

Groupe Azote

**LESSIVAGE DES NITRATES EN SYSTEMES DE CULTURES  
ANNUELLES.**

***DIAGNOSTIC DU RISQUE ET PROPOSITIONS DE GESTION  
DE L'INTERCULTURE***

Ce document a été élaboré dans le cadre du sous groupe "interculture" du Comifer par un ensemble de rédacteurs :

Gérard CATTIN	CA 51 (animateur du groupe)
Laurence GUICHARD	ANDA - Ferti Mieux
Philippe JANNOT	MATE - Secrétariat CORPEN
Eric JUSTES	INRA
François LAURENT	ITCF (animateur du groupe)
Jean-Marie MACHET	INRA

et avec l'appui des personnes suivantes :

Frédérique ANGEVIN	Agrotransfert Poitou Charentes
Robert BLONDEL	CRA Bretagne
René DELOUVEE	Agence de l'eau Seine Normandie
Philippe DESVIGNES	AGPM
Bruno MARY	INRA

Que soient ici remerciés les relecteurs du manuscrit, qui ont permis d'améliorer le fond et la forme du document :

Claude GITTON	(Agence de l'eau Loire Bretagne)
Rémy KOLLER	(ARAA)
Raymond REAU	(CETIOM)
Jean Claude REMY	(ENSAM)
Jean Claude TAUREAU	(Hydro Agri France)

## Table des matières

Introduction .....	4
AVERTISSEMENT .....	4
<u>1<sup>ère</sup> partie : démarche de diagnostic du risque</u> .....	5
1. Problématique.....	5
2. Mécanismes du lessivage.....	7
2.1 Le reliquat d'azote minéral du sol au début du drainage ( $R_{dd}$ ) .....	10
2.2 La minéralisation pendant la phase de drainage.....	12
2.3 Le volume d'eau drainée et le lessivage des nitrates .....	12
3. Diagnostic du risque de lessivage .....	14
3.1 Le risque « culture » .....	14
3.2 Le risque « milieu » .....	17
3.3 Le risque de lessivage.....	18
4. Propositions de gestion de l'interculture .....	19
5. Conclusion .....	21
Pour en savoir plus .....	21
<u>2<sup>ème</sup> partie : cahier technique</u> .....	24
Quantification des différents compartiments et flux d'azote du sol.....	24
1. Le reliquat d'azote minéral début drainage.....	24
1.1 Mesure directe de $R_{dd}$ .....	26
1.2 Calcul du reliquat début drainage .....	27
1.2.1 le "reliquat de fin de culture" ( $R_f$ ).....	28
1.2.2 la minéralisation nette pendant la période d'interculture.....	30
1.2.3 l'azote absorbé par le couvert ( $N_{abs}$ ).....	34
2. La minéralisation pendant la phase de drainage .....	38
3. Le volume d'eau drainée .....	38
annexe : Drainage et lessivage avec le modèle LIXIM .....	40

## Introduction

Ce document propose dans une première partie une démarche de diagnostic pour apprécier les risques de pertes d'azote à l'échelle d'un secteur géographique délimité (bassin d'alimentation, périmètre de protection éloigné, petite région agricole, bassin de collecte...). Il structure les propositions de gestion de l'interculture à l'échelle de la parcelle en tenant compte de la diversité des risques rencontrés sur le secteur géographique étudié. La démarche s'inspire des travaux de Sebillotte et Meynard (1990), repris par Lanquetuit et Sebillotte (1997).

Après un rappel des mécanismes du lessivage des nitrates, le document détaille dans une première partie un diagnostic en 3 étapes :

La première étape préalable est l'identification des " situations types " sur le secteur géographique choisi. Par ce terme, on entend une succession de cultures, conduite de manière homogène (conduite la plus fréquente), sur un milieu donné.

La deuxième étape consiste à déterminer le niveau de risques de pertes d'azote de chaque situation type rencontrée.

La troisième étape propose pour chaque situation type un ensemble de moyens d'action à mettre en œuvre par chaque agriculteur pour une meilleure efficacité environnementale collective.

Réalisé dans un premier temps sur une année "moyenne", ce diagnostic de risques permet de dégager les solutions techniques de gestion de l'interculture les plus efficaces par situation type. Il pourra aisément être affiné en fonction des conditions particulières d'une année et conduire à assouplir ou à l'inverse à renforcer certaines propositions d'actions.

Il est proposé en seconde partie des éléments permettant de quantifier les différents postes à l'origine des flux d'azote, présenté sous forme d'un "cahier technique" : cette partie est donc volontairement redondante avec la première puisqu'elle se propose de quantifier les flux abordés de façon "qualitative" en première partie.

### **AVERTISSEMENT**

La première partie du document propose une démarche générale d'identification du risque de lessivage de l'azote. Elle s'appuie notamment sur des critères (durée sans absorption d'azote par le couvert, caractéristiques des résidus, capacité d'absorption d'azote avant le début du drainage...) que nous avons illustrés par des exemples concrets : il appartient au lecteur d'adapter éventuellement les caractéristiques des critères proposés aux connaissances locales.

# 1<sup>ère</sup> partie : démarche de diagnostic du risque

## 1. Problématique

L'interculture, laps de temps entre deux cultures principales, est une période pendant laquelle plusieurs processus d'accumulation et de transfert d'azote se combinent : c'est à ce moment que se manifestent les risques de fuites de nitrates vers les eaux.

Ces fuites ont lieu principalement en période automnale et hivernale. Durant cette période se conjuguent 3 phénomènes qui concourent à ces pertes d'azote :

- un excédent pluviométrique contribuant à l'infiltration, c'est la lame d'eau drainante ;
- une présence d'azote dans le sol sous forme nitrique : le reliquat d'azote à la récolte de la culture qui comprend la part des fournitures du sol non absorbées par la culture et une partie des excédents éventuels de fertilisation, la minéralisation depuis la récolte, et les éventuels apports d'effluents organiques ;
- l'absence de couverts végétaux susceptibles d'utiliser l'azote présent ou des couverts végétaux avec de faibles capacités d'absorption.
- enfin d'éventuels apports d'azote provenant le plus souvent d'épandage d'effluents (effluents d'élevage, eaux usées, boues, vinasses,...)

Minimiser la quantité d'azote nitrique dans le sol avant la reprise du drainage permet de limiter les pertes de nitrates au cours de cette période de drainage. Une gestion adaptée de la fertilisation sur la culture précédente est toujours nécessaire. Cependant elle se révèle insuffisante dans de nombreux cas. La solution réside alors dans une meilleure maîtrise de l'azote en période d'interculture.

L'eau en excès durant la période de drainage entraîne partiellement le stock d'azote nitrique présent dans le sol à cette période. La concentration en nitrate de cette lame drainante est le rapport entre la quantité d'azote lessivée sur la période et le volume de la lame. Ainsi, le lessivage de 30 kg N/ha par une lame drainante de 220 mm conduit à une concentration en nitrates de l'eau de 60 mg/l. Dans la plupart des cas, les quantités lessivées sont faibles comparativement aux quantités mises en jeu pour assurer la nutrition azotée d'une culture. **Ne pas polluer exige donc une très grande précision dans la gestion de l'azote.**

- " Ne pas polluer " peut être traduit schématiquement par " que l'eau qui percole sous les racines ne dépasse pas une concentration donnée ". Il devient alors possible de calculer des pertes d'azote maximales par lessivage qui respectent cet objectif. Le tableau 1 illustre ce constat pour un objectif de concentration en nitrates de l'eau de 50 mg/l.

**tableau 1 : hypothèses de lessivage acceptable pour une eau qui percole à 50 mg NO<sub>3</sub>/l<sup>1</sup>**

Pluviométrie hivernale (mm)	Type de sol	Lame drainante (mm)	Quantité d'azote lessivé conduisant à 50 mg/l (kg N/ha)	Reliquat Début Drainage (kg N/ha) conduisant à une concentration de 50 mg/l
moyenne	profond	100	11	<b>28</b>
	superficiel	200	22	<b>31</b>
élevée	profond	300	33	<b>46</b>
	superficiel	400	45	<b>51</b>

Sous une même pluviométrie hivernale la lame drainante et le lessivage qu'elle entraîne sont variables en fonction de la profondeur du sol. Pour des reliquats début drainage sensiblement égaux (46 contre 51 ou 28 contre 31), les pertes d'azote sont plus importantes en sol superficiel. Pour autant elles génèrent dans ces situations une concentration de 50 mg NO<sub>3</sub>/l (effet de dilution).

#### **Concentration ou quantité lessivée ?**

A l'échelle d'un bassin d'alimentation, la concentration en nitrate de l'eau percolée sous les racines doit être compatible avec les objectifs de qualité de l'eau. Cette concentration est le résultat de la dilution d'une quantité d'azote lessivée dans un volume d'eau drainé.

Le levier d'action accessible à l'agriculture est la limitation des pertes d'azote par lessivage, en minimisant le reliquat début drainage.

Le volume d'eau drainé est pris en compte dans la démarche de diagnostic proposée à travers le risque "milieu" (chapitre 3.2).

La « marge de manœuvre » sur le reliquat début drainage acceptable dépend donc amplement du milieu (sol \* climat). Extrêmement faible pour des sols superficiels sous un climat peu pluvieux, elle augmente en cas d'automne et d'hiver très pluvieux par effet de dilution.

Cette variabilité des situations agricoles en terme de risque et de marge de manœuvre donne toute son importance à la notion de secteur géographique. Cette échelle d'espace permet d'envisager une compensation des risques entre situations. L'objectif recherché de qualité d'une ressource en eau doit privilégier la mise en place d'actions de gestion de l'interculture sur les situations où ces marges de manœuvre sont suffisantes ; il n'est pas forcément nécessaire de rechercher à limiter les fuites de nitrate dans toutes les situations par une adaptation de la gestion de l'interculture.

Aussi, si le diagnostic des risques proposé, comme les solutions, s'appliquent à l'échelle des situations types, il est important de discuter le choix des solutions à l'échelle du secteur concerné par la ressource en eau en tenant compte des compensations entre situations types.

<sup>1</sup> Ce tableau a été construit avec les hypothèses suivantes :

- la totalité du reliquat début drainage est potentiellement lessivable et répartie uniformément dans un sol homogène ayant une capacité de rétention de l'eau de 20%
- la minéralisation hivernale ne contribue pas au lessivage

La "quantité d'azote lessivé conduisant à 50 mg/l" est égale au produit de la lame drainante par la concentration de 50 mg NO<sub>3</sub>/l (et divisé par 4,43 pour la conversion N en NO<sub>3</sub>). Le "Reliquat Début Drainage" est calculé en appliquant le modèle LIXIM (voir page 40).

L'évaluation et la hiérarchie des risques de pertes de nitrates selon les situations types est réalisée pour une année climatique « moyenne » (analyse fréquentielle du climat) ou d'occurrence connue (année-type). Cela permet d'en déduire des actions différenciées à mettre en œuvre selon le niveau de risques pour ce type d'année.

On peut ajuster annuellement ces propositions d'actions : par exemple, si l'année a été défavorable à l'obtention des rendements objectifs visés pour une culture, le reliquat d'azote à la récolte est potentiellement plus élevé ; la gestion de l'interculture est alors primordiale. Il faut, par exemple, recommander l'implantation d'une culture intermédiaire piège à nitrates dans des situations types pour lesquelles ce n'était pas nécessaire en situation « moyenne ».

## 2. Mécanismes du lessivage

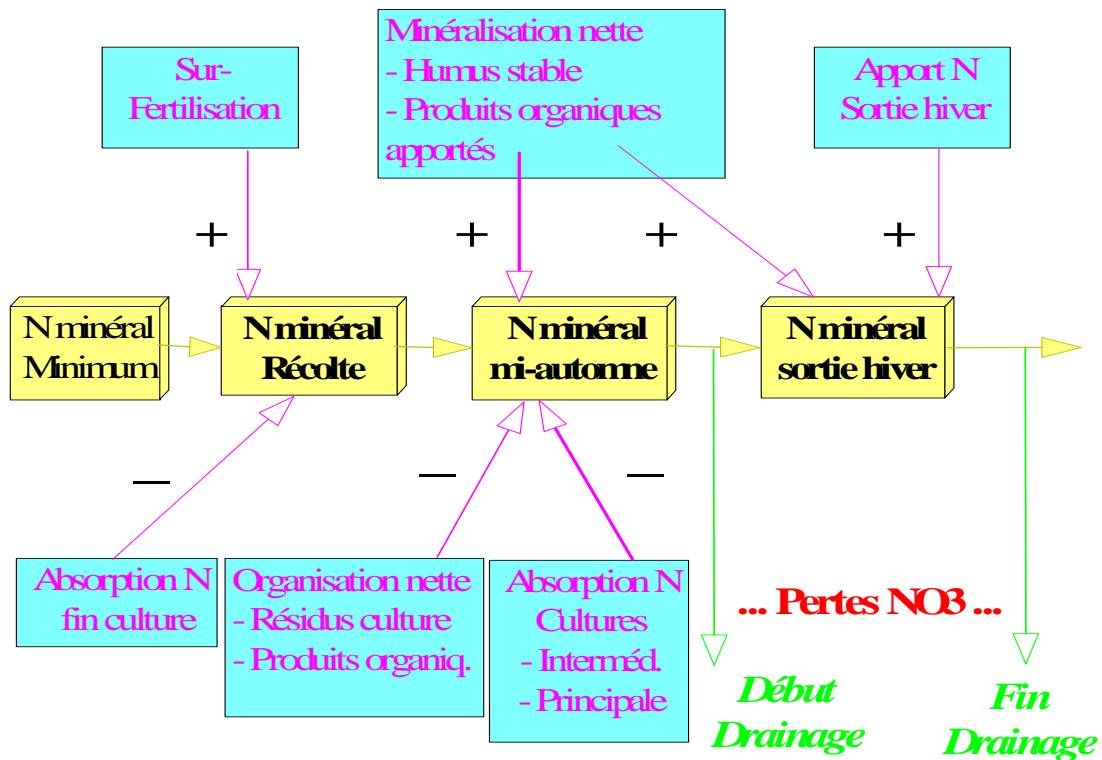
A la récolte, de l'azote nitrique est présent dans le sol. Sa quantité dépend essentiellement de l'espèce cultivée, de l'itinéraire technique conduit sur la parcelle, du sol et des conditions climatiques. L'évolution de ce stock d'azote minéral pendant la période automnale est le résultat net de :

- mécanismes de minéralisation, à l'origine d'une **augmentation du stock d'azote nitrique** : minéralisation de l'humus de la matière organique, minéralisation des résidus riches en azote fermentescible, minéralisation de l'azote organique des effluents d'élevage ou produits organiques (boues de station, vinasses...),
- mécanismes à l'origine d'une **diminution de ce stock** : organisation des résidus de récolte, absorption d'azote éventuelle par un couvert en place (implanté ou repousses).

La figure 1 illustre les différents compartiments d'azote du sol entrant en jeu depuis la récolte jusqu'à la fin du drainage : augmentation du stock (+) et diminution (-).

L'azote minéral au début du drainage est soumis au drainage hivernal entraînant un lessivage en profondeur d'une partie du compartiment minéral hors de portée des racines de la culture suivante.

figure 1 : les compartiments d'azote minéral du sol en jeu depuis la récolte jusqu'à la fin du drainage



Les contributions de ces différents processus à l'évolution de l'azote minéral sont diverses, tant dans les quantités mises en jeu que dans les périodes concernées. La figure 2 illustre de manière simplifiée ces mécanismes dans deux situations différentes :

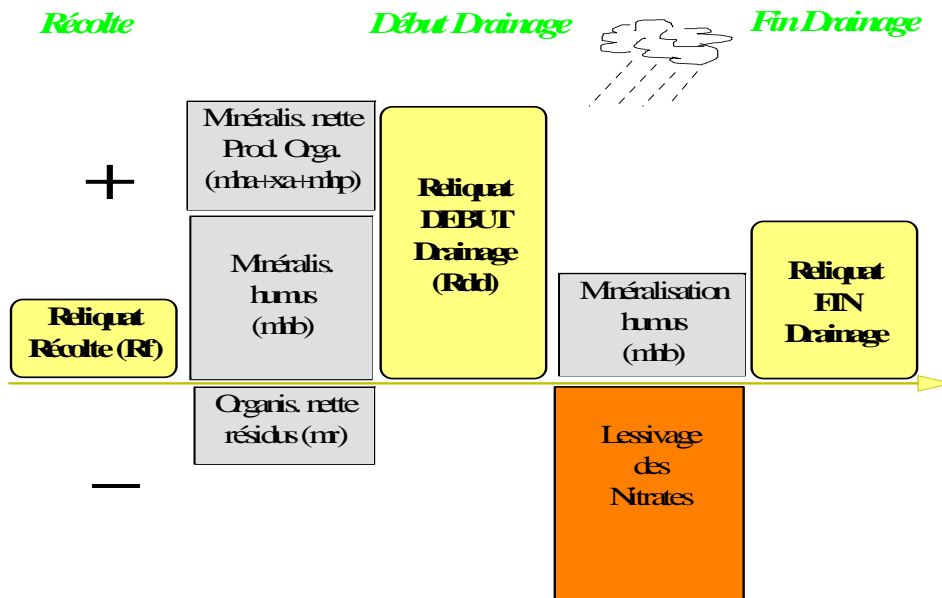
- sous sol nu,
- sous culture intermédiaire.

figure 2 : Schémas simplifiés d'évolution du stock d'azote du sol en interculture<sup>2</sup>

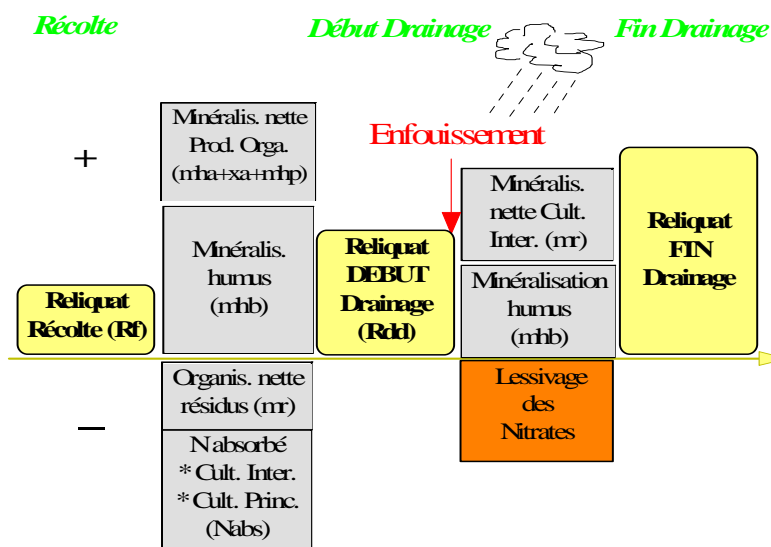
rectangles jaunes : quantité d'azote nitrique présent dans le sol à des dates clés  
rectangles gris et orange : mécanismes

Dans ces schémas, par souci de simplification, la minéralisation des résidus de culture et des produits organiques n'est figurée que sur la phase qui précède le drainage, bien qu'ils puissent se poursuivre sur toute la période

-a- sous sol nu



-b- avec culture intermédiaire



<sup>2</sup> on adopte autant que faire se peut un principe de codification similaire à celui utilisé pour les termes du bilan azoté prévisionnel (Comifer, 1996 : *calcul de la fertilisation azotée des cultures annuelles*). Par convention, nous utiliserons des minuscules pour les flux d'azote en interculture :  $m_{hb}$  à la place de  $M_{hb}$  par exemple.

La quantité d'azote lessivée (lessivage) dépend de trois variables :

- le reliquat d'azote minéral du sol au début du drainage,
- la minéralisation entre le début et la fin du drainage, ainsi que les éventuels apports de fertilisants azotés
- le volume d'eau drainée.

## 2.1 Le reliquat d'azote minéral du sol au début du drainage ( $R_{dd}$ ).

Son estimation résulte de la quantité d'azote minéral du sol à la récolte du précédent cultural ( $R_f$ ), augmenté de la minéralisation nette apparente des matières organiques du sol entre la récolte du précédent et le début drainage. Peuvent aussi s'ajouter les effets directs des apports organiques et se retrancher l'azote absorbé par un couvert végétal.

Cette estimation s'écrit sous la forme de l'équation suivante :

$$R_{dd} = R_f + (m_{hb} + m_r + m_{ha} + m_{hp}) + x_a - N_{abs}$$

Le tableau 2 illustre les différents termes de l'équation (symboles et facteurs de variation).

- Le reliquat de fin de culture ( $R_f$ )

C'est la quantité d'azote présente à la récolte sous forme minérale, sur la profondeur d'enracinement. Son origine est liée à une exploitation partielle de l'azote minéral du sol par le système racinaire de la culture en place. Le risque est à prendre en compte sur la profondeur de sol exploitée par la culture suivante, seule capable d'intercepter l'azote minéral du sol.

Plusieurs mécanismes peuvent expliquer la grande variabilité de ce terme :

- le volume de sol affecté par l'activité racinaire, notamment en profondeur. On peut ainsi observer des quantités d'azote importantes dans le cas d'enracinements limités en profondeur lié soit à un effet de l'espèce (pomme de terre, pois ...) soit du sol (obstacle physique, rupture texturale, état structural...);
- l'excès de fertilisation azotée par rapport à la dose nécessaire à l'obtention du rendement potentiel de l'année;
- le décalage des cinétiques de minéralisation des matières organiques et d'absorption d'azote par la plante, notamment en fin de cycle végétatif.

- La minéralisation des matières organiques du sol ( $m_{hb} + m_r + m_{ha} + m_{hp}$ )

Plusieurs compartiments d'azote organique sont impliqués dans le processus de minéralisation observable dans les intercultures.

Dans tous les systèmes de culture (avec ou sans élevage), deux compartiments sont à considérer :

- la matière organique humifiée :  $m_{hb}$  quantifie la minéralisation "basale" de cet azote humifié.
- les résidus de culture dont la minéralisation nette est appréciée par  $m_r$ .

Le tableau 2 illustre les facteurs et conditions de milieu pouvant faire varier les quantités d'azote minéralisées en provenance de la décomposition de ces compartiments (entre récolte et début drainage).

**tableau 2 : les différents termes du reliquat début drainage (Rdd)**

terme du bilan	facteurs de variation
reliquat fin de culture <b>(R<sub>f</sub>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>climat de fin de cycle (irrigation)</li> <li>culture</li> <li>fumure azotée et niveau de rendement</li> <li>historique des apports organiques</li> <li>type de sol</li> </ul>
minéralisation basale de la matière organique humifiée <b>(m<sub>hb</sub>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>climat : température, pluviométrie</li> <li>fréquence des restitutions organiques</li> <li>travail du sol</li> <li>sol : teneur en matière organique, texture, teneur en CaCO<sub>3</sub></li> </ul>
minéralisation nette des résidus de culture <b>(m<sub>r</sub>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>climat : température, humidité</li> <li>date d'incorporation</li> <li>mode d'incorporation (travail du sol)</li> <li>quantité de résidu et teneur en azote (et nature biochimique du résidu)</li> <li>quantité d'azote minéral dans le sol au moment de l'incorporation</li> </ul>
supplément de minéralisation dû aux apports réguliers de matières organiques <b>(m<sub>ha</sub>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>climat : température</li> <li>nature du produit</li> <li>quantité d'azote apportée et fréquence d'apport</li> <li>restitution des résidus de culture</li> </ul>
effet direct des apports organiques en automne - hiver <b>(x<sub>a</sub>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>climat : température (vent : volatilisation)</li> <li>quantité d'azote apporté et nature du produit</li> </ul>
supplément de minéralisation dû aux retournements de prairies <b>(m<sub>hp</sub>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>âge et type de prairie et ancienneté de retournement</li> <li>mode de conduite : fauche/pâturage, fertilisation azotée</li> </ul>
azote absorbé par un couvert végétal <b>(N<sub>abs</sub>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>disponibilité en azote minéral du sol</li> <li>capacité de croissance des parties aériennes</li> </ul>

- l'azote absorbé par le couvert (N<sub>abs</sub>) : que ce soit par une culture principale nouvellement implantée, par les repousses de la culture précédente, ou par une culture intermédiaire piège à nitrate

Par ailleurs les systèmes d'élevage et certains systèmes de culture recyclant des matières organiques produites à l'extérieur de l'exploitation sont concernés par d'autres sources d'azote minéral :

- la minéralisation des amendements organiques : selon la fréquence et la nature des apports, il sera nécessaire de comptabiliser d'une part les effets directs liés à des épandages l'année même (**x<sub>a</sub>**) et/ou les arrières effets imputables aux apports opérés pendant les années antérieures (**m<sub>ha</sub>**). Des pratiques de restitution systématique des

résidus de culture peuvent limiter ces effets par l'augmentation des flux d'organisation liés à leur décomposition.

- l'effet des retournements de prairies ( $m_{hp}$ ). Les prairies organisent des grandes quantités d'azote en raison de l'importance du renouvellement racinaire et de la sénescence des parties aériennes restituées au sol (Recous et al. 1997). Leur retournement, provoque un arrêt des flux d'organisation et donc une minéralisation nette élevée. A priori, cet effet est d'autant plus élevé que la prairie est âgée, son mode d'exploitation dominé par la pâture, et son retournement récent. Des essais récents montrent néanmoins l'effet dominant des conditions climatiques et historiques de la parcelle sur les modes de gestion antérieurs de la pâture.

## **2.2 La minéralisation pendant la phase de drainage**

Les conditions climatiques jouent de façon majeure sur les vitesses de minéralisation des matières organiques du sol. Deux facteurs sont dominants : la température et l'humidité du sol.

On ne peut donc pas parler "d'arrêt" de minéralisation sous l'effet de faibles températures (pas d'effet de seuil) : le processus est permanent dans toutes les situations culturales et doit être pris en compte. Dans les régions ayant des températures hivernales basses, cette minéralisation est relativement faible et peut être négligée, notamment vis à vis du diagnostic de lessivage. Par contre en climat hivernal doux, il est important de prendre en compte ce supplément de minéralisation dans l'évaluation du risque.

En phase de drainage, quand le sol est saturé d'eau (conditions d'anaérobie), il peut se produire de la dénitrification. Compte tenu des faibles quantités d'azote mises en jeu, ce processus n'a pas été pris en compte.

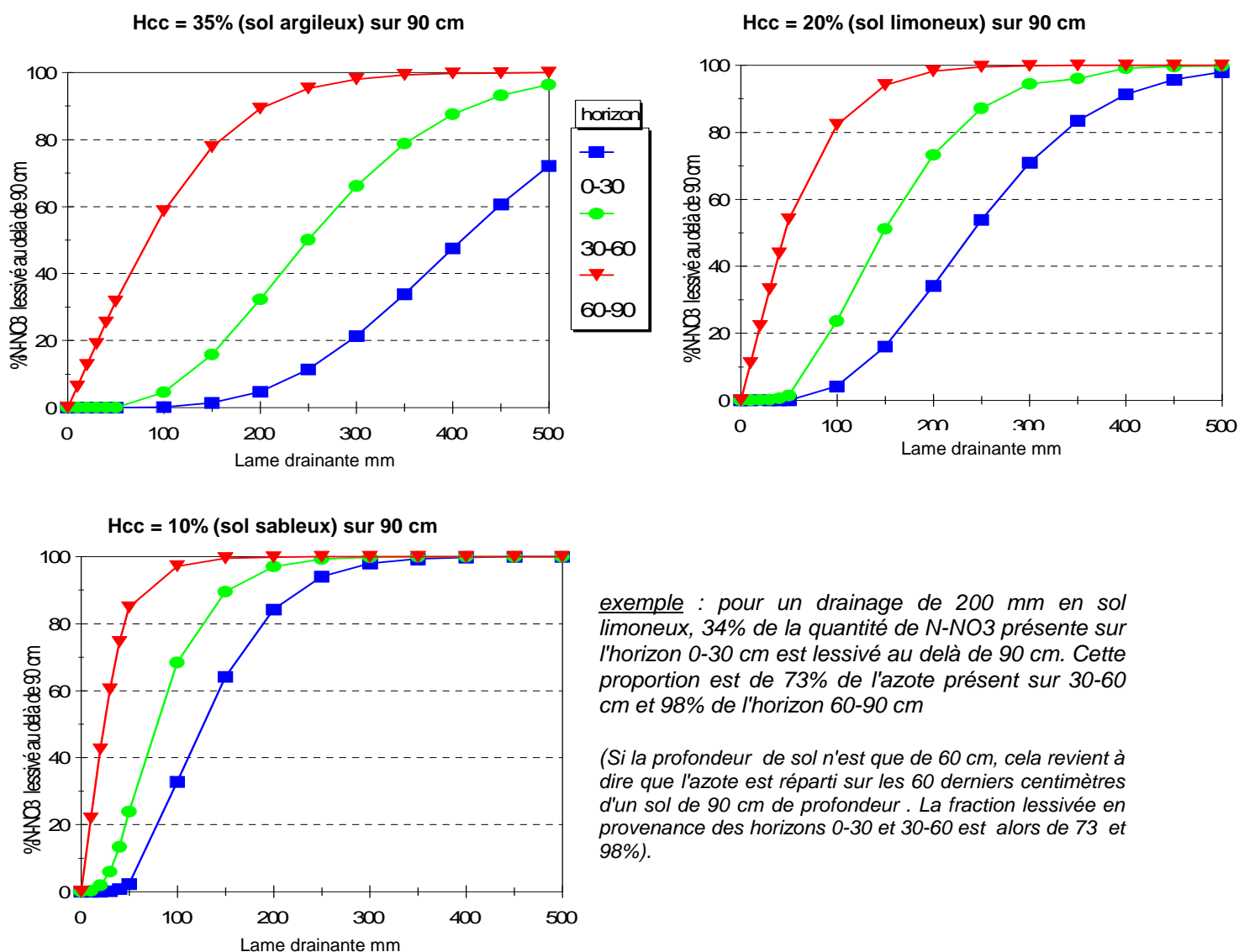
## **2.3 Le volume d'eau drainée et le lessivage des nitrates**

Le volume d'eau drainée est le "moteur" de l'entraînement du nitrate en profondeur. Son estimation se fait à partir des données climatiques fréquentielles (pluviométrie et ETP) entre la date de récolte de la culture et la fin du drainage.

Le lessivage peut alors être apprécié à partir d'abaques (figure 3) issues du modèle LIXIM (voir annexe du cahier technique page 40). Il s'applique aux sols pour lesquels on néglige les écoulements préférentiels liés à des fentes de retrait, ou les transferts latéraux (discontinuités structurales).

(A noter que les épandages d'eaux usées peuvent contribuer au lessivage non seulement par leur contenu en azote mais aussi par l'augmentation de la lame d'eau drainée)

figure 3: abaques d'estimation du lessivage des nitrates au delà d'une profondeur de 90 cm pour trois types de sol à la capacité au champ (source : LIXIM, voir annexe)



*exemple : pour un drainage de 200 mm en sol limoneux, 34% de la quantité de N-NO3 présente sur l'horizon 0-30 cm est lessivé au delà de 90 cm. Cette proportion est de 73% de l'azote présent sur 30-60 cm et 98% de l'horizon 60-90 cm*

*(Si la profondeur de sol n'est que de 60 cm, cela revient à dire que l'azote est réparti sur les 60 derniers centimètres d'un sol de 90 cm de profondeur . La fraction lessivée en provenance des horizons 0-30 et 30-60 est alors de 73 et 98%).*

*Si le sol présente une texture hétérogène, il faut estimer la capacité de rétention moyenne sur l'ensemble du profil en appréciant la capacité au champ de chaque horizon. On choisit alors l'abaque correspondant à la valeur la plus proche de la valeur estimée.*

Il apparaît clairement qu'il importe de réduire autant que possible la quantité d'azote nitrique présente dans le dernier horizon. Cette quantité est moins rapidement accessible aux racines des couverts végétaux (par ailleurs la gestion des résidus de culture est sans effet sur elle), il importe donc que la conduite de la culture vise à la réduire autant que possible (calendrier des apports minéraux par rapport aux périodes d'absorption et aux événements climatiques, conduite de l'irrigation...)

Les critères pris en compte dans la démarche de diagnostic du risque de lessivage présentée dans la suite s'appuient sur les mécanismes de lessivage qui viennent d'être décrits.

### 3. Diagnostic du risque de lessivage

L'objectif de la démarche est de classer les situations types en fonction des risques de fuite de nitrates en profondeur, puis de repérer celles qui nécessitent d'agir en interculture. Caractériser les situations types revient donc à décrire les éléments déterminants de ces deux termes vis à vis du risque de lessivage de l'azote nitrique. Le premier terme caractérise la pression de pollution et le second la sensibilité du milieu.

La nature de l'action à mettre en œuvre dépend des résultats de ce diagnostic : elle peut concerner le travail du sol, la gestion des résidus de la culture précédente, la mise en place d'un couvert intermédiaire piège à nitrate ou la modification de la culture suivante envisagée.

Il y a donc nécessité d'une démarche simple de mise en œuvre, qui permette de manière rapide (après la récolte) de discriminer les différentes situations repérées, laissant ainsi suffisamment de temps pour l'action.

La durée de l'interculture, plus ou moins longue, conditionne les possibilités d'actions correctrices mais ne préjuge pas à elle seule du niveau de risque, dépendant d'autres facteurs, comme :

- le type sol. Par exemple dans les sols très filtrants les nitrates sont lessivés plus rapidement que la vitesse des processus biologiques susceptibles de les intercepter (organisation microbienne, absorption par un couvert). Les possibilités d'actions correctrices en sont fortement diminuées.
- la date de récolte. Derrière une récolte tardive (maïs grain, betterave) l'absorption et l'organisation microbienne sont ralenties sous l'effet des faibles températures.

A titre d'exemple, on peut distinguer différents types d'interculture selon leur durée et les marges de manœuvre qui en découlent :

- très courte, moins de 20 jours : betterave - blé d'hiver, maïs grain - blé d'hiver. La marge de manœuvre est extrêmement faible,
- courte, de 20 à 60 jours : pois protéagineux - blé d'hiver, céréales - colza d'hiver, colza – céréales d'hiver, maïs ensilage – céréales d'hiver, tournesol - blé. La marge de manœuvre est assez faible du fait du semis d'une culture d'automne,
- longue, de 120 à 150 jours : maïs grain - cultures de printemps, soja – culture de printemps. Compte tenu de la récolte tardive, les solutions techniques sont plus difficiles à mettre en œuvre,
- très longue, de 200 à 240 jours : céréales - cultures de printemps. Les possibilités d'actions sont alors nombreuses.

De plus, la période de drainage n'est pas toujours totalement superposable à cette stricte période d'interculture. On peut en effet observer des transferts d'eau en profondeur pendant les phases de faible transpiration du couvert : c'est le cas sous cultures d'hiver telles les céréales, voire le colza.

#### 3.1 Le risque « culture »

La caractérisation des principaux couples "précédent/suivant" permet une hiérarchisation simplifiée de ces situations vis-à-vis du risque d'excès potentiel d'azote qu'elles entraînent. Les principaux critères pris en compte (tableau 3) sont :

- La durée de la période sans absorption notable d'azote par un couvert végétal. Elle s'étend de la fin d'absorption d'azote par la culture précédente au début d'absorption par la suivante. Elle peut donc débiter avant la date de récolte d'une culture si celle-ci stoppe précocement son absorption : cela peut être le cas notamment de la pomme de terre (le défanage précède l'arrachage de quelques semaines) ou du maïs grain, contrairement à la betterave ou aux graminées prairiales. De la même façon, elle finit après l'implantation de la culture suivante, notamment pour les cultures s'implantant lentement (céréales d'hiver).

- La teneur en azote et la quantité de biomasse des résidus de récolte ainsi que leur mode de gestion. Ces caractéristiques sont déterminantes vis à vis des possibilités d'organisation de l'azote minéral du sol lors de leur décomposition.
- La capacité d'absorption d'azote à l'automne de la culture suivante. Nulle dans le cas d'un sol nu, cette caractéristique peut être très élevée pour le colza d'hiver ou une prairie temporaire implantés tôt.
- La présence ou non d'apports organiques réguliers ou fréquents.

Deux hypothèses sous-tendent le raisonnement :

- Il n'y a pas d'excès de fertilisation azotée de la culture précédente générant une augmentation excessive du reliquat après récolte ;
- les couples cultures concernent des cultures annuelles : une analyse particulière est nécessaire en cas de retournement d'un couvert de moyenne ou longue durée (prairie, luzerne,...).

La durée calendaire de l'interculture n'a donc pas été prise en compte directement dans les critères de caractérisation du risque. Par contre, elle intervient pour éclairer la marge de manœuvre dont on dispose pour agir (implantation de culture intermédiaire, gestion des résidus de récolte).

**tableau 3 : critères décrivant le couple "précédent/suivant" et risque « culture » associé**  
(exemple avec 5 classes de risque)

**Caractéristiques du couple « précédent / suivant »**

Durée sans absorption d'azote	Résidus de culture : quantité de biomasse et %N	Capacité d'absorption d'azote avant le début du drainage	Apports organiques à l'automne	Risque « culture »
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Très courte</li> <li>• Courte</li> <li>• Longue</li> <li>• Très longue</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quantité importante et %N faible (pailles de céréales, maïs, tournesol,...)</li> <li>• Quantité moyenne et %N faible</li> <li>• Quantité faible et %N faible (chaumes de céréales,...)</li> <li>• Quantité faible et %N élevé (pomme de terre, légumes de plein champ, betterave,...)</li> <li>• Quantité moyenne et %N élevé (pois, soja...)</li> <li>• Quantité importante et %N élevé (colza, luzerne, pâtures,...)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forte (colza d'hiver, CIPAN<sup>3</sup>)</li> <li>• Faible (céréale d'hiver)</li> <li>• Nulle (sol nu)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non</li> <li>• Oui : C/N &gt;8</li> <li>• Oui : C/N &lt;8</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Très faible</li> <li>• Faible</li> <li>• Modéré</li> <li>• Elevé</li> <li>• Très élevé</li> </ul>

La combinaison exhaustive de l'ensemble des modalités des quatre premières colonnes du tableau 3 débouche sur un nombre de combinaisons qui n'est pas opérationnel. Il est nécessaire localement de ne retenir que les couples précédent/suivant les plus courants ou probables (surfaces concernées) : le tableau 4 en est un exemple, hors effet des apports organiques.

<sup>3</sup> CIPAN : acronyme de Culture Piège à Nitrates

**tableau 4 : exemple de diagnostic du risque « culture » hors effet des apports organiques.**

exemple de couple précédent/suivant	Durée de la période sans absorption d'azote par un couvert végétal	Résidus de culture du précédent		Capacité d'absorption d'azote à l'automne par la culture suivante	Risque « culture »
		quantité biomasse	%N		
Betterave – blé	Très courte	+	+++	+	<b>faible</b>
Maïs grain – blé		+++	+	+	<b>modéré</b>
Blé (pailles exportées) - colza	Courte	+	+	++ à +++ (1)	<b>très faible à faible</b>
Blé (pailles enfouies) - colza		+++	+	++ à +++ (1)	<b>très faible à faible</b>
Tournesol – blé		++	+	+	<b>modéré</b>
Colza (sans repousses) - blé	Longue	+++	++	+	<b>modéré à élevé</b>
Pois - blé		++	++	+	
Blé (pailles enfouies) - blé		+++	+	+	<b>modéré</b>
Pomme de terre - blé		+	++	+	<b>élevé</b>
Epinard - blé		++	+++	+	<b>très élevé</b>
Blé (pailles enfouies) - culture printemps (maïs, pois, tournesol)	Très longue	+++	+	0	<b>très élevé</b>
Haricot flageolet - maïs		++	++	0	<b>très élevé</b>
Maïs grain - maïs		+++	+	0	<b>élevé</b>

(1) très faible à faible selon la date de levée du colza et sa croissance ultérieure

Par ailleurs, le risque **supplémentaire** lié aux apports de matière organique se fait de la façon suivante :

1. Système avec apport régulier MO : +1 classe de diagnostic si la durée sans absorption d'azote est longue à très longue
2. Si apport MO à C/N<8 à l'automne l'année en cours : +1 classe.
3. Ces deux effets se cumulent : par exemple, un apport régulier de matières organiques et un apport à l'automne de matières organiques à C/N<8 provoquent une augmentation de deux classes du risque lié au couple précédent/suivant.

### 3.2 Le risque « milieu »

Il s'agit de faire l'inventaire des principales situations pédoclimatiques rencontrées et de les classer selon leur sensibilité aux pertes de nitrates : on définit alors un risque lié au milieu physique (sol x climat).

Cette caractérisation se fait par la combinaison de deux critères permettant de définir des classes de risque « milieu » (tableau 6) :

- **l'indice de drainage ID (CORPEN, 1991) lié à l'excès pluviométrique pendant la période de drainage. Il est égal au rapport entre le volume d'eau drainée et la capacité de stockage en eau du sol.** Celle-ci correspond au volume d'eau présent sur le profil de sol à une humidité égale à la capacité au champ (tableau 5).
- la teneur en matière organique de la couche minéralisante du sol. De manière générale, une teneur en MO élevée accroît la minéralisation pendant la période de drainage (et donc le risque de lessivage).

**tableau 5: capacité de stockage en eau du sol (mm) selon la texture dominante, la profondeur d'enracinement et la charge volumique en cailloux**

	Profondeur d'enracinement de la culture suivante								
	faible : 35 cm			intermédiaire : 70 cm			élevée : 100 cm		
	Charge volumique en cailloux (%)			Charge volumique en cailloux (%)			Charge volumique en cailloux (%)		
Texture dominante	0	0 à 20	> 20	0	0 à 20	> 20	0	0 à 20	> 20
Sable	50	40	30	100	80	60	140	120	80
Limon	100	90	60	200	180	120	300	240	180
Argile	120	100	60	240	200	140	340	300	200
sol de craie sur graveluches	70	70	70	140	140	140	-	-	-
sol de craie sur poches	-			210			300		

**tableau 6: diagnostic du risque "milieu" en fonction de l'indice de drainage et de la teneur en matière organique (MO) du sol.**

Indice de drainage (ID)	%MO (1)	
	< 3	> 3
ID<1	faible	modéré
1<ID<2	modéré	élevé
ID>2	élevé	très élevé

(1) Pour les sols calcaires (%CaCO<sub>3</sub> > 5%), on propose de ne pas tenir compte de ce critère : le risque correspond à %MO <3

### 3.3 Le risque de lessivage

Le diagnostic du risque de lessivage est obtenu en croisant le risque « culture » et le risque « milieu ». Le tableau 7 fournit un exemple de diagnostic du risque de lessivage en cinq classes.

**tableau 7 : exemple de diagnostic du risque de lessivage de l'azote en système de cultures annuelles.**

	<b>risque "culture"</b> (voir tableau 4)				
<b>Risque "milieu"</b> (tableau 6)	<b>très faible</b>	<b>faible</b>	<b>modéré</b>	<b>élevé</b>	<b>très élevé</b>
<b>faible</b>	très faible	faible	modéré	modéré	élevé
<b>modéré</b>	faible	modéré	modéré	élevé	élevé
<b>élevé</b>	modéré	modéré	élevé	élevé	très élevé
<b>très élevé</b>	modéré	élevé	élevé	très élevé	très élevé

Ces différentes classes de risques conduisent à proposer des techniques adaptées pour réduire le lessivage : de la gestion des résidus de récolte à l'implantation de couverts, en passant par la gestion de repousses.

#### 4. Propositions de gestion de l'interculture

Pour réduire le lessivage, différentes techniques sont envisageables, qui n'ont pas le même impact sur la quantité d'azote nitrique dans le profil. Le choix d'une technique doit donc être adapté à la situation à résoudre : résorber un stock d'azote minéral important et présent dès la récolte ou intercepter la minéralisation automnale et hivernale, sont par exemple deux cas de figure qui nécessitent la mise en œuvre de pratiques différentes.

Le tableau 8 décrit de manière simplifiée les 3 principales techniques envisageables et leur impact sur la quantité d'azote minéral du sol. Il est extrait du document intitulé « *Gestion de l'interculture et azote : des références pour agir* ». Rédigé dans le cadre du réseau Ferti-Mieux, ce document examine l'impact sur le profil en azote nitrique des principales techniques de gestion de l'interculture et propose des références techniques issues d'un certain nombre d'opérations Ferti-Mieux.

**tableau 8 : effet de trois techniques de gestion de l'interculture sur l'azote minéral du sol**  
(source : Gestion de l'interculture et azote. Des références pour agir. ANDA Ferti mieux, Mars 2001)

Principales techniques de gestion de l'interculture	Mode d'action et impact sur le profil azoté
gestion des résidus de récolte	<p><u>Incorporation des résidus</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Piégeage possible de l'azote dans l'horizon d'incorporation seulement</li> <li>- Capacité d'organisation qui dépend de la nature et de la quantité des résidus</li> <li>- Facteur limitant des quantités organisées : l'azote minéral présent dans l'horizon d'incorporation, l'humidité du sol et la qualité de répartition des résidus.</li> <li>- Quantités d'azote en jeu faibles (de 10 à 30 kg N/ha)</li> </ul> <p><u>Maintien en surface des résidus (mulch)</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Piégeage peu performant et aléatoire.</li> </ul>
gestion des repousses de la culture précédente	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Piégeage de l'azote sur la profondeur d'enracinement, au delà de l'horizon travaillé</li> <li>- Capacités d'absorption importantes suivant l'espèce et la durée de croissance (20 à plus de 100 kg N/ha), dont environ le tiers est restitué à la culture suivante</li> <li>- Nécessité d'assurer une couverture homogène (qualité de répartition des graines)</li> </ul>
Implantation de cultures intermédiaires piège à nitrates	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Piégeage de l'azote sur la partie explorée par le couvert (60 à 100 cm selon les types de sol)</li> <li>- Capacités d'absorption de 50 à plus de 150 kg N/ha, dont le tiers en moyenne est restitué à la culture suivante</li> <li>- Choix d'espèce guidé par la situation à résoudre (stock d'azote important à la récolte, ou minéralisation à venir) et par d'autres contraintes : facilité d'implantation, de destruction, parasitisme, coûts...</li> <li>- Objectif de production de MS de 1,5 à 2,5 tonnes / ha dans les situations où le retour à la capacité au champ en hiver n'est pas assuré.</li> <li>- Implantation sous couvert du maïs grain : une technique à travailler</li> </ul>

Le choix des actions à mettre en place dépend directement de la performance de la technique par rapport à la situation rencontrée. Par exemple, l'enfouissement des pailles est une technique qui n'a pas d'effet sur l'azote déjà présent en profondeur à la date d'incorporation. Elle est donc à réserver aux situations où l'azote est localisé dans l'horizon superficiel, et pour des quantités à piéger ne dépassant pas une quarantaine d'unités.

Le tableau 9 présente des exemples de mesures envisageables dans les différentes classes de risques identifiées par le diagnostic (tableau 7). Leur mise en œuvre dépend non seulement de la nature des successions de cultures présentes, de l'intensité du risque repéré dans le diagnostic, mais aussi de leur faisabilité technico-économique.

**tableau 9 : exemples d'actions envisageables selon l'intensité du risque.**

Risque "milieu"	risque « culture »				
	très faible	faible	modéré	élevé	très élevé
<b>faible</b>	AUCUNE	AUCUNE	<ul style="list-style-type: none"> <li>Semis d'automne : Implantation précoce et si possible enfouissement des pailles</li> <li>Semis de printemps : repousses ou CIPAN</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Semis d'automne : Implantation précoce et si possible enfouissement des pailles</li> <li>Semis de printemps : repousses ou CIPAN</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Semis d'automne : Implantation précoce et enfouissement des pailles</li> <li>Semis de printemps : repousses ou CIPAN</li> </ul>
<b>modéré</b>	AUCUNE	Implantation précoce de la culture à l'automne ou enfouissement des pailles	Implantation précoce de la culture à l'automne ou enfouissement des pailles	(Abandon épandage MO en automne et enfouissement pailles) et/ou (CIPAN ou repousses de la culture précédente)	(Abandon épandage MO en automne et enfouissement pailles) et/ou (CIPAN ou repousses de la culture précédente)
<b>élevé</b>	Implantation précoce de la culture à l'automne ou enfouissement des pailles	Implantation précoce de la culture à l'automne ou enfouissement des pailles	Enfouissement pailles et/ou repousses de la culture précédente	(Abandon épandage MO en automne et enfouissement pailles) et/ou (CIPAN ou repousses de la culture précédente)	Abandon épandage MO en automne et CIPAN
<b>très élevé</b>	Implantation précoce de la culture à l'automne ou enfouissement des pailles	Implantation précoce de la culture à l'automne en privilégiant des cultures à forte capacité d'absorption	Enfouissement pailles et/ou repousses de la culture précédente voire CIPAN si possible	Abandon épandage MO en automne et CIPAN ou repousses de la culture précédente	Abandon épandage MO en automne et CIPAN

**Les tableaux "exemples" 4 et 9 illustrent la démarche proposée : ils doivent être adaptés au contexte local**

## 5. Conclusion

La démarche proposée est qualitative. Elle s'appuie sur la connaissance des pratiques agricoles locales et nécessite une expertise agronomique. Le croisement entre les critères permettant d'établir le niveau de risque global s'appuie sur des règles de décision élaborées à dire d'experts. Ces règles reposent sur l'hypothèse forte que les critères n'ont pas le même poids et ne sont donc pas strictement additifs. Ce croisement est donc basé sur une combinaison et non sur une addition des valeurs attribuées à chaque critère.

La mise en œuvre du diagnostic nécessite la construction successive des tableaux de risque « culture », « milieu » et « lessivage ». L'élaboration du tableau d'actions envisageables s'appuie d'une part sur le tableau de risque « lessivage » et d'autre part sur les connaissances locales de l'impact des pratiques de gestion de l'interculture sur les pertes d'azote. La réalisation de ce type de démarche est facilitée par un travail en commun valorisant l'expérience et les connaissances de chacun. C'est aussi une garantie pour une appropriation collective par tous les acteurs (techniciens et financeurs) du diagnostic et des propositions d'actions à l'échelle d'un secteur géographique.

Cette démarche qualitative peut être précisée localement à partir de références locales et d'utilisation de modèles permettant de quantifier les différents compartiments et flux d'azote du sol et de chiffrer le risque de lessivage. C'est l'objet de la seconde partie de ce document.

## Pour en savoir plus

- ANDA Ferti-Mieux 2001, Gestion de l'azote et interculture : des références pour agir.
- Corpen 1991, interculture, 40 pp.
- ITCF 1995, azote et interculture, perspectives agricoles n° 206, octobre 1995.
- Lanquetuit M., Sebillotte M., 1997. Protection de l'eau. Le guide Ferti-mieux pour évaluer les modifications des pratiques des agriculteurs. ANDA ed.
- Machet J.M, Laurent F, Chapot JY, Doré T, Dulout A., 1996. Maîtrise de l'azote dans les intercultures et les jachères. In Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes Reims, 19-20 novembre 1996, INRA éditions, série « les colloques » n°83, 271-286.
- Nicolardot B., Mary B., Houot S., Recous S., 1996. La dynamique de l'azote dans les sols cultivés, In « Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes » Reims, 19-20 novembre 1996, INRA éditions, série « les colloques » n°83, 87-101.
- Recous S., Loiseau, Mary B. 1996. Transformations et devenir de l'azote de l'engrais sous cultures annuelles et sous prairies. In Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes. Reims, 19-20 novembre. INRA éditions, série « les colloques » n°83.
- Sebillotte M, Meynard J.M., 1990. Systèmes de culture, systèmes d'élevage et pollutions azotées. In Nitrates, agriculture, eau. Paris, 7-8 novembre INRA éditions.

## Lexique

1. **azote minéral** : fractions ammoniacale ( $\text{NH}_4^+$ ) et nitrique ( $\text{NO}_3^-$ ) de l'azote du sol. Seule la forme nitrique est lessivable.
2. **azote organique** : azote présent dans les compartiments "résidus de culture", "biomasse microbienne" et "matière organique humifiée" du sol.
3. **bassin d'alimentation** : ensemble des terrains cultivés ou non alimentant un aquifère récepteur.
4. **Capacité de rétention en eau** : voir 5
5. **Capacité de stockage de l'eau** : volume d'eau contenu sur une épaisseur de sol donnée à une humidité égale à la capacité au champ.
6. **CIPAN** : Culture Intermédiaire Piège à Nitrates. Couvert végétal cultivé ayant pour but d'absorber l'azote du sol en période d'interculture. Voir aussi "repousses" (17).
7. **drainage** : processus de transfert en profondeur de l'eau libre du sol au delà de la profondeur d'enracinement.
8. **Indice de drainage** : rapport entre le volume d'eau drainé et la capacité de stockage en eau du sol (voir 5).
9. **interculture** : période s'écoulant de la récolte d'une culture à l'implantation de la suivante.
10. **lame drainante** : volume d'eau drainée au travers d'un profil de sol, exprimé en mm. Il est toujours nécessaire de préciser la profondeur à laquelle cette mesure ou estimation est effectuée.
11. **lessivage** : transfert en profondeur des éléments minéraux dissous dans l'eau libre du sol. On devrait lui préférer le terme "lixiviation" et réserver "lessivage" au processus pédologique de transfert de particules fines du sol (argiles).
12. **lixiviation** : voir 11.
13. **minéralisation** : transformation de l'azote organique en azote ammoniacal sous l'action de bactéries. Voir aussi 14. Par abus de langage, on utilise souvent ce terme pour désigner à la fois les processus de minéralisation et nitrification.
14. **nitrification** : transformation de l'azote ammoniacal en azote nitrique sous l'action de bactéries nitrifiantes.
15. **organisation** : consommation de l'azote minéral du sol (voir 1.) par les micro organismes (champignons et bactéries) pour assurer leur besoin de croissance. Improprement on parle aussi d'"immobilisation" (anglicisme). Le processus inverse est la minéralisation (voir 13).
16. **pédoclimat** : ensemble des caractéristiques du sol et du climat définissant les conditions et facteurs de croissance des peuplements végétaux.
17. **repousses** : couvert végétal spontané issu de la culture précédente ayant pour effet d'absorber l'azote du sol en période d'interculture.
18. **résidus de culture** : biomasse restituée au sol constituée des fractions non récoltées des végétaux cultivés. On distingue les restitutions obligatoires (racines, fractions basales des tiges et feuilles ne pouvant être mécaniquement récoltées ou consommées par l'animal), et les restitutions facultatives constituées des compartiments végétaux pouvant être exportées ou non de la parcelles (pailles, fanes...).

19. **succession culturale** : nature des cultures se succédant dans le temps sur une parcelle agricole. S'il y a périodicité dans cette succession on parle de rotation.
20. **texture** : expression synthétique du résultat de l'analyse granulométrique, sous la forme d'un adjectif ou d'un substantif (ex : limono argileux, limon argileux). C'est aussi un jugement global sur la composition granulométrique appuyé sur des sensations tactiles, optiques et auditives.
21. **volume d'eau drainée** : voir lame drainante (10).

## **2ème partie : cahier technique.**

### **Quantification des différents compartiments et flux d'azote du sol**

Les différents compartiments et flux d'azote dans le sol ont été présentés à la figure 1 page 8. Leurs modes de quantification sont détaillés dans ce chapitre.

#### **1. Le reliquat d'azote minéral début drainage**

Le reliquat début drainage peut se mesurer de façon directe ou être estimé à partir de la somme des différents termes de l'équation suivante :

$$R_{dd} = R_f + (m_{hb} + m_r + m_{ha} + m_{hp}) + x_a - N_{abs}$$

Le début drainage est la date à laquelle il y a saturation du profil jusqu'à la profondeur d'enracinement de la culture suivante : tout excédent pluviométrique enregistré postérieurement à cette date entraîne de l'azote minéral au delà de la profondeur prospectée par les racines, et est donc perdu pour le système cultivé "plante - sol ". Sa date peut être estimée par le calcul du bilan hydrique (voir paragraphe 3 page 38).

Le tableau 10 illustre les différents termes de l'équation du  $R_{dd}$  (symboles, facteurs de variation et mode de quantification).

**tableau 10 : les différents termes d'estimation du reliquat début drainage ( $R_{dd}$ ).**

terme du bilan	facteurs de variation	modes de quantification
reliquat fin de culture <b>(<math>R_f</math>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>climat de fin de cycle (irrigation)</li> <li>culture</li> <li>fumure azotée et niveau de rendement</li> <li>historique des apports organiques</li> <li>type de sol</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>mesure à la parcelle</li> <li>moyenne de situations types mesurées annuellement sur des parcelles de référence</li> <li>grille de risque basée sur le bilan d'azote à la parcelle</li> </ul>
minéralisation basale de la matière organique humifiée <b>(<math>m_{hb}</math>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>climat : température, pluviométrie</li> <li>fréquence des restitutions organiques</li> <li>travail du sol</li> <li>sol : teneur en matière organique, texture, teneur en <math>CaCO_3</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>modèles de flux d'azote dans le sol : Azobil paramétré pour l'interculture (voir tableau 12 page 35)</li> <li>références régionales par type de sol et système de culture</li> </ul>
minéralisation nette des résidus de culture <b>(<math>m_r</math>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>climat : température, humidité</li> <li>date d'incorporation</li> <li>mode d'incorporation (travail du sol)</li> <li>quantité de résidu et teneur en azote (et nature biochimique du résidu)</li> <li>quantité d'azote minéral dans le sol au moment de l'incorporation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>table de valeurs standard (voir tableau 13 page 36)</li> <li>références régionales</li> </ul>
supplément de minéralisation dû aux apports réguliers de matières organiques <b>(<math>m_{ha}</math>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>climat : température</li> <li>nature du produit</li> <li>quantité d'azote apportée et fréquence d'apport</li> <li>restitution des résidus de culture</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>table de valeurs standard (voir tableau 14 page 36)</li> <li>références régionales</li> </ul>
effet direct des apports organiques en automne - hiver <b>(<math>x_a</math>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>climat : température (vent : volatilisation)</li> <li>quantité d'azote apporté et nature du produit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analyse du produit</li> <li>tables de composition moyenne</li> </ul>
supplément de minéralisation dû aux retournements de prairies <b>(<math>m_{hp}</math>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>âge et type de prairie et ancienneté de retournement</li> <li>mode de conduite : fauche/pâturage, fertilisation azotée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>table de valeurs standard (voir tableau 15 page 37)</li> <li>références régionales</li> </ul>
azote absorbé par un couvert végétal <b>(<math>N_{abs}</math>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>disponibilité en azote minéral du sol</li> <li>capacité de croissance des parties aériennes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>table de valeurs standard (voir tableau 16 page 37)</li> <li>références régionales</li> </ul>

## 1.1 Mesure directe de $R_{dd}$

Des valeurs moyennes peuvent être obtenues à partir d'un réseau de parcelles (deux exemples sont donnés à la figure 4 et à la figure 5). Mais, pour couvrir la diversité des situations, il faut disposer d'un nombre important de parcelles couvrant une diversité suffisante de situations agricoles et pédoclimatiques.

Compte tenu des expériences de terrain acquises sur le sujet, il est nécessaire de structurer le réseau d'enquêtes selon les variables descriptives suivantes :

- le précédent cultural : il détermine la quantité d'azote minéral présent à la récolte ( $R_f$ ), la minéralisation des résidus de récolte, ainsi que la durée de l'intervalle "fin de prélèvement d'azote - début drainage" ;
- la date de levée de la culture suivante s'il s'agit d'une culture semée en été ou automne ;
- le type de sol : sous un climat donné, il détermine le régime de minéralisation des matières organiques.

La taille de l'échantillon (nombre de parcelles) dépend directement de la précision souhaitée et de la variabilité de la quantité estimée : le tableau 11 fournit les ordres de grandeur souhaitables pour différentes hypothèses.

**tableau 11 : ordres de grandeurs des effectifs de parcelles à échantillonner pour estimer la moyenne de la population selon sa variabilité et la précision souhaitée.**

(valeurs pour  $\alpha = 10\%$  et sous hypothèse d'une distribution dissymétrique avec plus de valeurs élevées que faibles)

	moyenne de la population (kg N.ha <sup>-1</sup> )	40	60	80
	valeurs extrêmes (kg N.ha <sup>-1</sup> )	20-55	20-85	20-110
+/- intervalle de confiance souhaité (kg N.ha <sup>-1</sup> )	5	10	28	51
	10	4	9	15
	15	3	5	8
	20	3	4	6

*La taille de l'échantillon dépend de la moyenne probable et de la précision souhaitée.  
Attention : ces valeurs sont très dépendantes des bornes extrêmes entre lesquelles se situent  $R_{dd}$*

figure 4 : histogrammes de répartition du reliquat début drainage ( $R_{dd}$ ) dans les sols de craie du département de la Marne (interculture blé - sol nu, sans apport de matières organiques).

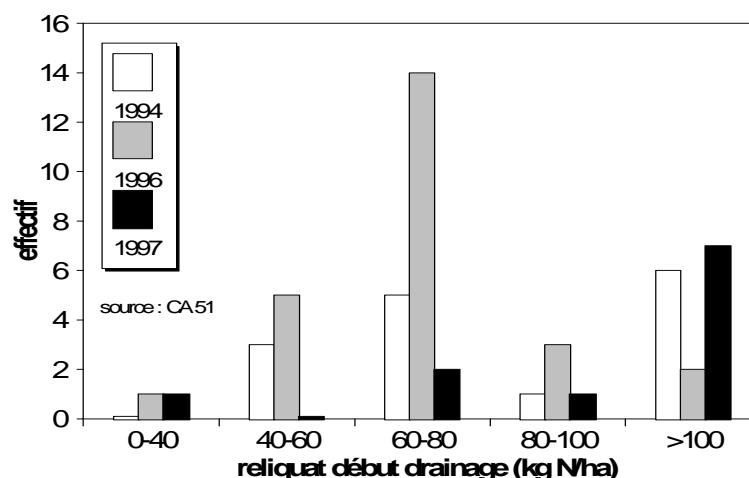
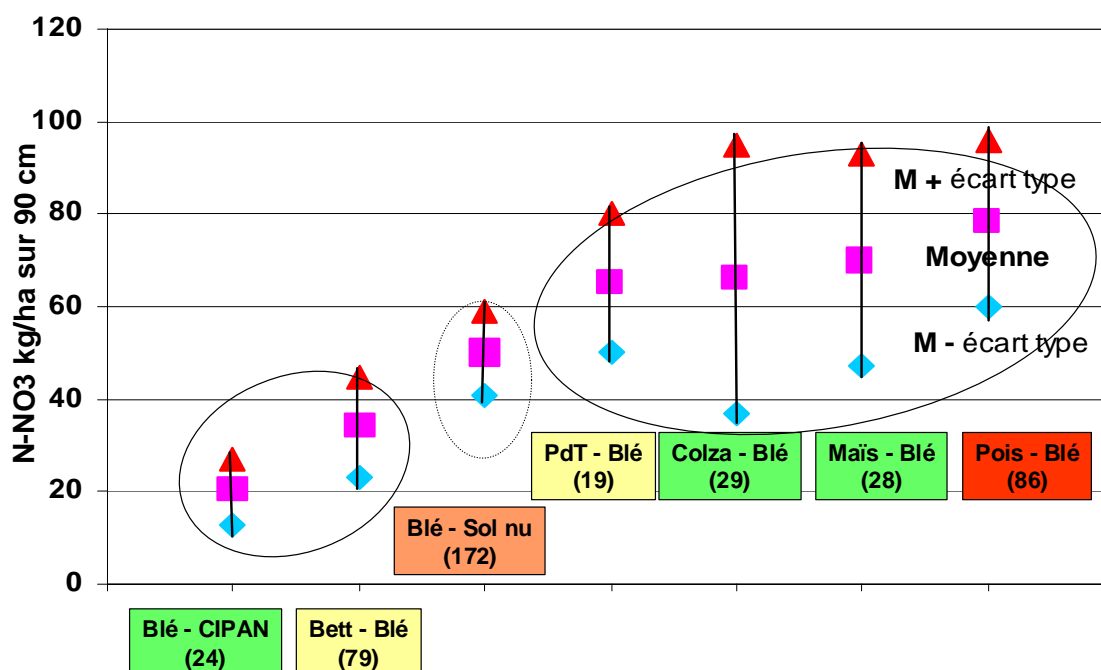


figure 5 : Reliquats début drainage observés depuis 1991 sur le Bassin versant Ferti-Mieux de La Voulzie (Chambre d'Agriculture de Seine & Marne, UNIP)  
(les nombres sous chaque succession de culture représentent les effectifs de profils mesurés entre 1991 à 98)



## 1.2 Calcul du reliquat début drainage

Lorsque cette approche directe n'est pas possible, on procédera à l'évaluation des différents termes de l'équation de calcul de  $R_{dd}$  en distinguant le reliquat récolte ( $R_f$ ) puis la minéralisation nette des matières organiques pendant l'interculture et la période automne/hiver.

### 1.2.1 le "reliquat de fin de culture" ( $R_f$ ).

C'est la quantité d'azote présente à la récolte sous forme minérale, sur la profondeur d'enracinement. Son origine est liée à une utilisation partielle de l'azote minéral du sol par le système racinaire de la culture en place. Plusieurs mécanismes peuvent expliquer la grande variabilité de ce terme :

- le volume de sol affecté par l'activité racinaire, notamment en profondeur. On peut ainsi observer des quantités d'azote importantes dans le cas d'enracinement limités en profondeur lié soit à un effet de l'espèce (pomme de terre, pois, ...) soit à un effet du sol (obstacle physique, rupture texturale,...) ;
- l'excès de fertilisation azotée par rapport à la dose nécessaire à l'obtention du potentiel de rendement de la parcelle ;
- le décalage des cinétiques de minéralisation des matières organiques et d'absorption d'azote par la plante, notamment tardives.

Trois outils permettent d'apprécier ce terme :

- la mesure systématique à la parcelle.

En dehors de conditions expérimentales, cette approche n'est guère envisageable de façon opérationnelle : extrême difficulté de prélèvement rendant l'opération inenvisageable sans la disponibilité de préleveurs mécaniques ou hydrauliques, coûts d'analyse, grande rigueur méthodologique (conservation, délais d'acheminement des échantillons au laboratoire).

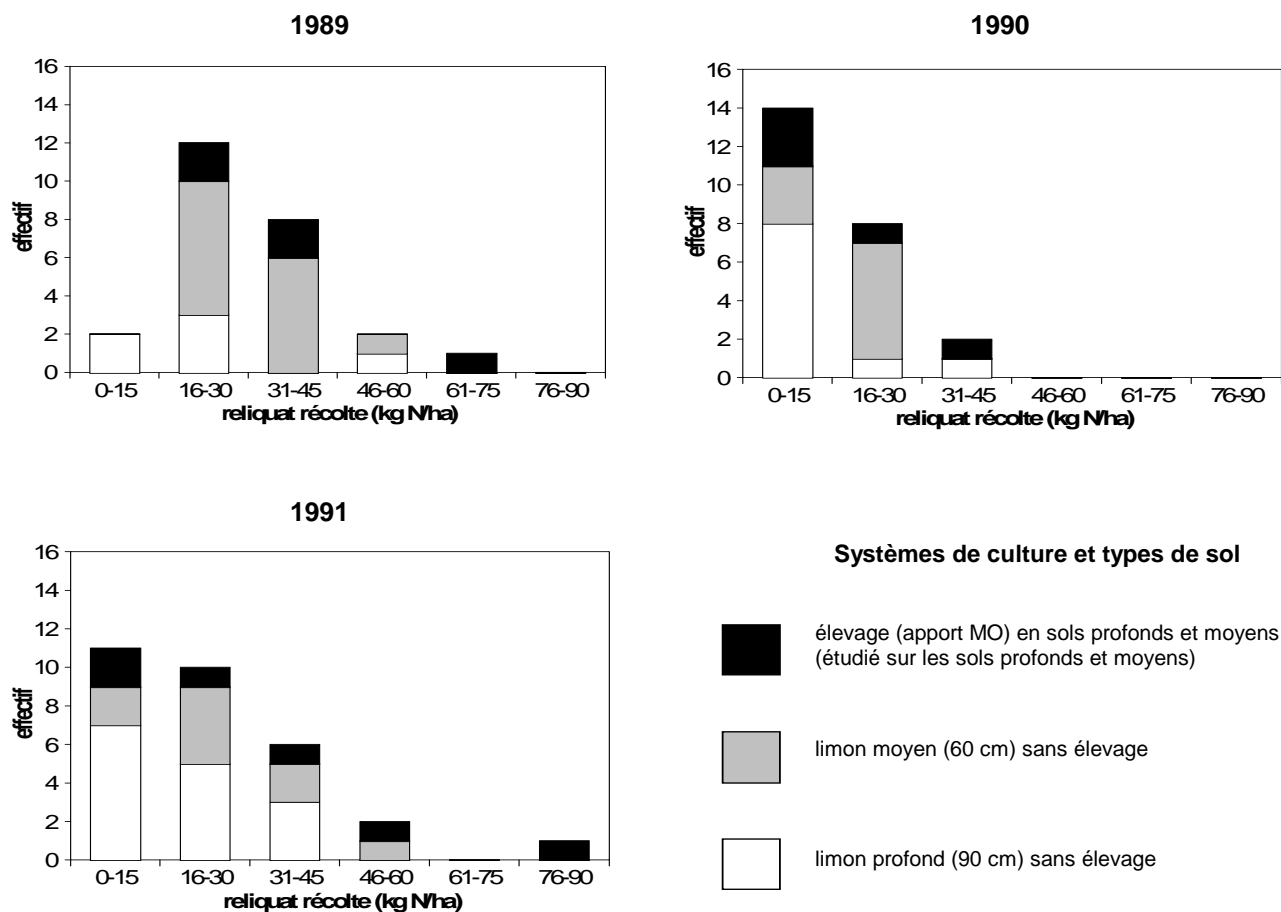
- un réseau de parcelles ("observatoire") faisant l'objet des mesures évoquées précédemment et à partir duquel on peut établir des moyennes par situation type.

Ce type d'approche doit être mis en œuvre après stratification de l'échantillon des parcelles enquêtées. Les variables clefs de segmentation du réseau d'observation sont (liste non exhaustive) :

- la culture récoltée ;
- la fumure azotée et le niveau de rendement ;
- les pratiques d'apports organiques (types de produits, fréquence d'apport) ;
- l'irrigation ;
- le type de sol...

Ainsi, par exemple, la chambre d'agriculture de l'Eure a conduit des campagnes de mesures du "reliquat fin de culture" pendant plusieurs années derrière différentes espèces présentes dans quelques systèmes de culture<sup>4</sup> : voir figure 6 pour le blé tendre.

**figure 6 : distribution des "reliques fin de culture " après blé tendre (Rf) mesurés par enquête sur des réseaux de parcelles pluriannuels et multiloaux (CA 27, 1992)**



- Une évaluation indirecte peut être envisagée à partir de l'établissement a posteriori d'un bilan d'azote à la parcelle.

Le bilan d'azote de la culture récoltée établi sur sa période d'absorption active peut s'écrire comme suit :

$$\text{BiN} = X + \text{FS} - \text{Nabs}$$

avec  $X = N$  de l'engrais azoté

$\text{FS} =$  somme des fournitures du sol (mesuré par le contenu en azote du témoin non fertilisé ou estimé à partir des différents postes du bilan prévisionnel).

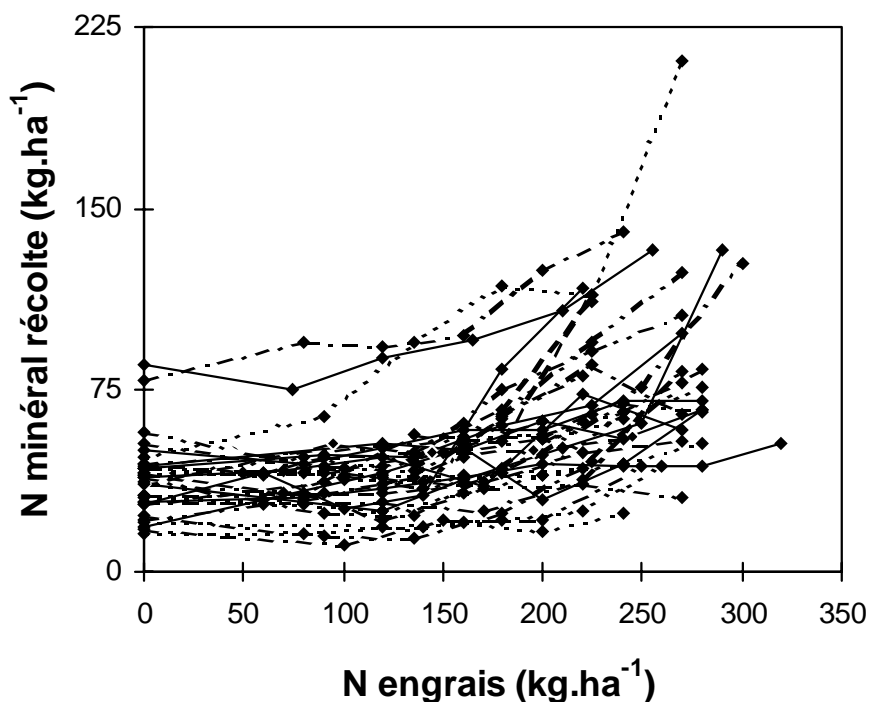
$\text{Nabs} = N$  absorbé plante entière à maturité.

<sup>4</sup> *Pratiques culturales et qualité des eaux. Annexes- Références 1989 à 1991.* Chambre d'agriculture de l'Eure. Mai 1992. 63 pp.

BiN n'est pas un prédicteur fiable du reliquat récolte  $R_f$  dans l'absolu : le poids de l'effet site (année \* milieu) est prédominant. Par contre, on peut l'utiliser pour estimer le sens de variation du reliquat récolte sous l'effet de la fertilisation azotée.

Ce poids de l'effet site (points reliés par la même ligne) sur le reliquat récolte est illustré à la figure 7 : le reliquat récolte est plus dépendant de la parcelle que de la dose d'azote, du moins tant que celle-ci n'est pas excédentaire.

figure 7 : effet de la fertilisation azotée sur le reliquat mesuré à la récolte du blé. (Makowski et al., 1999)<sup>5</sup>



### 1.2.2 la minéralisation nette pendant la période d'interculture

Plusieurs compartiments d'azote organique sont impliqués dans le processus de minéralisation observable durant l'interculture ( $m_{hb} + m_r + m_{ha} + m_{hp}$ ).

Dans tous les systèmes de culture (avec ou sans élevage), deux compartiments sont à considérer :

- la matière organique humifiée :  $m_{hb}$  quantifie la minéralisation "basale" de cet azote humifié. Les lois d'action des principaux facteurs impliqués (humidité et température) étant connus par ailleurs, on pourra les utiliser pour quantifier le flux net de minéralisation pendant les périodes qui intéressent le diagnostic.
- les résidus de culture dont la minéralisation nette est appréciée par  $m_r$ .

Par ailleurs les systèmes d'élevage et certains systèmes de cultures recyclant des matières organiques produites à l'extérieur de l'exploitation sont redevables d'autres sources d'azote minéral :

<sup>5</sup> Makowski D., Wallach D., Meynard, J.M., 1999. Models of yield, grain protein, and residual mineral nitrogen responses to applied nitrogen for winter wheat. Agron. Journal, 91 : 377-385.

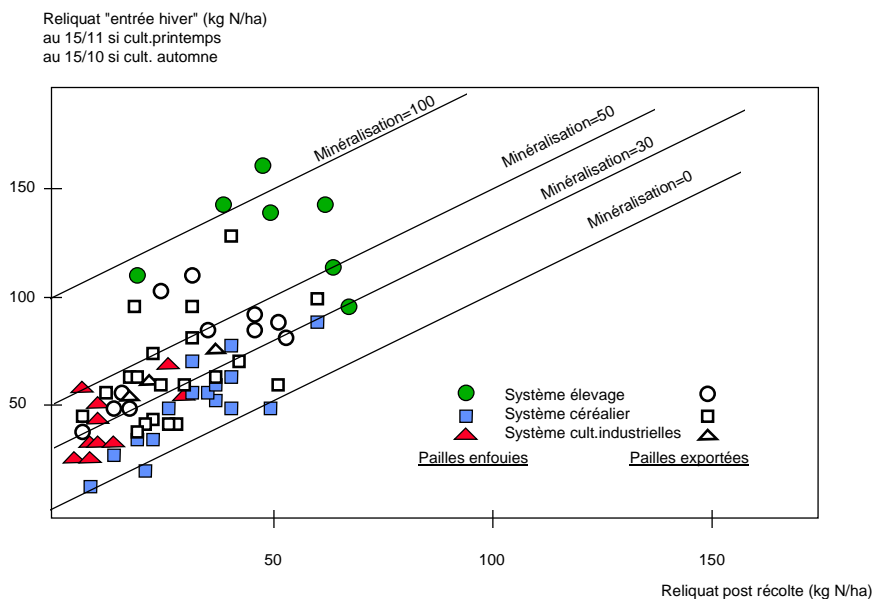
- la minéralisation des amendements organiques : selon la fréquence et la nature des apports, il sera nécessaire de comptabiliser d'une part les effets directs liés à des épandages l'année même ( $x_a$ ) et/ou les arrières effets imputables aux apports opérés pendant les années antérieures ( $m_{ha}$ ). Des pratiques de restitution systématique des résidus de culture peuvent limiter ces effets par l'augmentation des flux d'organisation liés à leur décomposition. (On doit également ajouter à ces postes, la nitrification de l'azote ammoniacal non volatilisé lors de l'épandage des produits organiques).
- l'effet des retournements de prairies ( $m_{hp}$ ). Les prairies organisent des grandes quantités d'azote en raison de l'importance du renouvellement racinaire et de la sénescence des parties aériennes restituées au sol (Recous et al., 1997<sup>6</sup>). Leur retournement, provoque un arrêt des flux d'organisation et donc une minéralisation nette élevée. A priori, cet effet est d'autant plus élevé que la prairie est ancienne, son mode d'exploitation dominé par la pâture, et son retournement récent. Des essais récents montrent néanmoins l'effet dominant des conditions climatiques et historiques de la parcelle sur les modes de gestion antérieurs de la pâture.

La minéralisation nette pendant la période d'interculture peut s'obtenir par mesures (approche globale) ou de façon analytique terme par terme.

- approche globale

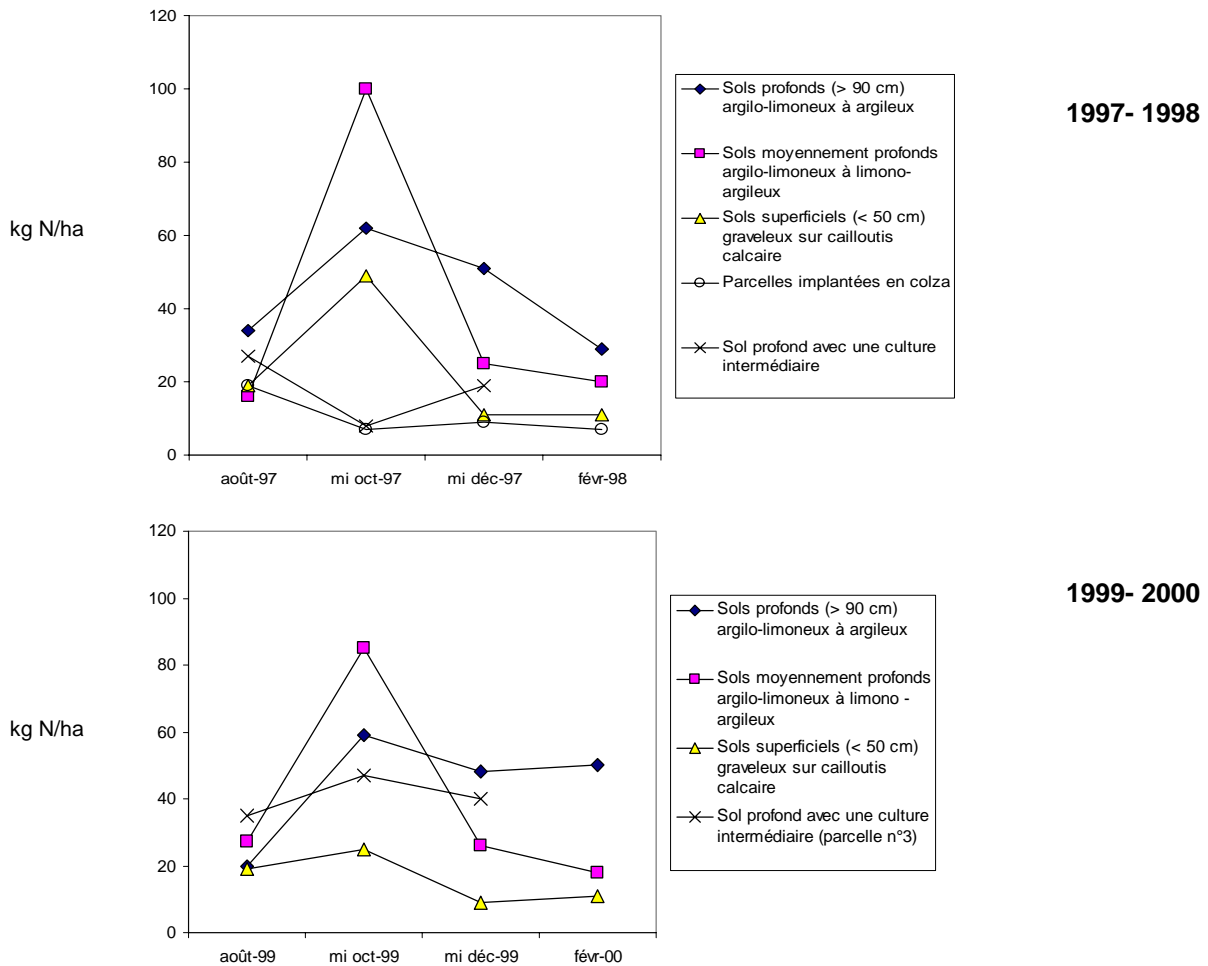
La comparaison entre les profils fin de récolte et début drainage permet une approche de la minéralisation nette globale pendant la phase récolte - début drainage à l'aide de suivis de parcelles convenablement échantillonnées en fonction des types de sol et systèmes de cultures. A titre d'exemple, la figure 8 (source CA de l'Eure) montre l'amplitude des variations de la quantité d'azote apparemment minéralisée entre récolte et début drainage, pour divers systèmes de culture. Pour les milieux concernés, cette quantité moyenne est inférieure à 30 kg N/ha derrière céréales pailles enfouies, comprise entre 30 et 50 kg N/ha derrière pois, colza ou blé pailles exportées, et parfois supérieure à 100 kg N/ha dans les situations avec apport de lisier à l'automne.

**figure 8 : comparaison des quantités d'azote minéral présentes à la récolte et au début drainage pour estimer la minéralisation nette en interculture. Réseau de 52 parcelles suivies en 1989, 90 et 91 dans le département de l'Eure (source : CA 27, 1992).**



La figure 9 (source CA Côte d'Or) illustre l'évolution de l'azote minéral pendant la période d'interculture selon le type de sol et son occupation.

**figure 9 : variation des profils d'azote en cours d'hiver pour différents sols et successions culturales (source : CA 21)**

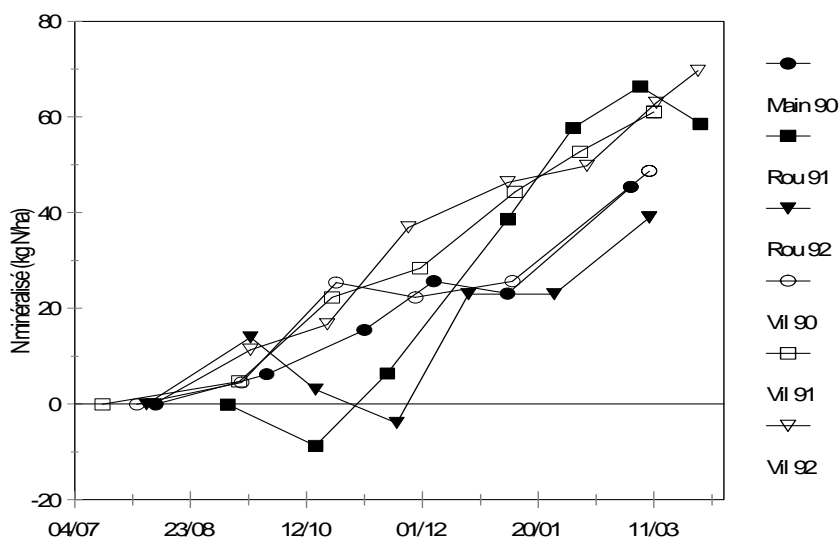


<sup>6</sup> Recous, S., Loiseau, P., Mary, B., 1996. Transformations et devenir de l'azote de l'engrais sous cultures annuelles et sous prairies. In Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes. Ed. INRA, Paris (les colloques, n°83), 105-117.

On peut affiner cette approche grâce à des suivis à pas de temps plus courts ou en utilisant des modèles dynamiques tel LIXIM pour calculer la minéralisation en sol nu.

La figure 10 montre six cinétiques observées dans le bassin parisien dans des interculture blé (pailles enfouies) - sol nu : dans ces situations 20 à 40 kg N.ha<sup>-1</sup> sont minéralisées entre la récolte du blé et le début du drainage hivernal.

**figure 10 : cinétiques de minéralisation nette dans des systèmes de culture céréalières du bassin parisien.** Résultats de suivis sur 3 sites expérimentaux dans une succession blé (pailles enfouies) - sol nu (Mainbervilliers, Rouvres, Villexanton) et 3 années (1990, 91 et 92). ITCF- HYDRO. (Profils mensuels d'azote minéral ajustés avec le modèle LIXIM pour le calcul des minéralisations nettes entre chaque date de mesure)



- approche analytique

Les éléments contenus dans les tableaux suivants ne peuvent pas être considérés comme des "normes" transposables dans toutes les conditions de milieu. Ils peuvent néanmoins servir de base à l'élaboration de références locales.

La minéralisation en interculture peut être estimée en tenant compte des termes suivants :

- la minéralisation nette de la matière organique stable du sol ( $m_{hb}$ ) : tableau 12. On utilisera le modèle Azobil en adaptant son paramétrage aux conditions observables en interculture, en particulier la durée et la température moyenne des périodes "récolte à début drainage".

- la minéralisation nette des résidus de culture du précédent ( $m_r$ ) : tableau 13. La nature et la quantité de résidus restitués au sol déterminent l'effet azote lié à leur décomposition, positif ou négatif selon le processus dominant (minéralisation ou organisation). Par ailleurs, le mode de restitution (enfouissement ou non) peut faire varier le niveau des flux.

- le supplément de minéralisation imputable aux apports réguliers de produits organiques dans la rotation ( $m_{ha}$ ) : tableau 14. Le type de produit et sa fréquence d'apport permettent de proposer des coefficients compris entre 0.08 et 0.6. Ceux ci sont appliqués à la quantité totale d'azote apporté par les effluents organiques. La quantité d'azote ainsi minéralisée correspond à une

évaluation sur l'année. Il convient donc de multiplier le résultat du calcul précédent par la durée de la période interculturelle concernée : récolte à début drainage.

- l'effet direct des apports organiques effectués pendant l'interculture ou la phase automne - hiver ( $x_a$ ). Il convient de prendre en compte la quantité d'azote minéral présent dans les produits épandus, voire certaines fractions d'azote organique très labiles.

- le supplément de minéralisation dû aux retournements de prairie ( $m_{hp}$ ). Les deux premiers facteurs à prendre en compte sont l'âge de la prairie et l'ancienneté de sa destruction. Le tableau 15 reprend les propositions du Comifer pour le calcul de la fertilisation des cultures annuelles. Celles ci correspondent au supplément de minéralisation induit par le retournement d'une prairie exclusivement pâturée. Il convient alors de modifier ces valeurs pour prendre en compte l'effet de la fauche sur la diminution de la minéralisation (absence de restitutions animales, entraînant des bilans de l'azote inférieurs) : c'est l'objet du facteur multiplicatif 0.4 applicable à la fraction de l'effet azote estimé au prorata de la production de la prairie exploitée en fauche (voir l'exemple du tableau 15). Enfin, ces données correspondent aux effets observés sur une année complète : il convient donc d'affecter le calcul précédent du facteur temps (fdurée) correspondant à la prise en compte de la durée "récolte - début drainage".

### 1.2.3 l'azote absorbé par le couvert (Nabs).

L'absorption du couvert présent en phase automne (fin été) - hiver (culture intermédiaire piège à nitrate ou culture principale semée à l'automne : céréale, colza,...) dépend essentiellement – en dehors des conditions climatiques - de la disponibilité en azote minéral dans le sol et de l'espèce, qui vont déterminer le niveau de croissance (biomasse des parties aériennes) : tableau 16

En première approche on peut estimer que 5 à 10% de l'azote total absorbé est présent dans les racines. Le contenu en azote de la plante entière (Nabs) est donc égal à Nabs parties aériennes x 1,1.

Par ailleurs, les crucifères perdent 10 à 20% de l'azote absorbé par la chute des feuilles à l'automne (donc Nabs = Nabs parties aériennes x 1,1 x 1,25).

**tableau 12 : minéralisation nette de la matière organique stable du sol ( $m_{hb}$ ).**

$$m_{hb} = K2.QN.fc.fs. fdurée$$

avec :

$$* K2 = \frac{12 \cdot fc \cdot fs}{(0.3 \cdot CaCo3 + 20) \cdot (Arg + 20)}$$

$$* QN \text{ (quantité d'azote soumise à minéralisation)} = \frac{MO \cdot prof \cdot da \cdot 1.3 \cdot (100 - \text{cailloux})}{1.72 \cdot 9 \cdot 100}$$

Avec %MO = %C \* 1.72 et C/N = 9. Mais il est préférable, quand on en dispose, d'utiliser directement la teneur en azote total du sol (terme se substituant à  $\frac{MO}{1.72 \cdot 9}$ )

$$* fc \text{ (facteur climatique)} = 0.2 \cdot Temp - 1.$$

Le modèle exponentiel proposé par S. Recous (INRA Laon) propose une prise en compte plus précise de l'effet température :  $fc = e^{0.115(Temp-15)}$

\* fs (facteur système de culture) dépendant du devenir des résidus de culture :

devenir des résidus	fs
exportés ou brûlés	0.8
enfouis 1 fois sur 2	0.9
enfouis systématiquement	1.0

$$* fdurée : \text{facteur durée} = \frac{\text{durée}(\text{récolte} - \text{début drainage})(\text{jours})}{365}$$

\* CaCO3 : % carbonates total du sol

\* Arg : % argile 0-2 $\mu$ m

\* MO : % matière organique

\* prof : profondeur habituelle de travail du sol (cm)

\* da : densité apparente de l'horizon travaillé

\* cailloux : % (volume) des éléments grossiers  $\geq 2$ mm

\* les constantes 1.3, 1.72, et 9 correspondent respectivement à la prise en compte de la minéralisation sur une épaisseur supérieure à la profondeur travaillée, au rapport MO/Ctotal et au rapport C/N de la matière organique du sol.

\* Temp : température moyenne de la période interculturelle (°C)

**tableau 13 : minéralisation nette des résidus de culture ( $m_r$ ).**

Résidu de culture	mode incorporation	$m_r$ (kg N.ha <sup>-1</sup> )
pailles de céréale	exportées	+5
	enfouies	-25
	en surface (mulch)	0
pailles de colza	enfouies	+15
verts de betterave	exportés	0
	enfouis	+10
cannes de maïs	enfouies rendt <100q/ha	-20
	enfouies rendt >100q/ha	-30
	en surface (mulch)	0
maïs ensilage	-	0
cannes de tournesol	enfouies	-20
pailles de pois protéagineux	en surface (mulch)	0
	enfouies	+20
fanés de pomme de terre	enfouies	+20
fanés de pois de conserve	enfouies	+20
pailles de soja	enfouies	+10

*Remarque : les valeurs numériques proposées dans ce tableau pour  $m_r$  (et qui restent à confirmer) se rapprochent des valeurs  $M_r$  caractérisant l'effet azote des résidus de culture dans le cadre du calcul de la dose d'azote prévisionnelle sur culture (Azobil). Ces deux termes ne sont pourtant pas à confondre : ils quantifient le processus de minéralisation des résidus de culture sur deux périodes distinctes et successives.*

**tableau 14 : supplément de minéralisation dû aux apports réguliers de produits organiques ( $m_{ha}$ ).**

*Remarques :*

- *Ce supplément de minéralisation est à prendre en compte si la durée des apports est supérieure à 10 ans*
- *les valeurs suivantes sont les facteurs multiplicatifs à appliquer à la quantité totale d'azote contenue dans le produit organique épandu.*

*Le résultat de ce calcul est à multiplier par le facteur "durée" ( $f_{durée}$ ) explicité au tableau 12*

Type de produit	Fréquence d'apport		
	tous les ans	tous les 2 ans	tous les 3 ans
Fumier bovins, ovins	0.60	0.30	0.20
Lisiers bovins Fumier porcs, fumier de volailles riche en litière	0.40	0.20	0.15
Lisier porcs, volailles Fumier de volailles pauvres en litière	0.25	0.15	0.08

**tableau 15 : supplément de minéralisation dû aux retournements de prairie ( $m_{hp}$ )  
valeurs de référence pour un mode d'exploitation "tout pâture" ( $kg \cdot ha^{-1}$ ) :**

ancienneté du retournement	Age de la prairie		
	1 à 3 ans	3 à 6 ans	plus de 6 ans
moins de 1 an	50	150	200
1 à 2 ans	10	20	40
plus de 2 ans	0	0	0

Ces valeurs sont à multiplier par un facteur prenant en compte l'effet de la fauche : on propose un coefficient multiplicatif de 0.4 sur la part de production assurée par la fauche.

*Remarque : les valeurs précédentes sont à multiplier par le facteur "durée" ( $f_{durée}$ ) explicité au tableau 12*

Exemple : prairie de 5 ans, exploitée mi fauche - mi pâture, retournée il y a un an :

$$\text{part pâture} = 150 \cdot 1/2 = 75$$

$$\text{part fauche} = 150 \cdot 1/2 \cdot 0.4 = 30$$

$$m_{hp} \text{ total} = 75 + 30 = 105 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$$

$$f_{durée} = 0.5$$

$$m_{hp} \text{ "récolte - début drainage"} = 105 \cdot 0.5 = 50 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$$

**tableau 16 : azote absorbé par les couverts végétaux**

Niveau de croissance (t ms/ha)	N absorbé ( $kg \cdot ha^{-1}$ )
<1	15 à 30
1 à 2	30 à 60
2 à 3	50 à 100
>3	75 à 150

## 2. La minéralisation pendant la phase de drainage

Les lois d'action de ces facteurs permettent de privilégier l'effet de la température pendant les phases d'interculture (car l'humidité du sol est rarement limitante de l'activité des micro-organismes pendant ces périodes hivernales).

L'effet de la température sur la vitesse des processus de minéralisation suit une loi exponentielle : une élévation de 10°C multiplie cette vitesse par un facteur 3,1 (Recous, 1994<sup>7</sup>).

En première approximation, on considère que le compartiment "matière organique humifiée" est le plus gros contributeur à la minéralisation nette pendant cette phase de drainage. Pour quantifier ce flux net de minéralisation, on retiendra donc les principes de calcul exposés dans les tableaux précédents en ajustant le "facteur temps" à la durée moyenne de la saison de drainage.

Cette position est néanmoins discutable dans les situations à fortes restitutions organiques (ou après retournement de prairies) : il est alors souhaitable de prendre aussi en compte la minéralisation imputable à ces pratiques pendant la phase de drainage.

## 3. Le volume d'eau drainée

La quantité d'azote minéral présente en début de drainage est soumise au transfert en profondeur sous l'action de l'excédent pluviométrique.

Le bilan hydrique permet d'estimer la date de début drainage et le volume transféré.

$$QD_i = Qd_{i-1} + P_i - k \cdot ETP_i$$

avec QD : quantité d'eau (mm) présente sur la profondeur de calcul (profondeur maximale d'enracinement des cultures)

i : jour du calendrier

P : pluie (mm) (sans omettre les volumes apportés par les éventuels épandages d'eaux usées)

ETP : évapotranspiration potentielle (mm)

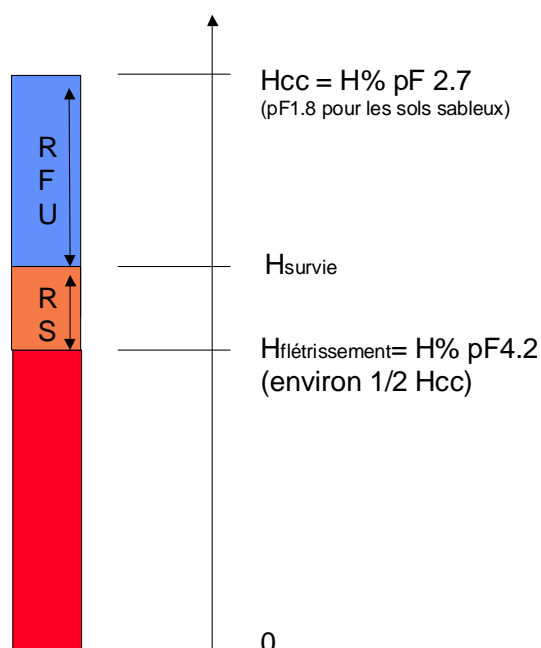
k : coefficient cultural. Voir tableau 17

**tableau 17 : coefficient cultural k à retenir en période d'interculture pour le calcul de k.ETP**

<b>Sol nu</b>	<b>0.5/0.6</b>
<b>couvert végétal &lt; 1 t/ha MS</b>	<b>0.7/0.8</b>
<b>couvert végétal &gt; 2 t/ha MS</b>	<b>1.0</b>

<sup>7</sup> Recous, S., 1994. Réponse des matières organiques des sols aux modifications climatiques globales. III. Effet de la température sur la minéralisation d'un résidu végétal (maïs) et de la matière organique des sols. In Ecosystèmes et changements globaux. Les dossiers de l'environnement, INRA, n°8, 81-85.

**figure 11 : principe de calcul du bilan hydrique en interculture**



Au jour zéro (récolte de la culture), on initialise QD à une valeur réaliste (le profil n'est jamais "vide" à cette date). Par défaut, on peut prendre le niveau du point de flétrissement ( $H_{flétrissement}$ ), soit environ la moitié de l'humidité à la capacité de rétention ( $H_{cc}$ ). On somme alors les valeurs journalières de  $P - k \cdot ETP$  jusqu'à atteindre la valeur de la réserve à la rétention. Ceci correspond à un volume d'eau stocké de  $H_{cc} \cdot \text{masse de sol}$ . La masse de sol doit être calculée sur la profondeur d'enracinement des cultures. Tout l'excédent hydrique ultérieur est considéré comme drainé.

La capacité de stockage en eau correspond au volume d'eau total contenu dans le sol (sur une profondeur donnée) quand son humidité est égale à  $H_{cc}$ .

Cependant, l'évaluation du lessivage du nitrate à partir du bilan hydrique suppose que deux conditions soient remplies :

- pas de circulations préférentielles de l'eau infiltrée
- la totalité du volume de sol, donc la totalité du nitrate présent dans le sol est soumis au transfert en profondeur sous l'action de l'eau infiltrée

L'utilisation d'un indice de drainage ID est aussi une méthode qui permet d'estimer l'azote lessivé (Belan<sup>8</sup>, 1994 : tableau 18. Il est égal au rapport entre le volume d'eau drainée et la capacité de stockage en eau du sol (CORPEN, 1991)

**tableau 18 : indice de drainage et proportion de l'azote lessivé**

Indice de drainage	proportion de l'azote du profil lessivé
ID < 1 risque faible	0 à 60 %
1 < ID < 2 risque moyen	50 à 80 %
2 < ID < 3 risque élevé	70 à 100 %

<sup>8</sup> Belan, J., 1994. L'indice de lessivage. Un outil pour l'aménagement rural et la gestion agronomique. Perspectives agricoles n° 197, 87-90.

## **annexe : Drainage et lessivage avec le modèle LIXIM**

Selon la terminologie proposée de Addiscott et Wagenet (1985) dans une revue bibliographique concernant les modèles de transferts d'eau et de solutés, le sous-module simulant le drainage et le lessivage du modèle LIXIM (Mary et al., 1999) est un modèle fonctionnel déterministe à différents horizons de sol.

Le modèle LIXIM simule l'évolution de l'humidité du sol et de la quantité de nitrates dans un profil de sol de différents horizons de mesure (exemple : 0-30, 30-60 et 60-90 cm), dans le cas d'un sol nu. Il calcule le drainage et le lessivage sous la dernière couche de sol mesurée et l'évaporation en surface. Le pas de temps du modèle est le jour.

Le modèle LIXIM comporte deux modules : module de transport et module de minéralisation. Seul le module de transport est détaillé ici.

Le module de transport d'eau et de solutés est un modèle réservoir multicouches (« mixing cells model », selon Van der Ploeg et al., 1995). Les couches élémentaires de chaque horizon de sol considérées dans le calcul ont une épaisseur de 1 cm, ce qui correspond à la limite de convergence spatiale du modèle. Compte tenu de cette résolution, le déplacement du nitrate est décrit par une loi de type chromatographique ; ce qui est différent du mouvement décrit par un modèle de type "piston" mais proche de celui décrit avec un modèle mécaniste convectif-dispersif basé sur les propriétés hydrodynamiques du sol.

Le modèle prend donc en compte les mouvements de nitrates par convection (flux vertical lié au mouvement de l'eau), mais il ne peut pas rendre compte des écoulements préférentiels d'eau dans le sol (cas des sols dits "fracturés").

### **1. Principe de fonctionnement du modèle LIXIM**

Le transfert d'eau et de soluté (ici le nitrate) entre couches est décrit selon l'algorithme de I.G. Burns (1976). L'eau et le nitrate se déplaçant de la couche  $c-1$  à la couche  $c$  sont supposés se mélanger d'une manière homogène dans la couche  $c$ . Si la teneur en eau de la couche  $c$  excède l'humidité à la capacité au champ, l'eau excédentaire passe dans la couche  $c+1$  immédiatement inférieure. Si la teneur en eau résultante reste inférieure à l'humidité à la capacité au champ, le mouvement d'eau et de soluté s'arrête.

Ce modèle fonctionne principalement en régime d'infiltration. Il inclut cependant un calcul simplifié en régime d'évaporation. L'évaporation de l'eau concerne plusieurs horizons, dont l'épaisseur totale est à définir par l'utilisateur. Il peut s'agir de l'horizon labouré uniquement (si le sol présente une faible conductivité hydraulique) ou de tout le profil (si le sol présente une forte conductivité hydraulique) ou d'une partie du profil.

### **2. Paramètres nécessaires pour l'utilisation du modèle LIXIM**

Le modèle LIXIM requiert les données climatiques journalières : jour, pluie, ETP (évapotranspiration potentielle) et température moyenne du sol (ou à défaut température à 2 m dans air).

Il requiert également trois variables d'entrées, à renseigner horizon de mesure par horizon (exemple : par couche de 30 cm) :

- L'humidité à la capacité au champ qui est fonction de la texture et doit être de préférence estimée avec les données de champ : c'est la moyenne des valeurs les plus élevées obtenues en hiver, en exceptant les mesures faites juste après des événements pluvieux très intenses.
- L'humidité à pF 4.2.

- La densité apparente du sol.

Le modèle LIXIM comporte trois paramètres principaux :

- Le rapport  $k = \text{ETR}/\text{ETP}$  qui représente la fraction de l'évapotranspiration potentielle qui est réellement évaporée (compris entre 0 et 1, en sol de l'ordre de 0.5-0.6)
- La vitesse de minéralisation réelle ou potentielle (exemple 0.5 kg N/ha/j)
- La vitesse de dénitrification (éventuelle, généralement égale à 0).

Chacun de ces 3 paramètres peut être **soit** :

**Imposé** (option simulation) : le modèle fonctionne alors en simulation pure (intégré dans le modèle sol - plante STICS) ;

**Calculé** (option ajustement) : le calcul se fait par ajustement non linéaire. Ainsi, dans le cas où l'on dispose de mesures réalisées à différentes dates, le modèle minimise la somme des carrés des écarts normés entre les valeurs observées et simulées des quantités d'azote et des teneurs en eau par horizon de mesure (par exemple de 30 cm d'épaisseur). Il calcule le drainage et le lessivage et en déduit la minéralisation du sol. Dans ce dernier cas, le modèle fonctionne comme un "logiciel" de calcul dynamique.

Il génère un fichier de sortie (en format texte) comprenant, par date de mesure, le profil d'azote et d'eau observé et celui simulé avec quelques critères statistiques. Il produit également le drainage, le lessivage et la minéralisation entre 2 dates de mesure.

## 1. Domaine d'utilisation de LIXIM

LIXIM a été créé pour fonctionner principalement en régime d'infiltration, donc de préférence de septembre à juin. Rappelons qu'il n'est utilisable qu'en sol nu.

Etant conçu à la base comme un modèle de simulation des transferts d'eau et de calcul de la minéralisation par confrontation des quantités d'azote nitrique simulées entre 2 dates de mesures, il est particulièrement utile pour calculer les flux d'eau et d'azote en expérimentation et est donc très utile pour analyser les expérimentations au champ réalisées durant l'interculture.

Il a été utilisé avec succès sur différentes situations pédo-climatiques françaises pour des sols non caillouteux ni ayant des fracturations importantes qui conduiraient à de fortes infiltrations préférentielles après une pluie. Il s'est avéré relativement performant pour des sols limoneux, limono-argileux, limono-sableux du grand Bassin Parisien mais également pour les sols crayeux de Champagne (Mary et al., 1997 ; Mary et al., 1999).

Toutefois, LIXIM ne pourra simuler l'évolution d'un profil d'azote minéral avec une précision acceptable que dans la mesure où les paramètres requis seront bien renseignés.

## 2. Références bibliographiques

Addiscott, T.M. & Wagenet, R.J., 1985. Concepts of solute leaching in soils : a review of modelling approaches. *Journal of Soil Science*, 36, 411-424.

Burns, I.G. 1976. Equations to predict the leaching of nitrate uniformly incorporated to a known depth or uniformly distributed throughout a soil profile. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*, 86, 305-313.

Mary, B., Beaudoin, N. & Benoit, M., 1997. Prévention de la pollution nitrique à l'échelle du bassin d'alimentation en eau. In: *Maîtrise de l'Azote dans les Agrosystèmes* (eds G. Lemaire & B. Nicolardot), pp.289-312. INRA Editions, Paris.

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.

Van der Ploeg, R.R., Ringe, H. & Machulla, G., 1995. Late fall site-specific soil nitrate upper limits for groundwater protection purposes. *Journal of Environmental Quality*, 24, 725-733.