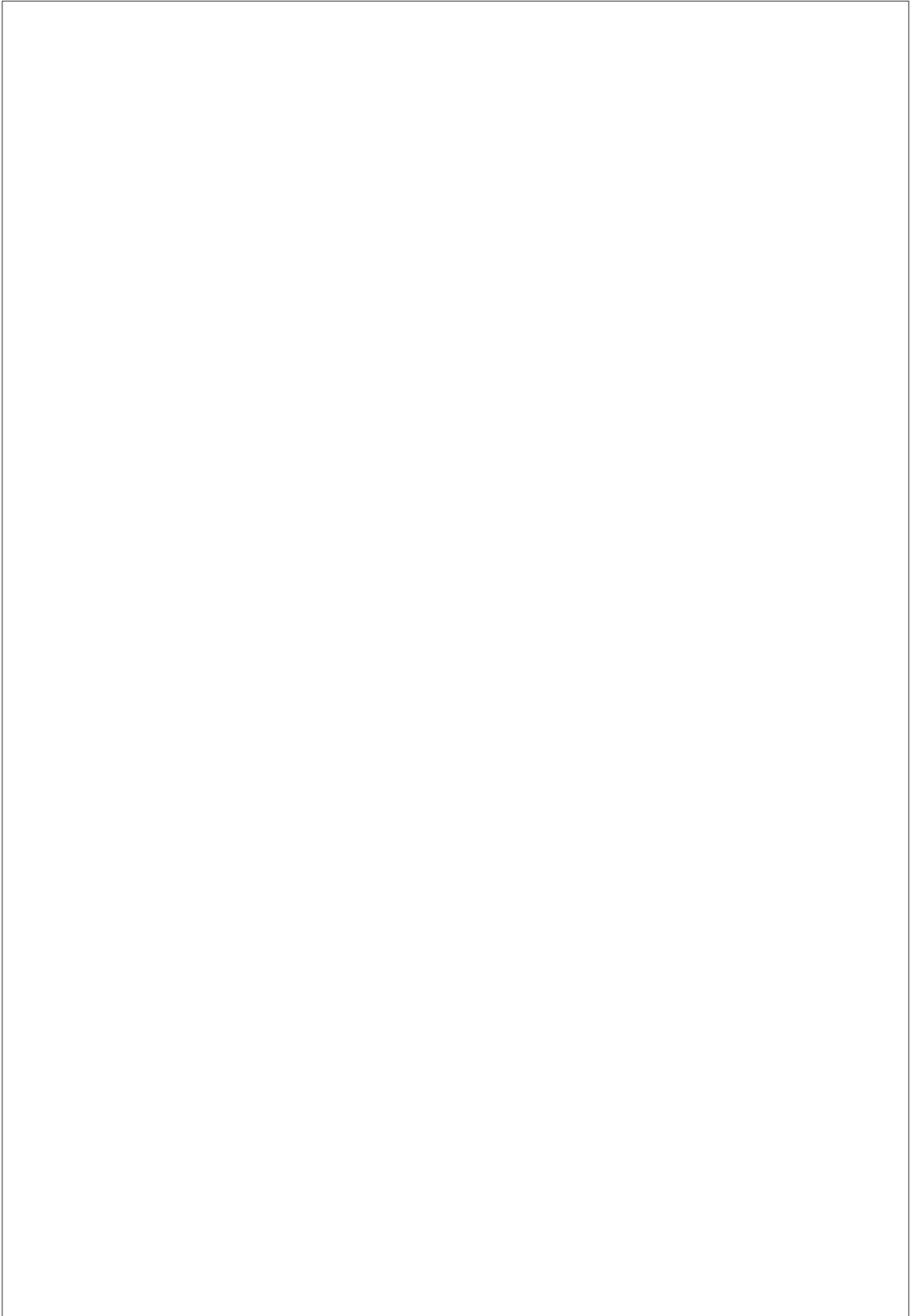
Glossaire**En cours de rédaction**

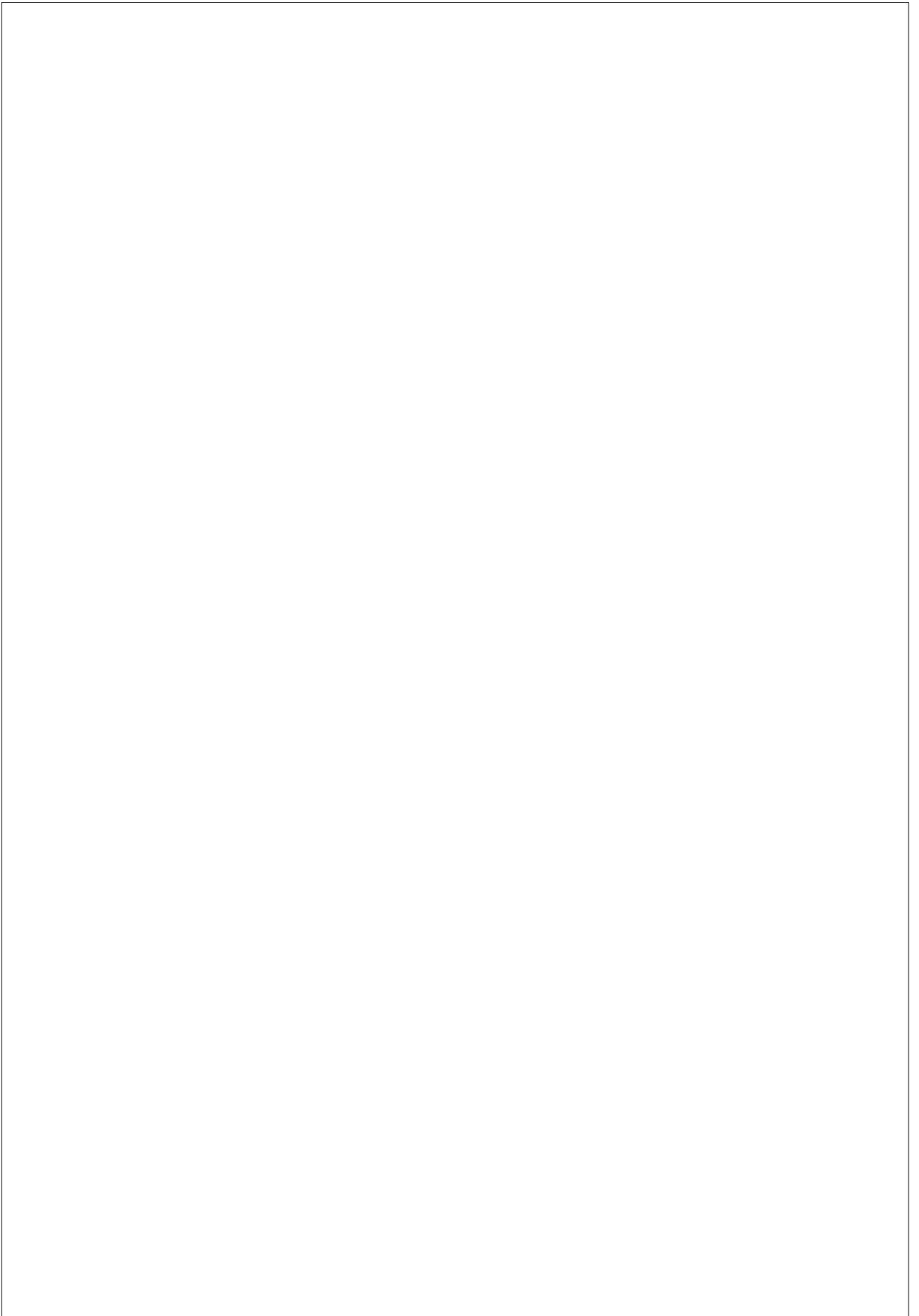


Annexe 1

Fiches de calcul du bilan prévisionnel d'azote par culture

Fiches prochainement disponibles en téléchargement sur le site du COMIFER www.comifer.asso.fr

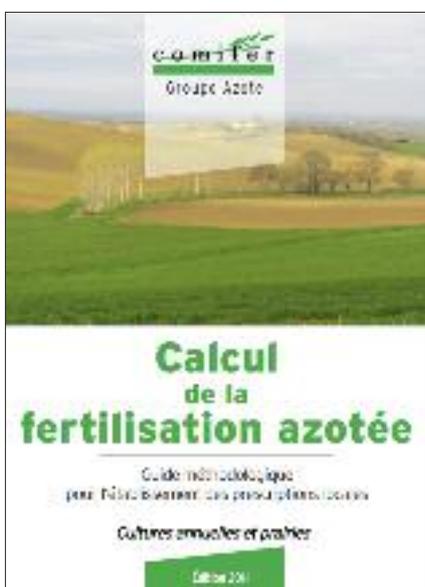




Calcul de la fertilisation azotée

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^{ère} 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 - Mars 2012

ISBN 978-2-910393-09-0



9 782910 393090

Éditions **COMIFER**