Réseau Mixte Technologique Fertilisation & Environnement

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

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION
Liberté
Égalité
Fraternité

Juin 2021

GUIDE DE DIAGNOSTIC DES PERTES D'AZOTE DANS LES SYSTÈMES DE CULTURE

Réalisé dans le cadre du projet **Agro-éco-Syst'N**
financé par le CASDAR et les organismes partenaires

acta LES INSTITUTS TECHNIQUES AGRICOLES · INRAE la science pour la vie, l'humain, la terre · Terres Inovia agronomie en mouvement · ITB Institut Technique de la Betterave · CTIFL · caté · Terre d'essais · Agricultures & Territoires Chambre d'agriculture Bretagne · isara Agro School for Life · UniLaSalle Terre & Sciences · Chartres La Saussaye Lycée CFA-CFPPA Exploitation · Cité des Sciences Vertes Formation Expérimentation Production · Lycée Professionnel LA RICARDE

Agro-éco-Syst'N

Guide de diagnostic des pertes d'azote dans les systèmes de culture

Table des matières

PREAMBULE 3

Un guide pour expliquer les pertes d'azote dans sa situation 3
Concrètement, ce que propose ce guide 3
Comment est bâtie la méthode de diagnostic ? 4

D'OU VIENNENT LES PERTES D'AZOTE ? 6

Qu'est-ce que c'est « une perte d'azote » ? 6
A combien se chiffrent ces pertes ? 7
Quels sont les processus à l'œuvre ? 7

Le nitrate (NO_3^-) et la lixiviation 8

L'action clé du climat : l'excédent climatique d'eau 8
Les pratiques clés pour expliquer les pertes de nitrate : 9

L'ammoniac (NH_3) et la volatilisation 13

Des processus très dépendants du sol et du climat du champ cultivé 13
Les pratiques clés pour comprendre les pertes d'ammoniac : 14

Les oxydes d'azote (N_2O et NO), la nitrification et la dénitrification 17

METHODE DE DIAGNOSTIC 18

PRELIMINAIRES 18

Comment évaluer la performance d'un système vis-à-vis des pertes d'azote ? 18
Décrire la situation étudiée et collecter les informations nécessaires au diagnostic 19
Une démarche commune aux deux types de pertes 21

DIAGNOSTIC DES PERTES DE NITRATE 22

Etape 1 : établir le résultat attendu en matière de perte de nitrate pour sa situation 22
Etape 2 : estimer les pertes 22
Etape 3 : étudier la dynamique temporelle des pertes 23
Etape 4 : comparer le niveau de pertes moyen à la rotation au résultat attendu 23
Etape 5 : identifier les « hotspots » d'émissions de nitrate parmi les années de la rotation 23
Etape 6 : comprendre le ou les déterminants de chaque « hotspot » 24
Etape 7 : faire la synthèse à l'échelle pluriannuelle 26
Etape 8 : identifier des pistes pour réussir à avoir de faibles pertes 28

DIAGNOSTIC DES PERTES d'AMMONIAC 29

Etape 1 : établir le résultat de pertes attendu en ammoniac pour sa situation 29
Etape 2 : estimer les pertes 29
Etape 3 : étudier la variabilité des pertes suivant les apports au sein de la rotation 29

Etape 4 : comparer le niveau de pertes moyen à la rotation au résultat attendu 30
Etape 5 : identifier les « hostpots » d'émissions d'ammoniac parmi les apports d'azote 30
Etape 6 : comprendre le ou les déterminants de chaque « hotspot » 30
Etape 7 : faire la synthèse à l'échelle pluriannuelle 34
Etape 8 : identifier les pistes pour avoir de faibles pertes? 34
ANNEXE 36
Comment calculer les pertes avec l'outil Syst'N ? 36
Comment extraire les données de pertes (et autres données d'intérêt) de l'outil Syst'N ? 37

Avec la contribution financière du compte d'affectation spéciale développement agricole et rural CASDAR
MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION
Liberté Égalité Fraternité

Coordinateurs de la rédaction : C. Le Gall[1] et R. Reau[2]

Co-auteurs : M. Abgrall[3], M. Davy[4], F. Célette[5], A. Guézengar[6], L. Guillomo[7], M. Heurtaux[8], D. Le Hir[6], C. Leclercq[9], V. Parnaudeau[2], R. Perrineau[7], A. Schneider[1], P. Tauvel[10], M. Thirard[7], E. Vaud[4], J-F. Vian[5]

[1]Terres Inovia, [2]INRAE, [3]CATE, [4]CTIFL, [5]Isara, [6]CRAB, [7]EPLEFPA Chartres-La Saussaye, [8]Acta, [9]UniLaSalle, [10]ITB

Modalités de citation de cet ouvrage :

Le Gall C., Reau R. et al., 2021. Guide de diagnostic des pertes d'azote dans les systèmes de culture. Projet CASDAR Agro-éco-Syst'N N° 5611.

http://www.rmt-fertilisationetenvironnement.org/moodle/course/view.php?id=146

Licence d'utilisation :

Creative Commons CC-BY-NC (possibilité de copier, partager, modifier ce document et créer de nouvelles ressources à partir de ses éléments, sous réserve de citer les auteurs et de n'en faire aucun usage commercial sans autorisation de l'auteur)

PREAMBULE

Un guide pour expliquer les pertes d'azote dans sa situation

L'évaluation des pertes via leur chiffrage au sein d'un champ cultivé au cours d'une rotation n'est pas suffisant. Pour agir, il est aussi nécessaire d'identifier les déterminants de ces pertes dans la situation étudiée et la façon dont ils interagissent pour conduire à ces résultats. Ce guide propose ainsi une **méthode permettant de comprendre la dynamique de l'azote qui s'opère dans un champ cultivé et d'expliquer les pertes d'azote**, notamment quand elles sont jugées excessives.

Concrètement, ce que propose ce guide

Tout d'abord, pour être à même de comprendre l'origine et d'expliquer la dynamique des pertes d'azote, ce guide **présente succinctement des connaissances sur :**

- **les processus impliqués dans les émissions d'azote hors du champ cultivé, via l'air et via l'eau**,
- leurs principaux déterminants (actions des pratiques et du climat, interactions avec le sol).

La méthode de diagnostic proprement dite est ensuite exposée pas à pas, pour le nitrate d'une part, et pour l'ammoniac d'autre part. Les deux démarches peuvent être mises en œuvre simultanément dans une même situation. *L'expérimentation virtuelle consiste à analyser l'effet d'un changement « fictif » de pratique, et à rechercher pas à pas une bonne combinaison de pratiques avec un outil d'évaluation des pertes tel que Syst'N. La méthode de diagnostic proposée ici a pour but essentiel de comprendre et d'expliquer les déterminants des pertes d'azote au champ, afin de faciliter in fine la conception de nouveaux systèmes de culture, dans une logique d'innovation ouverte.*

Ce guide **se concentre ainsi sur les pertes d'ammoniac et de nitrate**, même si le champ des pertes d'azote couvre aussi les oxydes d'azote et notamment le monoxyde d'azote (NO) et le protoxyde d'azote (N_2O). Ces deux derniers éléments ne sont pas couverts car :

- ces pertes sont généralement faibles en unités d'azote à l'hectare (0.5 à 1.5 kg/ha/an en moyenne), et de l'ordre de grandeur de l'erreur d'épandage sur les quantités d'engrais apportées ;
- les pertes de NO restent aujourd'hui du domaine de la recherche et leurs déterminants restent encore mal connus ;
- les pertes de N_2O sont mieux connues (mécanismes et ordres de grandeur) mais leurs déterminants à l'échelle d'un champ cultivé sont encore difficiles à cerner précisément.

Les processus de pertes conduisant à la production de NO et N_2O seront néanmoins abordés dans la partie introductive afin de fournir des clés de compréhension sur ces phénomènes et les leviers de réduction envisageables.

Comment est bâtie la méthode de diagnostic ?

Le diagnostic proposé ici est conduit à l'échelle pluriannuelle de la succession des cultures dans un champ cultivé. D'une part, parce qu'on considère qu'il y a compensation entre cultures (les très faibles pertes pendant une phase de la rotation pouvant compenser les fortes pertes d'une autre phase), et que d'autre part on ne peut prétendre expliquer les pertes de nitrates en automne et hiver sans comprendre les interactions entre la culture précédente et la culture suivante comme nous le verrons par la suite. Il est donc essentiel de rassembler les différentes informations (décrites plus loin) afin de caractériser le **système de culture, c'est à dire (i) la succession des cultures et (ii) les pratiques culturales** réalisées dans un champ au cours du temps. Les pertes d'azote dépendent non seulement des pratiques mais aussi des actions du climat récent dans le champ cultivé.

Les pertes peuvent être mesurées directement au champ, mais ces mesures restent lourdes et coûteuses. Par conséquent, différents outils proposent d'estimer ces pertes par modélisation. Ici, **la méthode proposée est illustrée avec l'outil Syst'N** qui permet à la fois de (i) chiffrer les pertes avec un modèle à pas de temps journalier, (ii) estimer la dynamique des pertes de nitrate et d'ammoniac simultanément et (iii) surtout proposer des interfaces de lecture mettant en parallèle les actions de l'homme et du climat, les états clés du champ cultivé puis les résultats de pertes d'azote. Ce qui est essentiel pour faciliter la compréhension de la dynamique de l'azote puis la réalisation du diagnostic. Cet outil est téléchargeable gratuitement sur le site du RMT fertilisation et Environnement : http://www.rmt-fertilisationetenvironnement.org/moodle/course/view.php?id=8. Une présentation de l'outil et de son maniement est proposée en ANNEXE.

Le diagnostic est mené à l'échelle **d'une situation, définie comme un champ cultivé suivant un système de culture et sous un climat.** Le champ cultivé désigne à la fois les peuplements végétaux qui se développent et se succèdent dans une parcelle, ainsi que le sol dont l'état change sous l'effet des techniques culturales et du climat. La situation choisie peut-être réelle (dans une exploitation ou une expérimentation concrète) ou bien virtuelle (imaginée ou construite de façon fictive). L'évaluation des pertes est valable pour la situation étudiée ; elle **ne prétend pas que le système de culture associé à cette situation aurait les mêmes performances dans d'autres conditions de sol ou de climat.**

Le champ cultivé peut être caractérisé au travers de différentes variables d'état et d'autres variables, qui décrivent les pratiques, le climat et le sol. Les pertes d'azote sont les variables d'état que nous cherchons à expliquer. Pour chaque situation, le diagnostic va chercher à mettre en lien le niveau de pertes obtenu avec les autres variables d'état du champ cultivé, mesurées/estimées à des moments « clés » de la campagne ; puis à identifier comment ces variables d'états sont expliquées par les actions du climat et des pratiques agricoles, compte tenu des caractéristiques de sol.

Les variables d'états ainsi que les pratiques qui sont les plus déterminantes pour comprendre et prévoir les pertes d'azote sont désignées dans la suite du document comme les variables d'états et les pratiques « clés ».

Le lien entre « pratiques clés », « variables d'état clés » et « pertes » est formalisé au sein de plusieurs logigrammes, spécifiques de chaque forme de pertes d'azote. La figure 1 en présente un exemple.

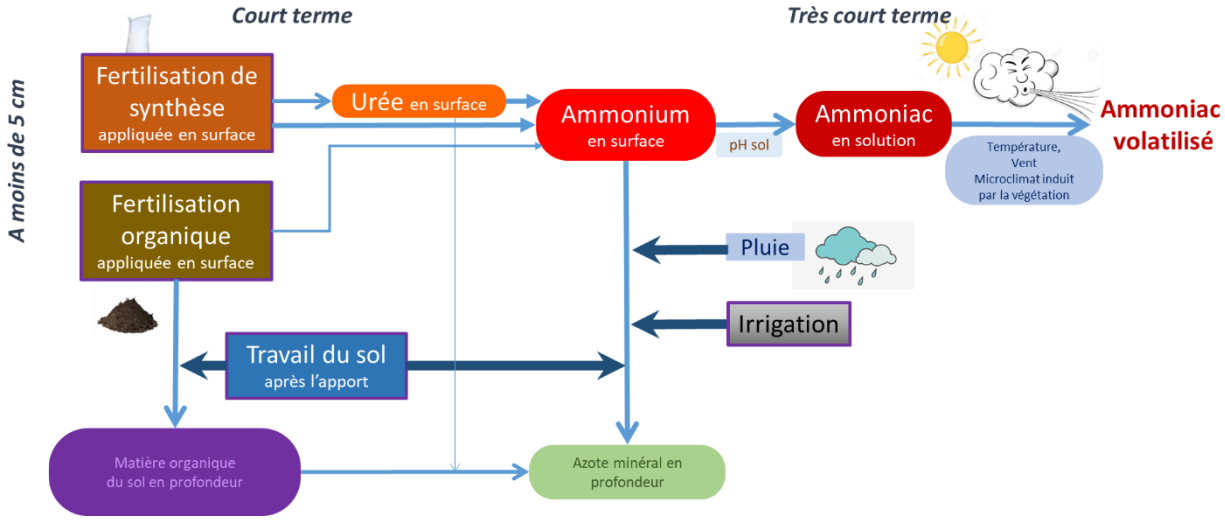

Figure 1 – Exemple du logigramme des pertes d'ammoniac

Le logigramme de la figure 1 représente comment les pertes d'ammoniac sont influencées par les différentes variables d'état clé ( ), qui sont eux-mêmes déterminés par les actions des pratiques agricoles et du climat ( ).

D'OU VIENNENT LES PERTES D'AZOTE ?

Qu'est-ce que c'est « une perte d'azote » ?

A l'échelle du champ cultivé, l'azote circule entre différents compartiments (sol, plante, atmosphère) selon une dynamique couramment représentée sous la forme du « cycle de l'azote » (figure 2). Le champ cultivé est composé de la partie du sol colonisé par les racines et des cultures qui se succèdent dans le champ. Dans ce système ainsi défini, **les pertes d'azote correspondent à toutes les sorties d'azote, à l'exception de l'azote exporté par l'agriculteur via les récoltes** (graines et/ou pailles, fourrages, tubercules…) :

- dans l'eau qui percole en profondeur dans le sol au-delà de la limite d'enracinement, sous forme de nitrate (lixiviation)
- dans l'eau qui ruisselle en surface vers les cours d'eau, sous forme de nitrate (ruissellement)
- dans l'air, sous forme d'ammoniac (volatilisation) ou d'oxydes d'azote (nitrification et dénitrification)

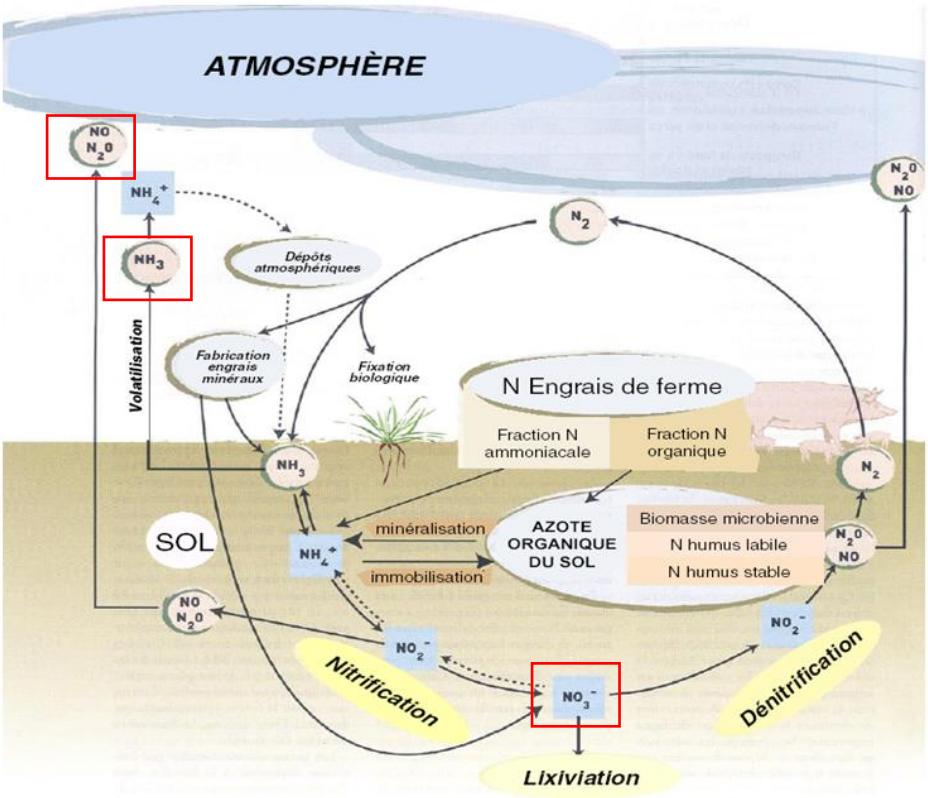

Figure 2 - Cycle de l'azote (d'après Nicolardot et al, 1997)

Il est important néanmoins de resituer ce que devient l'azote perdu après être sorti du champ cultivé ; c'est ce qu'éclaire la « cascade de l'azote » à l'échelle globale (figure 3). Ainsi, le nitrate lixivié qui est « perdu » par un champ cultivé risque de polluer l'eau potable ou de favoriser la prolifération des algues vertes, mais après intégration dans un cours d'eau il peut être aussi transformé et émis sous forme de protoxyde d'azote. Ou bien à l'inverse le protoxyde d'azote peut être transformé dans l'atmosphère en ammonium ou en nitrate, et être redéposé plus loin après transfert atmosphérique.

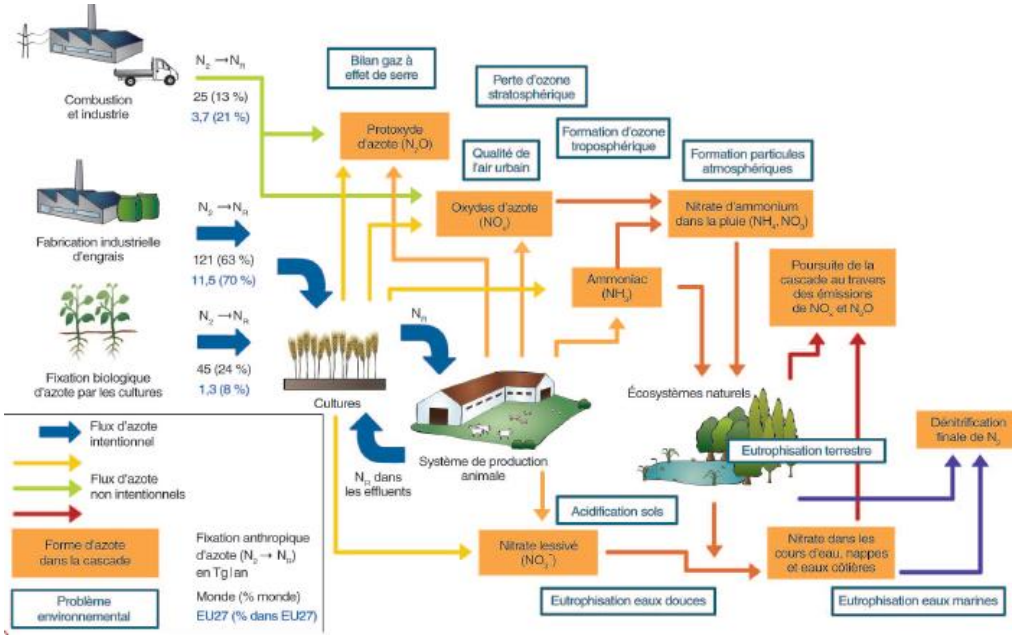

Figure 3 - Cascade de l'azote (d'après Sutton et al, 2011)

A combien se chiffrent ces pertes ?

Le tableau 1 situe les ordres de grandeur des maximums de pertes observées en France métropolitaine suivant les composés considérés :

Tableau 1 - Ordres de grandeur des maximums de pertes observés en France métropolitaine

Unités d'azote perdues par an	**Maximums observés ***	**Quand ?**
Nitrate	Peut atteindre plusieurs centaines de kg	Pendant les phases de drainage de l'eau dans le sol, avant tout en automne et hiver
Ammoniac	Peut atteindre une centaine de kg	Fugace, dans les jours qui suivent un apport de fertilisant azoté
Oxydes d'azote	Peut atteindre une quinzaine de kg	Fugace, majoritairement[1] après les apports de synthèse ou organique

** données issues de différentes expérimentations françaises*

Quels sont les processus à l'œuvre ?

Les processus à l'origine des pertes d'azote sont souvent complexes. Ils sont à la fois sous la dépendance du climat et des pratiques culturales, récentes et plus anciennes. Ils sont surtout interdépendants : la modification de l'un influe sur les autres.

[1] Elles surviennent lorsque les sols sont saturés en eau, notamment après de forts épisodes pluvieux, ou des épisodes de gel/dégel, qui sont des conditions très favorables à la dénitrification

LE NITRATE (NO_3^-) ET LA LIXIVIATION

La lixiviation est le processus au cours duquel **l'eau passe au travers des pores du sol en entraînant les éléments très solubles dans l'eau comme le nitrate, par percolation en profondeur**. En toute rigueur, on utilise ici le terme de « lixiviation » pour le nitrate qui est en solution dans l'eau. Le terme de lessivage est en effet réservé aux éléments solides comme l'argile.

L'action clé du climat : l'excédent climatique d'eau

Cette circulation de l'eau démarre lorsque l'eau a saturé la capacité de rétention d'eau par le sol : c'est le début de la percolation ou du drainage du sol au-delà de la profondeur d'enracinement. Le volume d'eau total qui percole au cours d'une campagne au-delà du niveau des racines est appelé « lame d'eau drainante ».

La lixiviation concerne quasi exclusivement le nitrate car l'ammonium est adsorbé sur le complexe argilo-humique du sol (sauf les sols très acides et/pauvres en argile). Elle est très influencée par :

- la texture et la pierrosité des horizons du sol qui sont déterminants de ses capacités de rétention de l'eau: elle est minimale dans les sols sableux et maximale dans les sols argileux.
- la profondeur d'enracinement détermine aussi cette capacité de rétention via sa capacité à absorber le nitrate présent dans le profil de sol. Dès que le nitrate descend par percolation au-delà de la profondeur d'enracinement, il devient très difficilement absorbable, sauf en terres de craie par exemple où des remontées capillaires peuvent le remettre à disposition des racines.

La lame d'eau drainante est maximale lorsque :

- Le cumul de pluie est élevé,
- Les sols ont une faible capacité volumique de rétention d'eau (texture sableuse ; beaucoup de pierres, faible profondeur du sol colonisable par les racines),
- La profondeur d'enracinement est nulle (sol nu en interculture, culture pas encore levée), ou faible (culture peu avancée dans son cycle, culture dont l'enracinement est gêné par un obstacle structural).

L'intensité de la lixiviation du nitrate est une **combinaison de la lame d'eau drainante et de la quantité de nitrates présente dans le sol au moment où le drainage se produit**. Plus celles-ci sont élevées, plus le risque d'en perdre via son entrainement au-delà de la zone d'enracinement est important.
La quantité d'azote minérale présente dans le sol au début de la phase de drainage est un indicateur intéressant pour caractériser « l'azote potentiellement lessivable ». C'est une mesure facile à réaliser au champ. Pour le drainage ayant lieu en automne et hiver, le reliquat à l'entrée de l'hiver (REH) ou en début de drainage (RDD) est l'indicateur à privilégier.

Sous le climat de la France métropolitaine, la lixiviation a lieu majoritairement en automne et en hiver, sous l'action des pluies, mais pas seulement. Pour les cultures de printemps et d'été, des épisodes supplémentaires peuvent avoir lieu plus tard, alors que la culture n'est pas encore semée ou qu'elle a encore un très faible enracinement. Durant ces périodes, un scénario courant de pertes de nitrate est le suivant : après une irrigation suivie de pluies significatives, le sol se sature en eau et provoque un drainage. Celui génère de la lixiviation d'autant plus importante que le sol contient beaucoup d'azote minéral (fertilisation précédant le semis et/ou minéralisation de printemps).

Les pratiques clés pour expliquer les pertes de nitrate :

De nombreuses pratiques influencent les pertes de nitrates. Cependant, certaines d'entre elles ont un rôle majeur, parce qu'elles permettent d'expliquer l'essentiel de la variabilité de la quantité d'azote minéral du sol présente au début du drainage, au sein d'un champ cultivé, pour une année donnée.

Ces pratiques clés se résument au nombre de quatre pratiques essentielles[2] :

- la **culture précédente**, par sa nature et la façon dont elle a été cultivée, fertilisée en azote et récoltée, est une composante de l'azote disponible en été et en automne,
- la **culture suivante**, par sa nature, sa date de levée et sa croissance, conditionne le potentiel de piégeage de nitrate. La combinaison de ces deux premières pratiques, le **couple précédent-suivant** conditionne la base du bilan offre-demande d'azote minéral,
- la **fertilisation organique** depuis la récolte de la culture précédente jusqu'en automne,
- la **fertilisation azotée de synthèse appliquée en été et en automne**.

i. La culture précédente

La quantité d'azote minérale laissée par la culture précédente varie grandement en fonction de la culture considérée. Le COMIFER a mis cela en évidence et ces tendances ont aussi été confirmées par de récents travaux, menés en Belgique et en France. Ces différences s'expliquent majoritairement par (i) la quantité de résidus aériens et souterrains retournés au sol, (ii) leur teneur en azote (feuilles de colza riches en azote ou au contraire pailles de céréales pauvres en azote…) et (iii) leur date de récolte. Plus la date de récolte est précoce, plus la minéralisation en sol nu est longue, plus il y a d'azote disponible dans le sol à l'automne ; ainsi, après les cultures récoltées en automne comme la betterave, il y très peu d'azote disponible, alors qu'après des récoltes de juillet, il y en a beaucoup.

L'effet de la culture précédente sur l'azote disponible en été et en automne a été ici considéré pour des cultures à l'équilibre de fertilisation. Un excédent de fertilisation azotée engendre un surplus d'azote disponible à l'effet précédent expliqué ci-dessus.

ii. La culture suivante

La culture suivante conditionne la capacité de piégeage de l'azote minéral entre la récolte du précédent et le début du drainage. Cette culture peut être une culture principale de production, une culture intermédiaire, ou une culture dérobée (à vocations fourragère, énergétique…). Elle permet de piéger de l'azote disponible en été et automne, et contribue ainsi à avoir de faibles reliquats d'azote en entrée d'hiver. Cette capacité d'absorption des cultures dépend de leur nature et de leur durée de croissance. Par exemple, du fait de son semis précoce et de sa croissance importante sur la phase automnale, le colza a une grande capacité de piégeage de l'azote du sol, tandis qu'une céréale d'hiver a une capacité faible.

Le couplage 2 à 2 de cultures successives d'une rotation est ainsi une clé de compréhension du potentiel de lixiviation. Par exemple, après une culture précédente annonçant une importante quantité d'azote minéral dans le sol, le potentiel de lixiviation repose sur la capacité de la culture suivante de piéger une grande partie de cette quantité importante d'azote avant le début du drainage ; et si la culture de production suivante dans la rotation présente de faibles capacités (cas majoritaire en dehors du colza d'hiver) ou si son semis intervient après la période principale de drainage en automne /hiver (cas des cultures de printemps et d'été), l'insertion d'une culture intermédiaire

[2] Pour les cultures de printemps irriguées, on pourrait ajouter une cinquième pratique-clé : l'irrigation. En effet, quand l'irrigation coïncide avec un épisode pluvieux (exemple d'un orage juste après un passage d'irrigation), cela accroit le volume de la lame drainante et par conséquent le risque de lixiviation du nitrate.

contribue à compenser ce faible piégeage. En pratique, cette succession de culture peut être décrite par le triplet :

Culture de production N	Culture intermédiaire	Culture de production N+1

iii. La fertilisation organique d'été et d'automne

La troisième pratique clé est la fertilisation organique depuis la récolte de la culture précédente. Souvent, les fertilisants organiques sont appliqués en période d'interculture pour éviter d'abimer les cultures en place ou de passer sur les sols en conditions humides. Ils sont placés après les récoltes de début d'été quand le sol est sec, donc portant pour éviter de dégrader sa structure. Ces apports agissent directement et à **court terme** sur l'azote disponible dans le sol à cette période, car une partie du fertilisant est déjà sous forme minérale, et que la minéralisation de l'azote organique du produit peut être rapide. Ils conduisent à un fort potentiel de lixiviation, à chaque fois que cet azote minéral n'est pas piégé rapidement par la culture suivante[3].

Une autre pratique vient influencer le stock d'azote en entrée drainage, mais elle agit à **long terme**. Réalisée régulièrement au cours des rotations successives, la fertilisation organique contribue à expliquer pourquoi on a beaucoup d'azote disponible en été et en automne dans le sol de certains champs cultivés, via son action sur l'humus dans le temps long et les phénomènes de minéralisation.

iv. La fertilisation azotée de synthèse

La fertilisation azotée au printemps de la culture précédente a longtemps été présentée comme la première pratique à maitriser pour faire de l'eau de qualité. Son effet est réel, mais **cette fertilisation de printemps agit sur le moyen terme**, indirectement via l'effet de la culture précédent comme cela a déjà été décrit au paragraphe i) « la culture précédente ».

Même s'ils restent rares, des fertilisants azotés de synthèse sont appliqués en période d'interculture, ou encore au semis ou en début de végétation sur des cultures d'hiver en place comme le colza d'hiver. **Ces apports d'été et d'automne agissent directement et à court terme sur l'azote disponible dans le sol à cette période**, car tout ou partie du fertilisant est sous forme minérale. Ils conduisent à un fort potentiel de lixiviation, à chaque fois que cet azote minéral n'est pas piégé rapidement par la culture suivante

Les figures 4 à 6 présentent les principales pratiques clés, et la façon dont elles interagissent sur les variables d'état clés, pour les pertes survenant :

- ***Sous culture annuelle, en automne et en hiver : figure 4***
- ***Sous culture bisannuelle ou pérenne, en automne et en hiver : figure 5***
- ***Sous culture annuelle, au printemps : figure 6***

[3] Les pailles de céréales qui sont enfouies peuvent contribuer à piéger par organisation 10 à 30 unités seulement.

La figure 4 présente le cas le plus couramment décrit des pertes d'azote intervenant sous culture annuelle, en automne et en hiver.

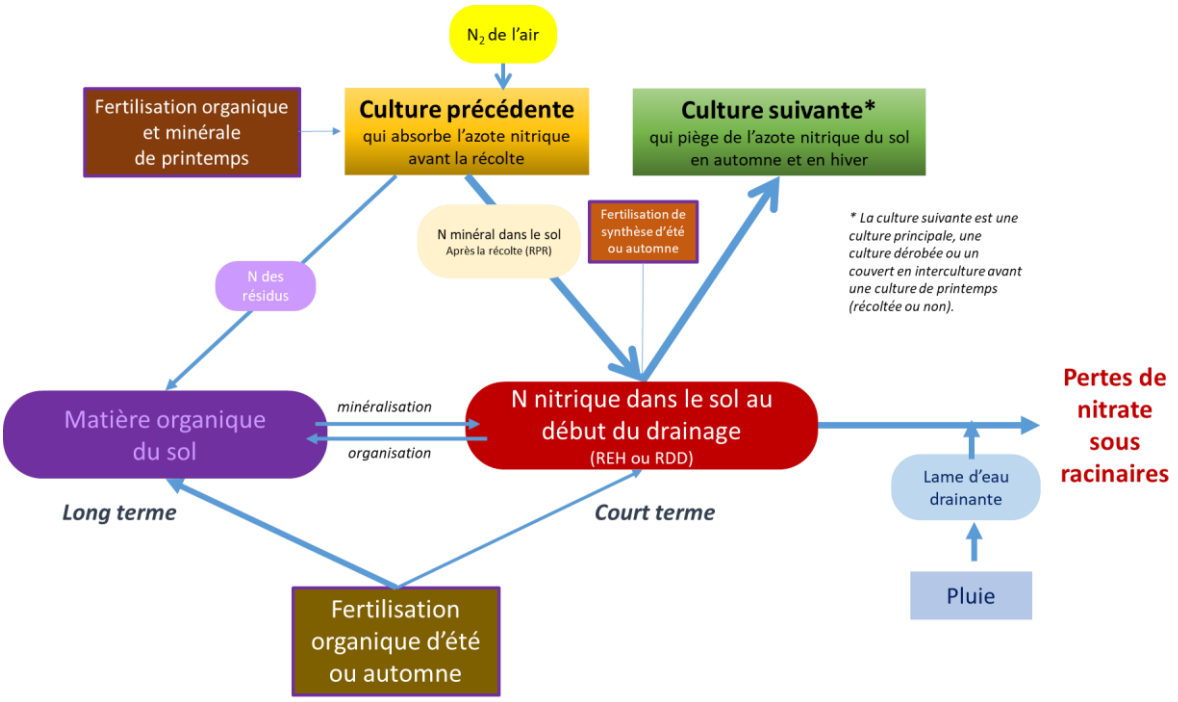

Figure 4 - Pratiques-clés et états-clés pour comprendre les pertes de nitrate en automne-hiver sous une culture annuelle

La figure 5 présente les pertes survenant en automne et en hiver, mais sous culture pérenne ou bisannuelle dont les déterminants, états clés et pratiques clés diffèrent de la situation précédente.

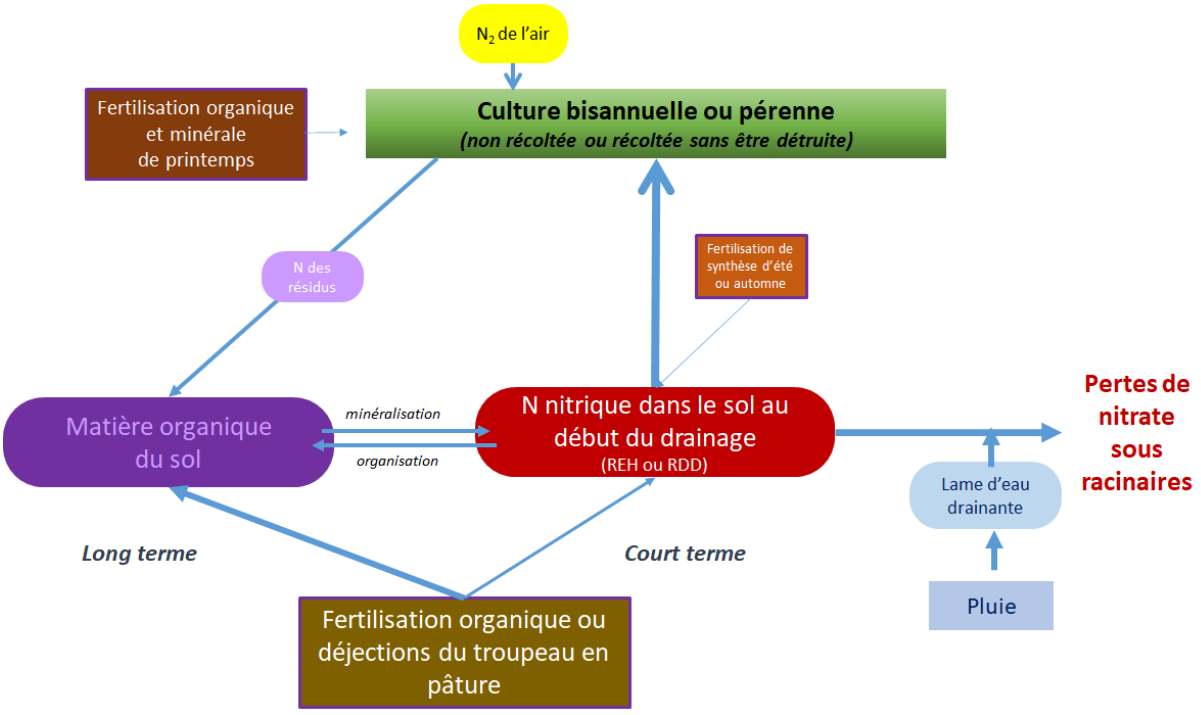

Figure 5 - Pratiques-clés et états-clés pour comprendre les pertes de nitrate sous culture bisannuelle ou pérenne

La figure 6 présente le cas des pertes de nitrate au printemps, sous culture annuelle.

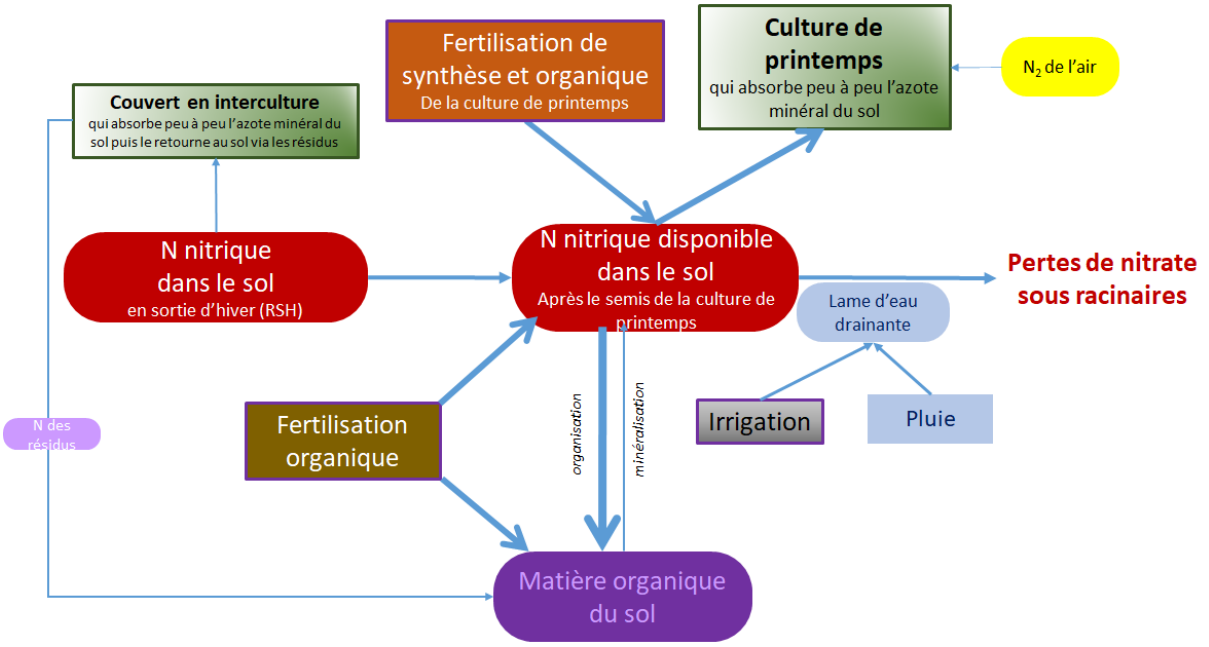

Figure 6 - Pratiques-clés et états-clés pour comprendre les pertes de nitrate dans un champ cultivé avant et sous les cultures de printemps

Avant une culture de printemps, le risque de pertes de nitrate à l'automne et en hiver est généralement faible si le sol est couvert par une culture : c'est le cas d'un précédent prairie détruit au printemps, ou d'une culture intermédiaire. Attention cependant lorsque cette culture précédente est détruite dès l'automne, et notamment dans les champs recevant de la fertilisation organique en automne, comme cela est fréquent avant la betterave sucrière.

Sous la culture de printemps, le risque de pertes de nitrate est faible tant que le sol contient peu d'azote minéral et/ou que le bilan hydrique s'inverse définitivement avec la montée de l'évapotranspiration. Une première difficulté est que, souvent, les cultures de printemps reçoivent toute ou partie de leur fertilisation azotée au semis : ainsi, une grande quantité d'azote minéral dans le sol est présente pendant la levée et le début de la croissance végétative où son absorption reste lente. Quand cette forte quantité d'azote disponible dans le sol coïncide avec une période de drainage le risque de pertes de nitrate sous culture de printemps est élevé ; et c'est ce qui peut arriver dans les parcelles irriguées : lorsque le déficit hydrique a été élevé au semis ou après la levée, les irrigants déclenchent une irrigation précoce, mais si par hasard cette irrigation est suivie d'un retour de pluies conséquentes, on observe alors un ou des épisodes de drainage tardifs responsables de pertes de nitrate au printemps.

En résumé, les pertes de nitrate sont la résultante de nombreuses interactions entre les pratiques clés, le sol et le climat du champ cultivé. Ces interactions sont différentes d'un système à l'autre, c'est pourquoi il est important d'analyser spécifiquement chaque situation. Pour aboutir à une situation avec de faibles risques de pertes de nitrate, il faut avoir une faible quantité d'azote nitrique disponible dans le sol avant tout épisode de drainage. Les voies pour y parvenir sont multiples, suivant que l'on mobilise des pratiques agissant à long, moyen ou/et court terme.

L'AMMONIAC (NH_3) ET LA VOLATILISATION

La volatilisation d'ammoniac (NH_3) est le **transfert vers l'atmosphère de l'ammoniac gazeux présent à la surface du sol**. Cet ammoniac est issu de la transformation de l'azote présent sous forme d'ammonium ($NH4^+$). **Tout cela se passe en surface du sol du champ cultivé**. Quand cet azote est situé dans le sol au-delà de 5 cm de profondeur, la volatilisation est considérablement réduite.

Les pertes par volatilisation surviennent très rapidement après les apports d'engrais azotés et les enfouissements de résidus végétaux riches en azote **: la majorité de la volatilisation se produit ainsi dans les heures qui suivent, et elle est souvent pratiquement achevée au bout de 3 semaines.**

Des processus très dépendants du sol et du climat du champ cultivé

L'intensité de la volatilisation dépend en particulier de :

- **La capacité d'échange cationique (CEC)** du sol car elle agit sur la fraction d'ammonium (qui est un cation) qui peut être soumise à volatilisation. Pour que l'ammonium soit transformé en ammoniac, il faut qu'il soit dissout dans la solution présente en surface du sol ; si la CEC de l'horizon de surface est importante (cas des sols riches en argile et matière organique), l'ammonium est adsorbé sur les particules de sol et ne se dissout pas dans cette solution. Ainsi, plus la CEC est faible, plus le risque de volatilisation est important.
- **Le pH du sol** en surface car il conditionne l'équilibre de la transformation de l'ammonium en ammoniac. Plus le pH est élevé (plus de 7), plus l'équilibre se déplace vers la production d'ammoniac au détriment de l'ammonium[4] (figure 8).
- **La température du sol** car elle agit également sur cet équilibre chimique. Plus la température est élevée, plus l'équilibre penche vers la production d'ammoniac (figure 7). Son action est aussi synergique de celle du pH (figure 8) : pour un pH donné, la quantité d'ammoniac produite augmente exponentiellement avec la température.

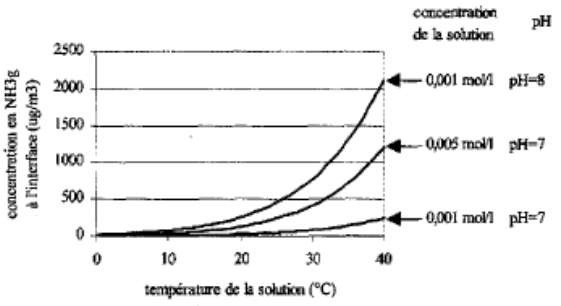

Figure 7 - Effet conjoint de la température et du pH sur la production d'ammoniac (CORPEN, 2001)

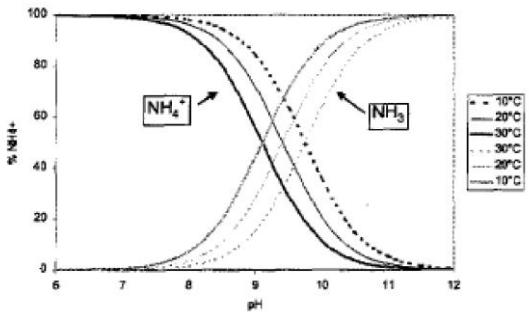

Figure 8 - Effet du pH sur la transformation de l'ammonium en ammoniac (CORPEN, 2001)

A ce titre, les épandages de fin d'été, sur sol sec et chaud sont plus sensibles à la volatilisation que des épandages de printemps, sur sol frais.

Une fois produit à la surface du sol, l'ammoniac peut alors se diffuser vers l'atmosphère. Mais pour que ce transfert ait lieu, il faut qu'il y ait une différence de concentration entre la surface du sol et la couche d'air environnante : lorsqu'il y a peu de vent, cette couche d'air est peu renouvelée et donc

[4] Le pH de l'engrais est tout aussi important. Par exemple, l'hydrolyse de l'urée conduit à une augmentation du pH autour des granulés, ce qui favorise très nettement la production d'ammoniac.

vite « saturée » en ammoniac, et le transfert se retrouve vite stoppé ; dans le cas contraire, le transfert se poursuit longtemps et la quantité d'ammoniac volatilisée devient alors importante.

Les pratiques clés pour comprendre les pertes d'ammoniac :

De nombreuses pratiques influencent les pertes par volatilisation. Cependant certaines d'entre elles ont un rôle majeur, parce qu'elles agissent directement sur les états-clés et les flux d'azote ou indirectement en modifiant l'état du champ cultivé, sol et microclimat en surface compris… Ces pratiques clés sont au nombre de cinq : la fertilisation de synthèse appliquée en surface, la fertilisation organique appliquée en surface, le travail du sol après l'apport, l'irrigation, et la culture en place.

i. La fertilisation azotée de synthèse

La quantité d'ammoniac volatilisé dépend d'abord de la quantité d'ammonium présente à la surface du sol après l'apport. A ce titre, **le choix de la forme d'engrais apporté est crucial**. En effet, plus l'engrais est riche en ammonium (NH_4^+) et/ou en urée (qui est son précurseur), plus le risque de volatilisation est fort.

Pour les principaux engrais de synthèse utilisés en France, l'urée est l'engrais le plus « à risques » car 100% de la quantité apportée devient de l'ammonium (après hydrolyse de l'urée, qui se fait très rapidement). La solution azotée qui contient 50% d'urée, 25% d'ammonium (soit à terme 75% d'ammonium) et 25% de nitrate présente un risque intermédiaire. Et l'ammonitrate qui contient 50% de nitrate et 50% d'ammonium est moins à risque - cf figure 9.

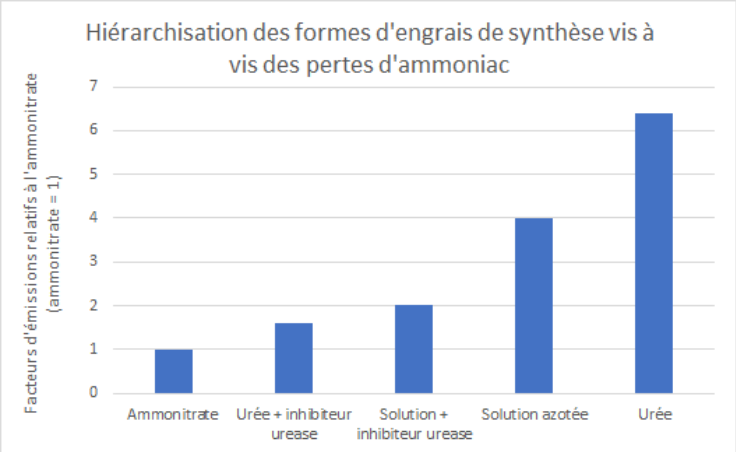

Figure 9 – Hiérarchie des risques de volatilisation suivant les engrais de synthèse par comparaison avec l'ammonitrate (EMEP, 2016).

On considère ainsi que l'urée multiplie par 6.5 les émissions par rapport à l'ammonitrate[5].

La dose d'engrais apporté est bien évidemment aussi un facteur important : plus la quantité d'ammonium et d'urée apportée est importante, plus le risque de volatilisation augmente. C'est une question de dose d'azote apportée, et une question de forme d'azote. 100 kg d'ammonitrate apportent « 50 kg » d'ammonium alors que 100 kg d'urée apportent in fine 100 kg d'ammonium, soit

[5] En revanche, lorsque l'urée est associée à un inhibiteur d'uréase, son potentiel de volatilisation est considérablement réduit. En effet, les inhibiteurs d'uréase ajoutés aux engrais bloquent temporairement l'hydrolyse de l'urée en ammonium pendant 5 à 15 jours ce qui permet de réduire la volatilisation.

le double. Et si la dose d'un engrais est fractionnée en 2 moitiés, on divise par 2 le risque de volatilisation à chaque apport.

Enfin, le choix de la **date d'application** est également crucial. Si l'apport est positionné juste avant une pluie (ou une irrigation), on réduit fortement les risques de volatilisation, tel que cela est décrit plus bas dans le chapitre sur l'irrigation.

ii. La fertilisation azotée organique

Comme les produits de synthèse, les produits organiques apportent en surface une quantité plus ou moins importante d'ammonium, ou d'acide uréique, son précurseur. L'état-clé pour la volatilisation étant la concentration en ammonium et acide uréique à la surface du sol juste après l'apport, c'est bien **la quantité apportée au moment de l'épandage qui compte** et non la minéralisation du produit organique *in situ*, trop lente pour influencer la volatilisation de façon significative.

Les produits à plus forte concentration en ammonium ou acide uréique sont les plus risqués en termes de volatilisation (fientes, lisiers…). Par ailleurs, la quantité d'azote volatilisé est plutôt plus forte pour les produits solides que pour les produits liquides (facteur d'émissions autour de 0.8 au lieu de 0.5).

Comme pour les engrais de synthèse, la date d'application est cruciale car le positionnement de l'apport avant une pluie favorise l'infiltration de l'ammonium et sa soustraction à la volatilisation.

iii. Le travail du sol au moment de l'épandage et après

Les pratiques culturales de travail du sol qui permettent d'appliquer l'engrais en profondeur ou qui consistent à retourner la surface du sol après l'application contribuent à faire passer l'urée et l'ammonium en profondeur et à diminuer leur concentration en surface. Elles concernent :

- L'épandage de l'engrais combiné à un travail du sol: comme les injecteurs permettent d'injecter le produit organique liquide à 15 ou 20 cm de profondeur ; ou encore les dispositifs d'épandage d'engrais de synthèse insérés sur les outils de travail du sol ou de binage, qui permettent de localiser l'engrais de 5 à 15 cm de profondeur.
- Le travail du sol postérieur à l'épandage : un passage d'outil de travail du sol permet d'enfouir une grande partie de l'engrais apporté. Cette technique est efficace dans la mesure où elle est réalisée avant que la volatilisation de l'engrais azoté ait lieu ; dans la pratique, il est recommandé de réaliser cet enfouissement dans les heures qui suivent l'apport d'engrais.

iv. L'irrigation

Une pluie qui a lieu dans les heures qui suivent l'application permet de faire percoler l'azote au-delà des premiers centimètres du sol et de le soustraire à la volatilisation. Comme une pluie, l'irrigation sature la surface du sol et l'eau qui percole peut entrainer l'ammonium au-delà de 5 cm. De plus, elle contribue à créer un microclimat humide en surface du champ cultivé défavorable à la volatilisation. Positionner ainsi des irrigations après l'application des engrais azotés (ou bien positionner l'apport juste avant une pluie annoncée) peut aider à maîtriser les risques de volatilisation.

v. La culture en place

La culture en place vient influencer la volatilisation :

- *de manière directe*, la volatilisation est très faible pour les cultures qui ne reçoivent pas d'engrais azoté. C'est le cas de la plupart des légumineuses ou des cultures non fertilisées,
- *de manière indirecte*, par le biais du microclimat qu'elle va engendrer et qui va influencer la volatilisation. En effet, si la végétation en surface est régulière et dense lors de l'application, elle fait baisser la température et la vitesse du vent à l'intérieur du couvert : les risques de volatilisation sont ainsi réduits. Par ailleurs, une partie de l'ammoniac émis peut être piégée par le couvert et absorbée au niveau des stomates de la plante En revanche, quand l'application d'engrais est réalisée sur sol ou végétation peu développée, les risques de volatilisation sont accrus.

La figure 10 résume le lien entre les pratiques, les états clés et les pertes d'ammoniac après un apport.

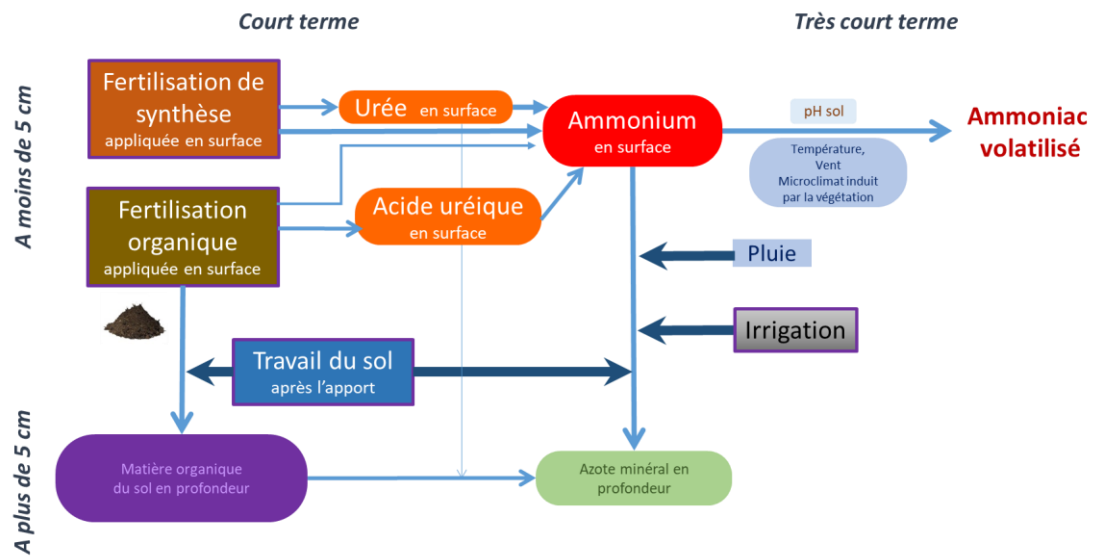

Figure 10 - Pratiques-clés et états-clés pour comprendre les pertes par volatilisation de l'ammoniac dans un champ cultivé

Comme indiqué plus haut, l'état clé principal est la quantité d'ammonium en surface et son évolution après l'apport. Cette quantité dépend en premier lieu de la fertilisation réalisée, et en particulier de la forme d'engrais utilisée qui – à dose égale – peut faire varier du simple au triple la quantité d'ammonium mis en surface. **Cette quantité d'ammonium apporté via les engrais correspond à l'azote potentiellement volatilisable (APV).**

En résumé, les pertes d'ammoniac sont des évènements fugaces, en lien direct avec la quantité d'ammonium présent à la surface du sol. Les deux clés pour avoir de faibles pertes par volatilisation sont (i) d'apporter une faible quantité d'azote potentiellement volatilisable ou (ii) de l'entrainer au-delà de 5cm dans les jours suivant l'apport.

LES OXYDES D'AZOTE (N_2O ET NO), LA NITRIFICATION ET LA DENITRIFICATION

Le protoxyde d'azote (N_2O) et les oxydes d'azote (principalement le NO, et secondairement le NO_2) sont issus majoritairement des processus de nitrification et de dénitrification, qui sont généralement réalisés par des microorganismes. Pour donner lieu à des émissions vers l'atmosphère, ces processus doivent avoir lieu dans les dix premiers cm du sol. Au-delà, le NO et N_2O produits sont consommés par les microorganismes avant d'atteindre la surface du sol et s'échapper.

Observée en présence d'oxygène dans le sol (conditions aérobies), la nitrification est l'oxydation de l'ammonium (NH_4^+) successivement en nitrite (NO_2^-) et nitrate (NO_3^-). Dans la chaine de réactions chimiques conduisant à la production de nitrate, du NO et du NO_2 sont produits. C'est le principal processus à l'origine des émissions de NO. Les mécanismes conduisant à la libération de N_2O au cours de la nitrification sont moins clairement connus.

La dénitrification est une forme de respiration microbienne. C'est la réduction successive du nitrate en nitrite puis en NO et N_2O, puis enfin en azote moléculaire (N_2). NO et N_2O sont ainsi des produits intermédiaires de la réaction. Celle-ci a lieu principalement en absence d'oxygène dans le sol (conditions anaérobies). Ces conditions surviennent le plus souvent lorsque qu'il est saturé en eau (après une forte pluie ou un dégel, après un tassement). La majorité des microorganismes vivant dans les sols ont la capacité de réduire le nitrate en nitrite. Le N_2O peut être éliminé via sa transformation en N_2, ce qui constitue le seul mécanisme identifié d'élimination de N_2O dans notre écosystème. Ce mécanisme est sous le contrôle de certaines populations bactériennes, leur capacité à réduire le N_2O en N_2 est très faible pour des sols dont le pH est acide (moins de 6.4) et au contraire plutôt élevée pour des pH basiques (plus de 6.8)[6].

[6] En plus des émissions dites « directes », c'est-à-dire des émissions issues des processus de production de N_2O dans les sols, il existe aussi des voies de production du N_2O dites « indirectes ». Il s'agit d'émissions de N_2O à partir de :

- nitrate ou de nitrite dissous dans les eaux et entrainé vers les nappes phréatiques ou vers les eaux superficielles par ruissellement,
- dépôt d'ammoniac ou de NOx qui, dissout dans l'eau, va se transformer en NH_4^+ et ainsi alimenter à nouveau les processus de nitrification et dénitrification ; il peut aussi être transformé en nitrate, lixivié, et contribuer aux émissions indirectes de N_2O selon le processus décrit ci-dessus.

METHODE DE DIAGNOSTIC

PRELIMINAIRES

Comment évaluer la performance d'un système vis-à-vis des pertes d'azote ?

Commençons par définir **le résultat attendu** en termes de performance azotée.

Ce résultat attendu fait **référence au résultat que l'on souhaite obtenir demain,** sans faire référence aux résultats qui étaient obtenus hier. En effet, ici il s'agit de se placer dans une logique de résultat ambitieux et de service à rendre demain, plutôt que dans une logique d'amélioration ou d'évolution des résultats, en faisant « moins pire qu'hier ». Les pertes attendues dépendent du contexte dans lequel se situe le champ cultivé, et des enjeux tant sur la qualité de l'eau que de l'air ou de réchauffement climatique. Dans l'idéal, ce résultat doit être défini pour chaque situation étudiée.

D'un point de vue pédagogique, il est important de définir **3 classes de résultats** : une classe de réussite, une classe d'échec et entre les deux une classe intermédiaire de résultats acceptables. Cela conduit à proposer deux seuils de résultats, un premier « attendu » et un deuxième « acceptable », ce qui est aussi utile pour éviter qu'une incertitude sur les calculs ou les mesures conduisent à assimiler le résultat à un échec à une réussite, et inversement. La « fourchette » entre les deux seuils doit être adaptée en fonction de l'incertitude connue sur l'estimation des pertes.

Ce guide propose des niveaux de performances standardisés sur le nitrate et l'ammoniac. Toutefois, nous recommandons d'adapter ces niveaux de performances aux enjeux et au contexte de votre situation.

Ces niveaux de performances sont définis au travers de seuils de pertes, établis en valeur relative à la dose d'azote apportée pour l'ammoniac et au volume d'eau drainée pour le nitrate, plutôt que par des pertes absolues en kgN/ha. Ceci est utile afin de comparer des situations entre elles en faisant abstraction de deux grands déterminants des pertes en kg N/ha/an que sont le volume d'eau drainé (lié au climat de l'année) pour le nitrate et la dose de l'apport pour l'ammoniac.

La performance élémentaire est évaluée par rapport aux 2 seuils :

1. Nitrate : les valeurs des seuils proposées ont été calculées à partir de la norme de potabilité des eaux dans les captages, qui est de 50 mg de nitrate/l d'eau, qui équivaut à 11 mg d'azote/l d'eau. Rapporté à 100 mm de lame drainante sous racinaire, cela revient à 11 kg d'azote pour 100 mm (soit 11 kgN/an/ 100 mm). Pour simplifier, le seuil pour définir une situation à faibles pertes de nitrates a été fixé à 10 kgN/ha/100 mm. Cependant, les niveaux attendus peuvent être encore plus faibles : 37 mgNO_3^-/l dans certains captages d'eau potable, ou encore beaucoup moins dans les bassins à algues vertes (environ 10 mgNO_3^-/l). Aussi le seuil de haute performance a été choisi pour correspondre à un niveau d'exigence de 5 kgN/ha/100 mm. Les situations sont considérées comme à faibles pertes de lixiviation au-dessous de 5 kgN/ha/100 mm, et comme à pertes moyennes entre 5 et 10 kgN/ha/100 mm.

2. Ammoniac : faute de norme comme pour le nitrate et compte tenu des références expérimentales actuellement disponibles[7], les seuils de 5 et de 10 kg de N d'azote volatilisé pour 100 kg de N apporté (qui correspond à un seuil 5% ou 10% de la quantité totale apportée), sont proposés pour délimiter les trois classes de pertes (faible, moyenne, élevée).

Afin de qualifier la performance azotée globalement sur une situation donnée, la performance sur le nitrate ET l'ammoniac ont été agrégés suivant la table de contingence ci-dessous. Il a été ainsi défini 3 niveaux de « double performance » :

1. « haute » : qui a de faibles pertes de nitrate ET d'ammoniac,
2. « intermédiaire » : qui a de faibles pertes pour l'une des formes mais des pertes élevées pour l'autre OU qui a des pertes moyennes pour les deux formes,
3. « basse » » : qui a des pertes élevées pour au moins l'une des deux formes

Tableau 2 - Qualification de la double performance azotée d'un champ cultivé suivant les niveaux des émissions d'ammoniac et de nitrate

Seuils des émissions hors du champ cultivé		**Volatilisation d'ammoniac** (kg N/ha pour 100 kg N apportés)		
		plus de 10	5 à 10	moins de 5
Lixiviation de nitrate (kg N/ha /100 mm de lame d'eau drainante)	moins de 5	Intermédiaire	Haute	Haute
	5 à 10	Basse	Intermédiaire	Haute
	plus de 10	Basse	Basse	Intermédiaire

Décrire la situation étudiée et collecter les informations nécessaires au diagnostic

La première étape est la **caractérisation de la situation étudiée**. L'essentiel est de décrire les pratiques clés et les principaux états clés présentés plus haut sans rentrer dans les détails dans un premier temps, et qui seront donc différent si on s'intéresse aux pertes de nitrate ou d'ammoniac. Si l'on veut une analyse approfondie et que l'on dispose de moyens importants, on pourra se baser sur le tableau suivant.

Tableau 3 – Eléments de caractérisation d'une situation utiles pour le diagnostic des pertes d'azote

	Pour étudier les pertes de nitrate	**Pour étudier les pertes d'ammoniac**
Sol	Teneur en matière organique du sol	CEC, pH
Climat	- Pluies cumulées sur les différentes périodes de drainage - Lame d'eau drainante sur les différentes périodes de drainage	- Températures moyennes journalières sur les 21 jours après chaque apport d'engrais minéral ou de produit organique - Pluies moyennes journalières sur les 21 jours après chaque apport - Vitesse moyenne journalière du vent sur les 21 jours après chaque apport

[7] Les références en question sont celles issues des projets Volat'NH3 (Casdar, 2009-12), EvaPRO (Ademe, 2015-19) et EvaMIN (2016-19).

Succession culturale	Nom des espèces et ordre de succession Date de semis / date de récolte Rendement Quantité d'azote retourné au sol via les résidus de culture (ou de la culture intermédiaire pour les drainages de printemps) Quantité d'azote absorbée par la culture suivante au début de chaque période de drainage (y compris au printemps)	Nom des espèces et ordre de succession
Fertilisation	Quantité d'azote totale apportée pour chaque culture : - Via la fertilisation de synthèse au printemps - Va la fertilisation organique au printemps - Via la fertilisation organique d'été ou d'automne - Via la fertilisation de synthèse d'été ou d'automne	Pour chaque apport de chaque culture : - Utilisation d'inhibiteur d'uréase : oui/non - Quantité d'azote totale apportée - Quantité d'azote apportée sous forme ammonium - Quantité d'azote apportée sous forme d'urée ou d'acide uréique
Travail du sol		Pour chaque culture, sur les 3 semaines après chaque apport : - Date - Profondeur d'enfouissement
Irrigation	- Dates - Quantités en mm	- Dates - Quantités en mm
Variables d'états du champ cultivé	- Reliquat azoté (nitrate et ammonium) à la récolte de la culture précédente - Reliquat azoté (nitrate et ammonium) au début de chaque période de drainage : ● Entrée d'hiver ● Autre période de drainage, notamment au printemps - Quantité d'azote minéralisé issu des résidus de la culture précédente (ou de la culture intermédiaire) au début de chaque période de drainage - Quantité d'azote minéralisé issu de la minéralisation de l'humus au début de chaque période de drainage	Après chaque apport sur chaque culture : - Evolution de la quantité d'ammonium laissé en surface sur les 21 jours après l'apport - Evolution de la quantité d'urée laissée en surface sur les 21 jours après l'apport - Evolution de la quantité d'acide uréique laissé en surface sur les 21 jours après l'apport

Une démarche commune aux deux types de pertes

La démarche d'analyse globale est similaire pour les deux types de pertes étudiées mais les contenus des étapes, et en particulier des étapes 3, 5 et 6 sont différents, car les deux types de pertes ne mettent pas en jeu les mêmes pratiques et état clés.

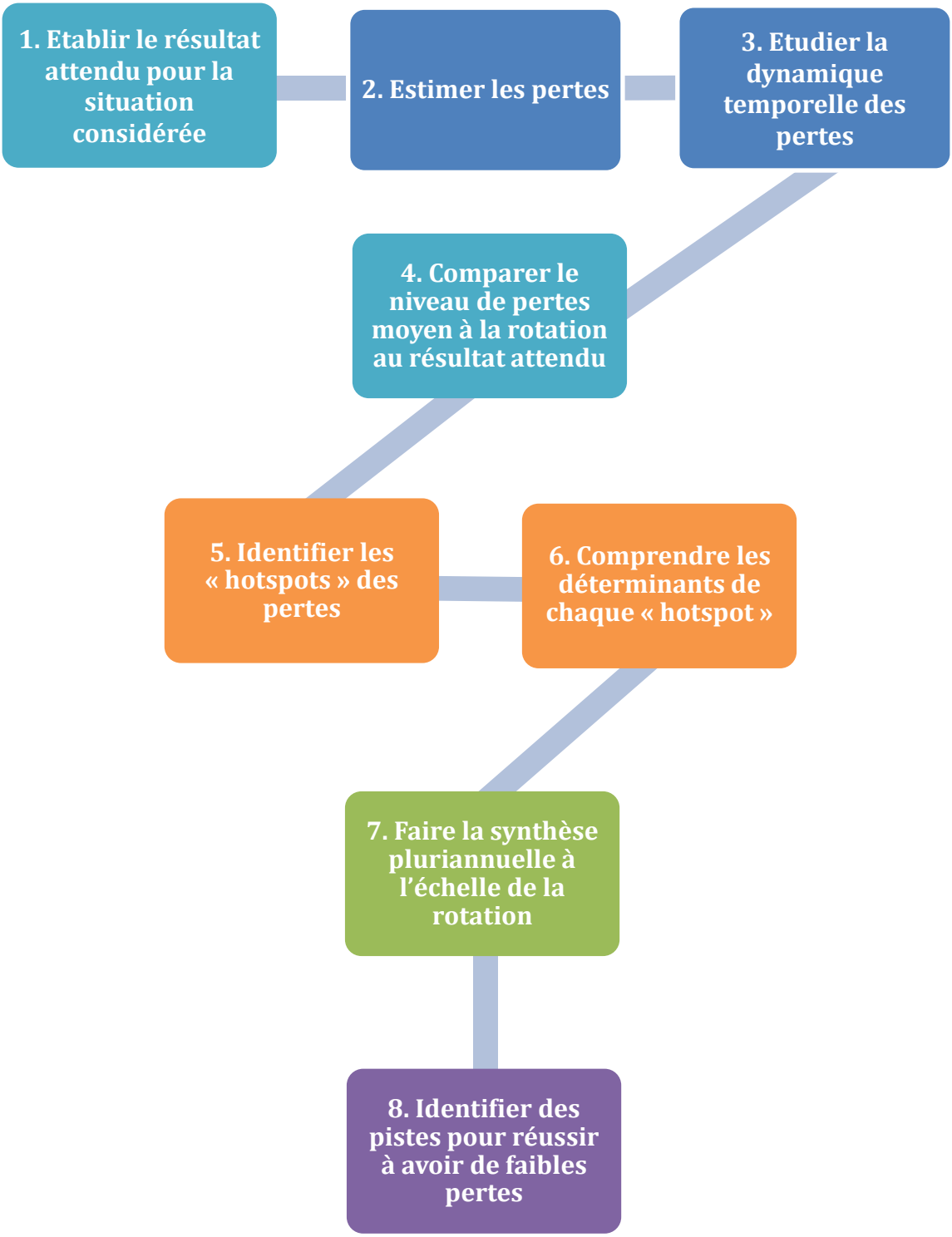

Figure 11 – Déroulé proposé pour la démarche de diagnostic des pertes d'azote

DIAGNOSTIC DES PERTES DE NITRATE

Etape 1 : établir le résultat attendu en matière de perte de nitrate pour sa situation

Ce résultat attendu **fait ici référence au résultat que l'on souhaite obtenir demain** sans faire référence aux résultats qui étaient obtenus hier. Ce résultat est **chiffré**. Il est exprimé en kg N/ha/an, et il peut être traduit ensuite en valeur relative à la lame d'eau drainante en kg N/ha/100 mm pour caractériser les risques de pertes en mettant de côté la variabilité de la lame d'eau drainante d'une année à l'autre. Ce qui permet de qualifier la performance en nitrate (forte, moyenne, faible).

On choisit cette valeur en fonction du contexte du territoire notamment. Suivant que l'on cherche à lutter contre les algues vertes ou faire de l'eau potable, l'exigence en matière de qualité de l'eau est différente. De plus, l'importance de la surface agricole utile (SAU) dans le paysage est importante à prendre en compte : par exemple, pour produire de l'eau à 50 mg/l dans un captage, les résultats attendus pour ce qui concerne les champs agricoles seront plus ou moins « exigeants » si ceux-ci occupent 80% du territoire ou bien s'ils partagent l'aire d'alimentation pour moitié avec de la forêt.

Par défaut d'éléments précis sur le contexte territorial du diagnostic, on pourra utiliser les seuils standard définis ci-dessus, à savoir 5 et 10 kg N/ha pour 100 mm drainé.

Etape 2 : estimer les pertes

Le calcul des pertes est réalisé à partir d'observations et de mesures réalisées dans la situation étudiée, comme des informations sur les pratiques culturales, le sol et le climat. En effet, on peut calculer des pertes à partir de mesures d'azote minéral dans le sol, puis par simulation du lessivage avec des outils comme LIXIM ou le modèle de Burns. On peut également utiliser l'outil Syst'N[8], qui calculent les pertes à l'aide d'un modèle mécaniste.

Dans les faits, l'expérience prouve que la fiabilité des résultats obtenus par simulation repose beaucoup sur la qualité des données d'entrée fournies comme sur les calages réalisés à partir d'observations/mesures simples du champ cultivé. La valeur des pertes calculée est systématiquement entachée d'erreur, et il est important pour le diagnostic d'estimer cette incertitude.

Dans le cadre du projet Agro-éco-Syst'N dont ce document est issu, il a été choisi d'utiliser l'outil Syst'N pour la conduite du diagnostic dans son ensemble, et en particulier le calcul des pertes. Un bref descriptif de l'outil ainsi que les liens pour le télécharger sont présentés en ANNEXE.

[8] Il s'agit alors de de saisir les informations nécessaires à la simulation dans l'interface de l'outil, lancer la simulation puis d'extraire les données, soit à partir de l'interface de sortie de l'outil, soit à partir de la macro EXCEL (pour des résultats au pas de temps journalier). Ces différentes étapes sont décrites dans l'ANNEXE.

Etape 3 : étudier la dynamique temporelle des pertes

On étudie les pertes en kg N/ha/an puis en kg N/ha/100 mm de lame d'eau drainante, année après année au cours de la rotation, pour discuter de l'homogénéité suivant les années. Puis on calcule les pertes moyennes à l'échelle de la rotation

1. Perte annuelle par succession de deux cultures de la rotation[9], entre la récolte de la culture précédente et celle de la culture suivante
2. Pertes moyennes à la rotation[10] (et écart-type, si la rotation a tourné sur différentes années climatiques) : $\frac{Somme\ de\ N-NO3\ perdu}{Nombre\ d'années\ la\ rotation}$
   ⇨ *Cette valeur permet de situer globalement le niveau moyen des pertes annuelles ; elle prend notamment en compte d'éventuelles « compensations » entre des cultures / années très fortement émettrices et d'autres qui le sont moins.*

Etape 4 : comparer le niveau de pertes moyen à la rotation au résultat attendu

L'évaluation se fait d'abord sur la valeur des pertes moyenne à la rotation : en effet, on ne cherche pas la perfection chaque année et sur chaque culture.

1. Si cette valeur est inférieure au résultat attendu défini en étape 1, c'est réussi ! Bravo pour la grande performance. *On pourra ensuite décrire en quoi cette situation permet d'identifier une stratégie « gagnante », c'est-à-dire une combinaison de pratiques culturales pour une grande performance en nitrate dans ces conditions pédoclimatiques.*
2. Si non, passons à l'étape suivante.

Cette évaluation doit tenir compte de la valeur de l'incertitude estimée à l'étape 2 : si l'écart entre l'objectif et la valeur de perte obtenue est inférieure ou égale à l'incertitude, l'évaluation est trop incertaine pour être considérée comme fiable.

Etape 5 : identifier les « hotspots » d'émissions de nitrate parmi les années de la rotation

A partir des valeurs de pertes calculées à l'étape 3, il s'agit d'identifier **les épisodes de pertes pour lesquels les valeurs de nitrates perdues sont les plus élevées (dits « hotspots »)**, pour analyser en priorité durant quelles années climatiques et au niveau de quelles successions de 2 cultures de la rotation, les pertes dépassent ces valeurs. Si Syst'N est utilisé, on mobilise l'interface de sortie pour visualiser assez rapidement ces épisodes de pertes, par année de drainage, sur l'onglet « successions ».

[9] Si on utilise Syst'N, cet indicateur est calculable en utilisant les données de l'interface de sortie, dans l'onglet « Succession », ou bien plus aisément, en utilisant la macro EXCEL.
[10] Si on utilise Syst'N, cet indicateur disponible dans l'interface de sortie, dans l'onglet « bilan ».

Etape 6 : comprendre le ou les déterminants de chaque « hotspot »

Pour les pertes de nitrate en automne et en hiver, l'analyse des pertes pour une succession de 2 cultures, s'appuie sur les logigrammes des figure 12 et 13 (respectivement pour les cultures annuelles et les cultures bisannuelles et pérennes) :

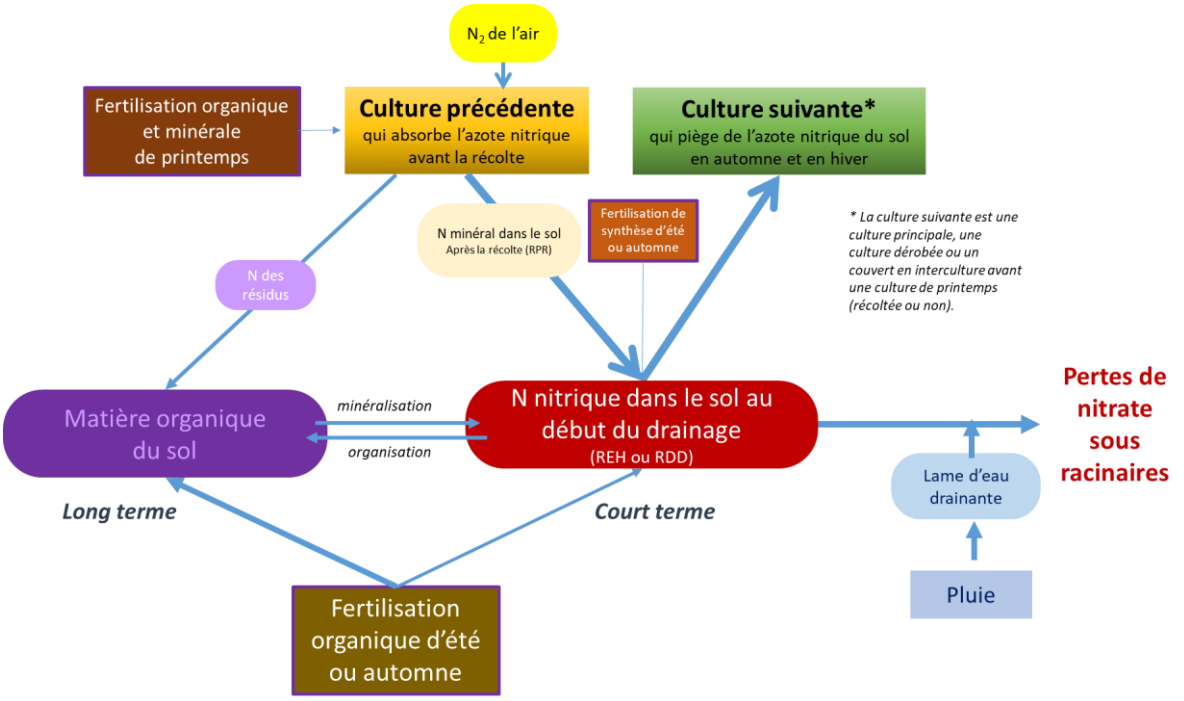

Figure 12 - Pratiques-clés et états-clés pour comprendre les pertes de nitrate en automne-hiver sous une culture annuelle

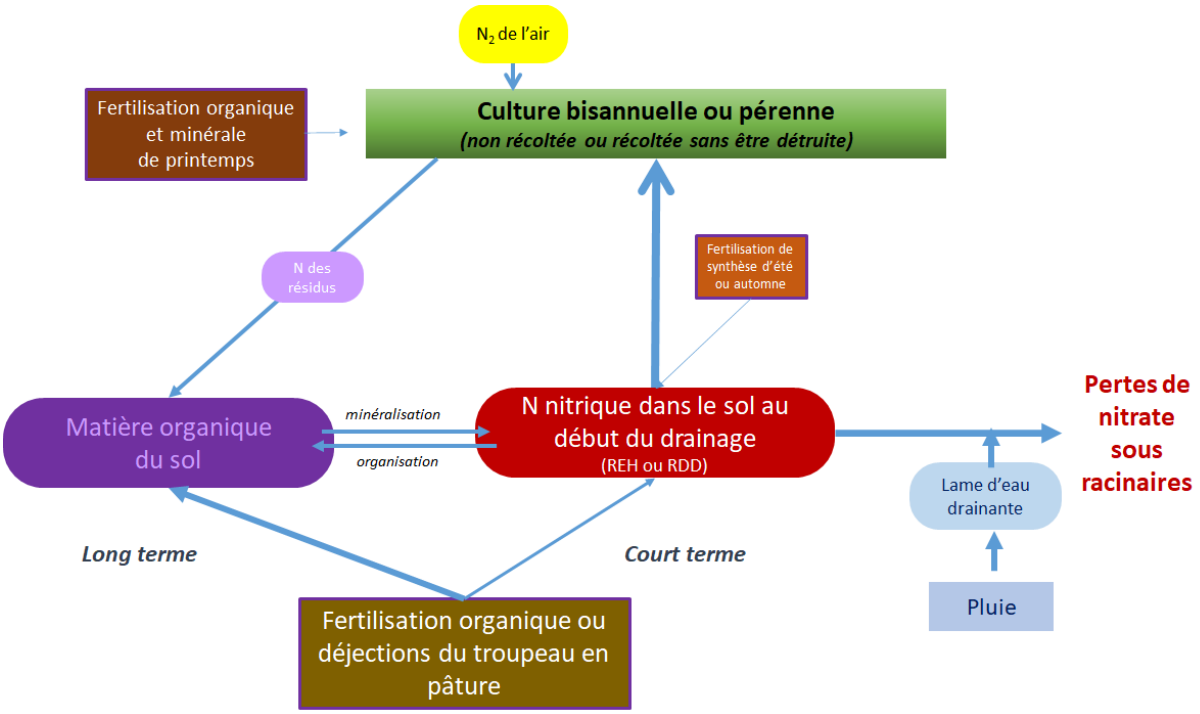

Figure 13 - Pratiques-clés et états-clés pour comprendre les pertes de nitrate en automne-hiver sous culture bisannuelle ou pérenne

Pour des drainages survenant majoritairement (voire exclusivement) en automne et hiver[11], voici une démarche d'analyse compréhensive de chaque année :

1. **Analyse de la période de drainage en automne et hiver :** dans un premier temps, on considère que les pertes de nitrate sont issues de la combinaison de deux états clés : une lame d'eau drainante[12] plus ou moins intense et une quantité d'azote minérale dans le sol au début du drainage. Ainsi à la limite, pour avoir de faibles pertes en automne et hiver il faut soit avoir une faible lame d'eau drainante, soit avoir peu d'azote minéral dans le sol à l'entrée de l'hiver. Aussi, on commence par analyser la lame d'eau drainante, et sa variabilité entre années.

2. **Analyse des pertes de nitrates :** les pertes de nitrates moyennes de la rotation sont évaluées face aux seuils de performance choisis (seuil de réussite, seuil acceptable). En cas d'échec, on analyse les pertes année par année, pour identifier les « hotspots » éventuels dans la rotation.

3. **Analyse du reliquat en entrée d'hiver** *(REH ou azote minéral dans le sol en entrée d'hiver)* : à défaut de pouvoir contrôler la lame d'eau drainante à cette période où il n'y a pas d'irrigation généralement, les pertes d'azote de cette période dépendent avant tout de la maitrise du REH. A cette étape, on analyse ici le niveau du REH chaque année de la rotation, et en particulier pour les années à forte pertes.

4. **Analyse du piégeage d'azote en automne** : un fort REH provient principalement d'une forte quantité d'azote minéral disponible en été et automne, et qui n'a pas été absorbé par la culture suivante (i.e les cultures intermédiaires, dérobées et cultures de rente). A cette étape, on analyse le piégeage de l'azote par la culture suivante (en l'absence de culture suivante, ce piégeage est égal à zéro). Si le piégeage est faible, on analyse pourquoi : pas de culture suivante, culture suivante à levée tardive ou à croissance lente, etc ou encore parce que le couvert est carencé en azote...

5. **Calcul et analyse de l'azote disponible en automne** *(somme de l'azote minéral du sol et de ce qu'a absorbé (piégé) la culture suivante à la date du REH)* **:**
   Pour chaque année, on additionne l'azote absorbé par les cultures en place au début de l'automne (le cas échéant) et le REH, on estime ainsi le niveau de « l'azote disponible » chaque année au cours de la rotation.

   Si l'azote disponible en été et automne est régulièrement élevé, il est probable que ce soit le signe d'une forte minéralisation et d'un sol riche en humus. Sinon, le phénomène est probablement plus dépendant de la culture précédente et de la fertilisation réalisée en été et automne.

   Si l'effet de la culture précédente est déterminant dans cette situation, on poursuit l'analyse pour comprendre cet effet: quand on a beaucoup d'azote disponible, s'agit-il d'une culture à fertilisation équilibrée (voire non fertilisée) mais qui laisse habituellement beaucoup d'azote dans le sol à la récolte ou par la suite du fait de la minéralisation de ses résidus (légumineuse), ou encore d'une culture à fertilisation déséquilibrée et qui, ponctuellement, a laissé beaucoup d'azote dans le sol à la récolte ? Pour comprendre le poids respectif de ces

[11] Pour les drainages survenant au printemps, la figure 6 est plus adaptée pour guider cette analyse compréhensive qui consiste à calculer et à étudier la quantité d'azote minéral présente dans le sol au début des périodes de drainage.

[12] On mesure la lame d'eau drainante sur la période de drainage ; l'entrée et la sortie de drainage variant selon les conditions pédoclimatiques.

différents déterminants, on pourra réaliser des tests avec des outils comme Syst'N. On peut aussi utiliser la méthode MERLIN[13] et/ou des mesures sur la parcelle.

L'interaction entre ces différents déterminants pour expliquer le risque de lixiviation en automne et hiver, est formalisé dans les figures 12 et 13. Chaque élément pourra être renseigné afin d'avoir une vue d'ensemble du fonctionnement du système. Enfin, pour analyser l'origine de l'azote disponible, on pourra s'appuyer sur le bilan de la figure 14.

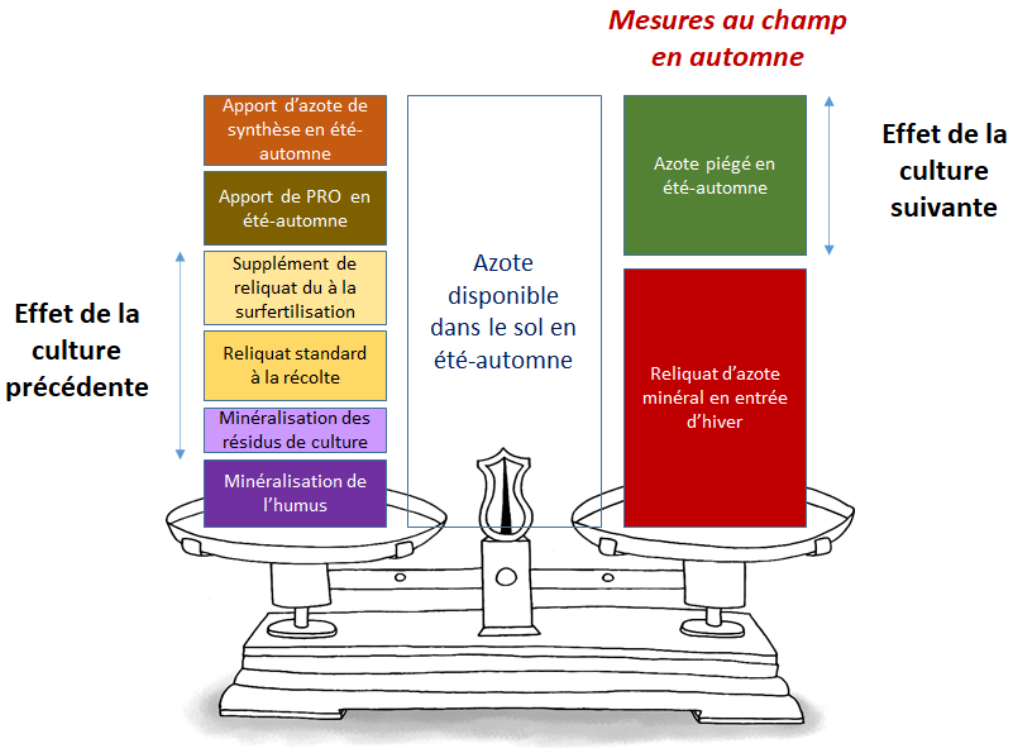

Figure 14 - Un bilan de l'azote minéral entre la récolte du précédent et l'entrée de l'hiver utile pour guider le diagnostic des pertes de nitrates en automne et hiver

Etape 7 : faire la synthèse à l'échelle pluriannuelle

Après l'analyse des hotspots (années) à problème, on réalise un bilan à l'échelle de l'ensemble de la rotation, en soulignant :

- la distribution des pertes entre années de la rotation, et en montrant en quoi les hautes performances de certaines années compensent ou pas les basses performances des autres *(exemple de très faibles pertes sous la succession orge-colza qui compense les fortes pertes de la succession colza-blé d'une rotation colza-blé-orge),*
- les explications des faibles performances azotées, en illustrant le manque d'adéquation des combinaisons des pratiques avec le contexte pédo-climatique (les combinaisons « perdantes »). Il s'agit ici de décrire le fonctionnement du champ cultivé auquel conduit cette combinaison.

Et on termine par un bilan, sur ce que nous apprennent ces analyses des pertes sur le fonctionnement de ce champ cultivé avec ce système de culture : les pertes globales sont-elles faibles, moyennes ou élevées ? Sont-elles assez régulières au cours de la rotation quel que soit le couple précédent-suivant

[13] Pour plus d'information : http://www.erytage.org/webplage/images/stories/pdf/fichemerlin.pdf

ou dans quelle mesure certaines « bonnes » années compensent les « mauvaises » ? Les nitrates lixiviés représentent-ils une grande ou une petite part de l'azote potentiellement lessivable, estimé par le REH ? Dans quelle mesure les REH élevés proviennent-ils d'un faible piégeage de nitrate ou/et d'une grande quantité d'azote minéral disponible en été et automne ? Comment expliquer un éventuel faible piégeage de nitrate ? Comment expliquer une quantité d'azote disponible élevée, selon les pratiques du système de culture de court, moyen et long terme ?

Exemple du bilan d'un diagnostic des pertes de nitrate

Pour illustrer cette synthèse, un exemple est développé ci-dessous, à partir du cas concret d'une situation réelle rencontrée chez un éleveur. Ses résultats sont basés sur le schéma résumant les valeurs prises par les états clés en entrée d'hiver chaque année au cours de la rotation. Pour aller plus loin, on peut le compléter par le renseignement des pratiques clés dans le schéma logique de la figure 12 pour la situation étudiée.

- *Période de drainage en automne et hiver*

Pour le diagnostic de cette situation, c'est une année climatique standard et constante au cours de la rotation de 5 ans qui a été considérée ici. Dans ces sols assez profonds de l'Yonne, cela conduit à une lame d'eau drainante de 250 mm environ pour une période de drainage étalée de novembre à février.

- *Reliquat en entrée d'hiver*

Les reliquats en entrée d'hiver ont été mesurés sur 90 cm dans les parcelles concernées par ce même système de culture de 2013 à 2019. Ils aboutissent aux reliquats moyens (en brun) de la figure 16 : 90 unités en moyenne de la rotation Colza-Blé-Pois-Blé-Orge ; ils sont en fait très variables d'une année à l'autre suivant le moment de la rotation.

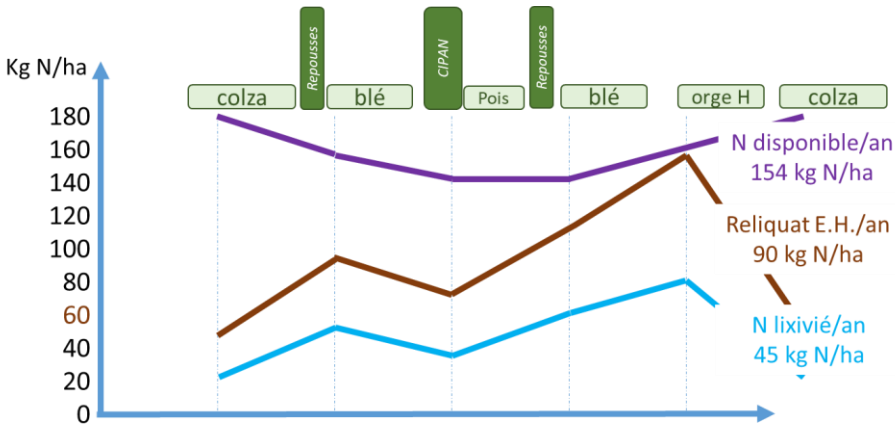

Figure 15 – Exemple de synthèse pluriannuelle du diagnostic des pertes de nitrate pour un système de culture d'un éleveur de l'Yonne.

- *Pertes de nitrates*

Avec l'année standard sélectionnée pour ce diagnostic, les pertes moyennes à la rotation sont de 45 kg/ha/an, soit la moitié du reliquat en entrée d'hiver ; mais elles s'étalent de 20 à plus de 60 unités selon l'année de la rotation. Compte tenu de la lame d'eau, cette situation n'est pas performante pour le nitrate, en effet avec une valeur de 18 kg N/100 mm, les pertes dépassent largement le seuil de 10 kg N/100 mm.

- *Piégeage d'azote en automne*

Cet éleveur a des sols couverts en été 4 années sur 5 : par le colza de production, et par 3 cultures intermédiaires, des repousses de pois et des repousses de colza avant les blés, et un mélange semé

entre le premier blé et le pois de printemps. Le sol reste nu entre le second blé et l'orge d'hiver. Le piégeage est de plusieurs d'unité à chaque fois, le record étant celui du colza qui a déjà absorbé plus 120 unités d'azote début novembre. En moyenne, le piégeage de la rotation est ainsi de 64 unités.

- *Calcul et analyse de l'azote disponible en automne*

L'addition du piégeage d'azote et reliquat d'entrée d'hiver, a permis d'estimer l'azote disponible en été et automne. En moyenne, il s'élève à 154 unités ; d'année en année, il se situe entre 140 et 180 unités.

Cette importante et régulière quantité d'azote disponible s'explique 3 phénomènes :

- Des apports organiques réguliers d'effluents organiques depuis des décennies dans cette exploitation qui a conduit à des sols qui sont aujourd'hui très riches en matière organique qui minéralisent beaucoup,
- Des cultures précédentes connues pour « laisser » de l'azote : colza et pois, blés fertilisés généreusement,
- Un apport d'engrais de ferme systématique juste avant la culture de colza.

- *Synthèse pluriannuelle*

Malgré l'usage presque systématique de couverts d'été, le piégeage de nitrate reste insuffisant pour pallier à cet azote disponible très élevé. Par conséquent, le reliquat en entrée d'hiver est trop élevé pour les 4 années de la rotation sur 5. Tout se passe comme si, en dehors du colza, les pièges à nitrate étaient « débordés ».

Dans cette exploitation d'élevage en excédent structurel, l'effort déjà réalisé sur le piégeage de nitrate n'a pas été en mesure de conduire à de faibles pertes. A court terme, cet éleveur peut-il aller encore plus loin dans le piégeage en automne ? Comment arriver à réduire l'azote disponible en été et en automne dans cette situation ? Pour réussir, à court terme, ne doit-il pas revoir sa stratégie de fertilisations au printemps comme en automne ? Comment pourrait-il parvenir à réduire la minéralisation de l'azote dans ces sols, à moyen et à long terme ?

Etape 8 : identifier des pistes pour réussir à avoir de faibles pertes

Que changer pour faire disparaître les goulots d'étranglement pénalisant la performance azotée, qui ont été identifiés ci-dessus ?

Il s'agit de construire de nouveaux systèmes de culture en changeant plus ou moins profondément la façon de cultiver ce champ. On commence par imaginer comment débloquer chaque goulot d'étranglement identifié ci-dessus sur la base du fonctionnement du champ cultivé, en proposant une combinaison de pratiques cohérente. Dans un deuxième temps, on utilise les simulations pour vérifier que le système de culture proposé permet de conduire à une situation qui a une haute performance azotée. Si non, on reprend l'activité de construction pour proposer une nouvelle façon de cultiver.

Pour aller plus loin, on peut faire le choix de (re)concevoir un système dans l'objectif d'avoir de faibles pertes, dans le cadre d'une approche globale des pratiques intégrant le temps court et le temps long.

DIAGNOSTIC DES PERTES D'AMMONIAC

Etape 1 : établir le résultat de pertes attendu en ammoniac pour sa situation

Ce résultat attendu **fait ici référence au résultat que l'on souhaite obtenir demain** sans faire référence aux résultats qui étaient obtenus hier. Ce résultat est **chiffré** (seuil de réussite). Il peut être exprimé en valeur absolue (à l'hectare et à l'année) ou en valeur relative à la quantité d'azote totale apportée.

On choisit cette valeur en fonction du contexte du territoire notamment. Par défaut d'éléments précis sur le contexte territorial du diagnostic, on pourra utiliser les seuils standard définis dans la partie « Préliminaires », à savoir 5 et 10 kg N/ha pour 100 kg de N apporté. Pour les situations où aucun apport d'azote n'est réalisé, il est proposé de retenir le seuil de 1 kg de N-NH_3 perdu/ha/an.

Etape 2 : estimer les pertes

Dans le cadre du projet Agro-éco-Syst'N dont ce document est issu, il a été choisi d'utiliser l'outil Syst'N pour la conduite du diagnostic dans son ensemble, et en particulier le calcul des pertes. Un bref descriptif de l'outil ainsi que les liens pour le télécharger sont présentés en ANNEXE.

D'autres outils sont disponibles pour estimer les pertes d'ammoniac :

- Des équations « simples » issues du guide EMEP (version 2019) – le guide est téléchargeable à l'adresse suivante : https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019; leur gros avantage est la simplicité de mise en œuvre (peu de données d'entrée et facilement accessible) ; leur gros inconvénient est qu'elles ne retranscrivent que de manière imprécise l'effet du climat et du sol, qui sont dans les faits déterminants
- Des modèles mécanistes comme CERES-EGC, STICS ou Volt'Air ; attention à bien choisir un modèle qui a été validé dans les conditions françaises ; Syst'N intègre lui aussi un modèle mécaniste mais avec une ergonomie et une interface dédiée pour l'interprétation des résultats, qui le rend plus facile d'utilisation.

Par ailleurs, l'expérience prouve que la fiabilité des résultats obtenus par simulation repose beaucoup sur la qualité des données d'entrée fournies comme sur les calages réalisés à partir d'observations/mesures simples du champ cultivé. La valeur des pertes calculée est systématiquement entachée d'erreur, et il est important pour le diagnostic d'estimer cette incertitude.

Etape 3 : étudier la variabilité des pertes suivant les apports au sein de la rotation

Il s'agit d'exprimer les pertes en valeur absolue ou en valeur relative à la dose d'azote totale apportée, en fonction de l'unité choisie :

1. Pour une culture conduite une année donnée[14], perte cumulée obtenue que les 21 jours suivant chaque apport (en kg de N-NH_3/ha) ; cependant, si l'écart entre deux

[14] Si on utilise Syst'N, cet indicateur est calculable en utilisant les données de l'interface de sortie, dans l'onglet « Succession », ou bien plus aisément, en utilisant la macro EXCEL.

apports est inférieur à 21 jours, faire un calcul unique englobant les différents apports (début = date du 1er apport / fin = date du dernier apport + 21 jours)

⇨ *Cette valeur permet une analyse fine des variations de pertes ; elle sera réutilisée ultérieurement dans le diagnostic*

2. Pertes moyennes à la rotation[15] en kg de N-NH3/ha/an (+/- écart type si la rotation a tourné sur différentes années climatiques) : $\frac{Somme\ de\ N-NH3\ perdu\ (Kg/ha)}{Nombre\ d'années}$

⇨ *Cette valeur permet de situer globalement le niveau de pertes moyen à l'échelle de la rotation ; elle prend notamment en compte d'éventuelles « compensations » entre des cultures / années très fortement émettrices et d'autres qui le seraient moins*

Etape 4 : comparer le niveau de pertes moyen à la rotation au résultat attendu

L'évaluation se fait sur la valeur des pertes moyennes à la rotation, car on ne cherche pas la perfection chaque année et sur chaque culture.

1. Si cette valeur est inférieure au résultat attendu défini en étape 1, c'est réussi ! Bravo pour la grande performance.
2. Si non, passer à l'étape suivante.

Cette évaluation doit tenir compte de la valeur de l'incertitude estimée à l'étape 2 : si l'écart entre l'objectif et la valeur de perte obtenue est inférieure ou égale à l'incertitude, l'évaluation est trop incertaine pour être considérée comme fiable.

Etape 5 : identifier les « hostpots » d'émissions d'ammoniac parmi les apports d'azote

A partir des valeurs de pertes/apport calculées à l'étape 3, il s'agit d'identifier **les épisodes de pertes pour lesquels les valeurs d'ammoniac perdues sont les plus élevées.** Si Syst'N est utilisé, il est conseillé d'utiliser l'interface de sortie pour visualiser assez rapidement sur l'onglet « successions **»** ces épisodes de pertes. L'analyse à l'échelle de la rotation est intéressante pour étudier dans quelle mesure les fortes pertes après certains apports sont compensées ou pas par les apports avec faible pertes.

Etape 6 : comprendre le ou les déterminants de chaque « hotspot »

Pour une analyse plus fine des déterminants, il est nécessaire de revenir à la volatilisation associée à chaque apport (ou chaque « groupe » d'apport – cf étape 3) afin d'en analyser l'efficience. Cette échelle est la plus pertinente, sachant d'une part le lien étroit entre apport d'engrais azoté (organique et/ou minéral) et émissions, et d'autre part le délai très court entre le moment de l'apport et le début des émissions.

[15] Si on utilise Syst'N, cet indicateur disponible dans l'interface de sortie, dans l'onglet « bilan ».

Pour comprendre les déterminants qui expliquent le niveau élevé de pertes, l'analyse est découpée en 4 sous-étapes et s'appuie sur le logigramme de la figure 16. ATTENTION : cette analyse est à mener sur chaque « hotspot » individuellement car les déterminants en cause ne sont pas forcément les mêmes.

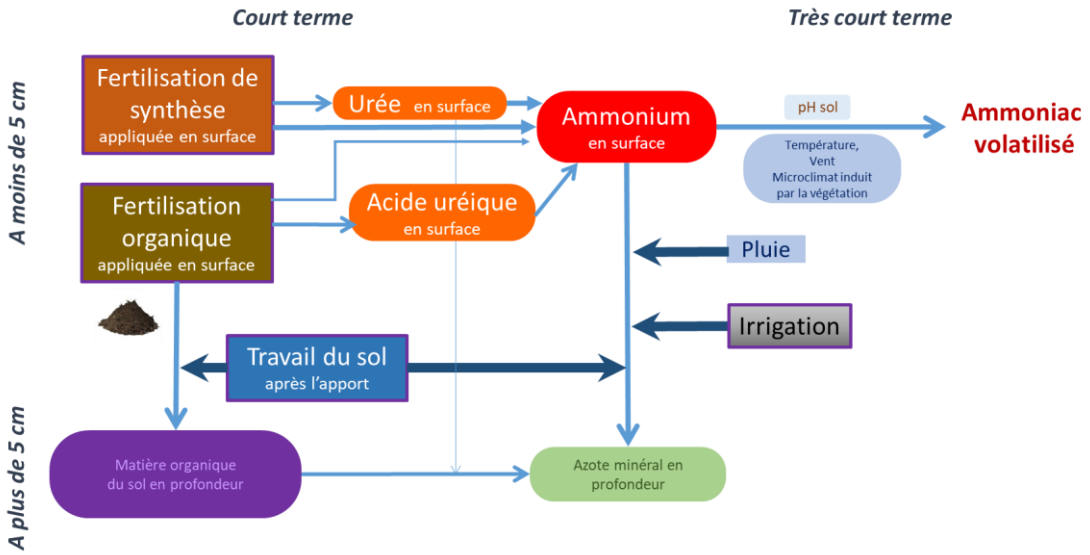

Figure 16 - Pratiques-clés et états-clés pour comprendre la volatilisation de l'ammoniac

1. Quel est la quantité « d'azote potentiellement volatilisable » ?

Il s'agit tout d'abord de faire le bilan des quantités d'azote apportées sous forme ammonium (NH4+) et urée (ou acide uréique pour les produits organiques), qui constituent le pool d'azote volatilisable. Il est intéressant de l'exprimer au regard de la dose d'azote totale apportée :

$$\frac{\text{NNH4 + et Nurée}}{\text{N total apporté}}$$

Cela permet d'apprécier le « potentiel » de volatilisation au regard de la forme d'azote choisie : plus ce rapport est élevé, plus le risque de pertes est important. Pour la suite du diagnostic, cela permet de mettre en perspective l'impact potentiel d'un changement de forme sur le risque de volatilisation.

2. Ce potentiel de volatilisation s'est-il exprimé ?

Ensuite, il s'agit de mettre en lien cette valeur de l'APV avec les pertes d'ammoniac réellement obtenues (cumulées sur 21 jours après chaque apport), comme proposé dans le graphique ci-après.

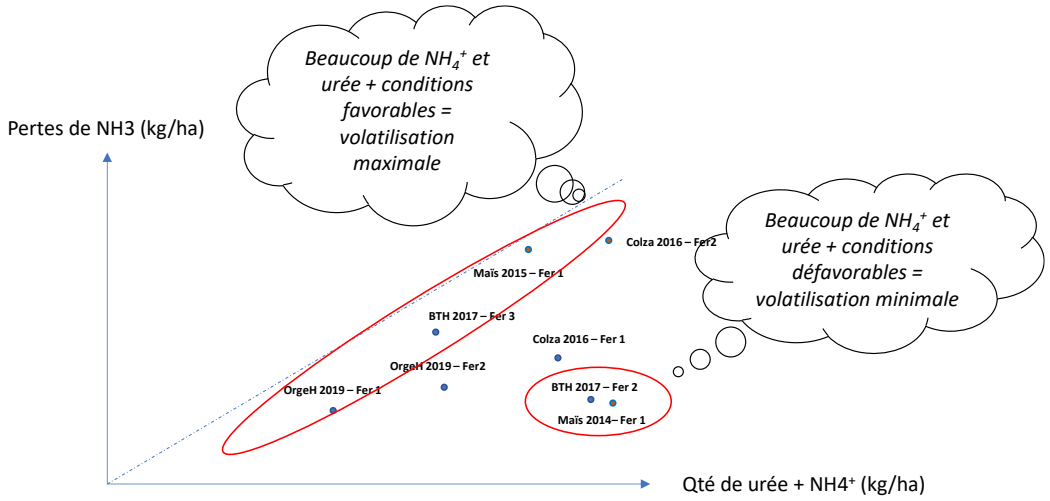

Figure 17 - Graphique permettant de mettre en relation l'APV et les quantités réellement volatilisées

Les points proches de la bissectrice sont ceux pour lesquels le potentiel de volatilisation a été pleinement exprimé ; au contraire, ceux proche de l'abscisse, sont ceux pour lesquels le potentiel de volatilisation s'est peu exprimé. De manière générale, ce graphique permet de mettre en évidence que, pour une quantité d'ammonium + urée apportée, la quantité d'ammoniac émise peut être très différente ! Il permet ainsi d'apprécier la variabilité des pertes en fonction des conditions d'émissions.

3. Combien de temps l'azote potentiellement volatilisable est-il resté en surface ?

Sachant que dès que l'ammonium (et ses précurseurs) se retrouve à plus de 5 cm de profondeur, le risque de volatilisation devient nul, la 3ème étape consiste donc à étudier si l'engrais azoté a été enfoui, si oui, au bout de combien de temps après l'apport. Rappelons que plus l'APV sera resté longtemps en surface, plus le risque de volatilisation est grand.

Cet « enfouissement » peut se faire via différents phénomènes :

- Enfouissement de l'engrais via le matériel d'épandage ou un travail du sol, sur une profondeur supérieure à 5 cm ; l'efficacité de ce facteur dépend du délai de sa mise en œuvre :
  - Enfouissement immédiat : risque nul de volatilisation
  - Enfouissement avant 24h : risque moyen
  - Enfouissement après 24h : risque élevé
- Réalisation d'une irrigation après l'apport : de la même manière que la pluie, l'eau d'irrigation fait percoler l'azote en dessous de 5 cm de profondeur ; les mêmes paramètres sont à regarder :
  - La date de la première irrigation
  - La quantité d'eau apportée
- Survenue d'une pluie après l'apport : on considère qu'il faut une quantité minimale de 10 mm pour faire percoler la totalité de l'engrais à une profondeur supérieure à 5 cm ; néanmoins, cette valeur est très variable en fonction de la texture et de l'état de structure de l'horizon de surface ! Deux paramètres sont à regarder :
  - La date de survenue de la première pluie
  - La quantité d'eau qui est tombée

4. **Pendant la période où l'ammonium est resté en surface, les conditions étaient-elles favorables à l'expression du potentiel de volatilisation[16] ?**

De manière logique, plus l'APV sera resté longtemps en surface, plus la quantité d'ammoniac émise sera importante. Mais cette hypothèse peut être remise en cause en fonction des conditions de sol et de climat qui se sont exprimées sur cette période :

- Si ces conditions sont favorables, alors oui l'azote volatilisé sera proche de l'APV
- Si ces conditions sont défavorables, alors l'azote volatilisé peut-être largement inférieur à l'APV

Les 3 variables d'états clés à étudier pour déterminer si les conditions étaient favorables ou non sont : le Ph, la température et le vent. *Sachant que, comme présenté dans la partie Préambule, ces paramètres agissent de manières synergique et non pas indépendante les uns des autres.*

a. Le pH du sol

Il conditionne le potentiel de volatilisation « de base » et notamment l'effet de la température. Pour des pH de plus de 7.5, il faut s'attendre à des niveaux de pertes potentiellement élevés (au moins 30 % de l'azote apporté), surtout si on apporte des formes d'azote qui volatilisent facilement comme l'urée (hors urée avec inhibiteur d'uréase) ou la solution azotée.

b. La température

On peut considérer qu'en dessous d'une température journalière moyenne de 6°C, le risque de volatilisation est faible ; entre 6 et 13°C, ce risque est moyen et il devient élevé pour une température moyenne supérieure à 13°C. Sur cette base, on peut établir 3 niveaux de risque sur les 3 périodes de temps considérées :

Tableau 4 -

Période considérée	Risque faible	Risque moyen	Risque fort
Jour de l'apport (J)	T°C < 6°C	T°C entre 6 et 13 °C	T°C > 13°C
J+6 jours	Somme de T°C<36°C	Somme de T°C entre 36 et 78 °C	Somme de T°C>78°C
J+21 jours	Somme de T°C <126 °C	Somme de T°C entre 126 et 273°C	Somme de T°C>273°C

c. Le vent[17]

On peut considérer qu'en dessous d'une vitesse de 19 km/h, le risque de volatilisation est faible à moyen. Au-dessus, le risque peut être considéré comme élevé.

L'interaction entre ces différents déterminants, et leur poids pour expliquer le risque de volatilisation est formalisé dans la figure 18. Chaque élément du bilan pourra être renseigné afin d'avoir une représentation synthétique des différents états clés.

[16] Les seuils proposés pour le pH, la température et le vent se basent sur ceux établis par la grille de risque COMIFER (« Prise en compte de la volatilisation des engrais minéraux », 2013)

[17] Le vent n'est pas pris en compte par Syst'N pour le calcul des pertes d'ammoniac. Donc si Syst'N est l'outil utilisé pour réaliser le diagnostic, il n'est pas utile de regarder cet indicateur.

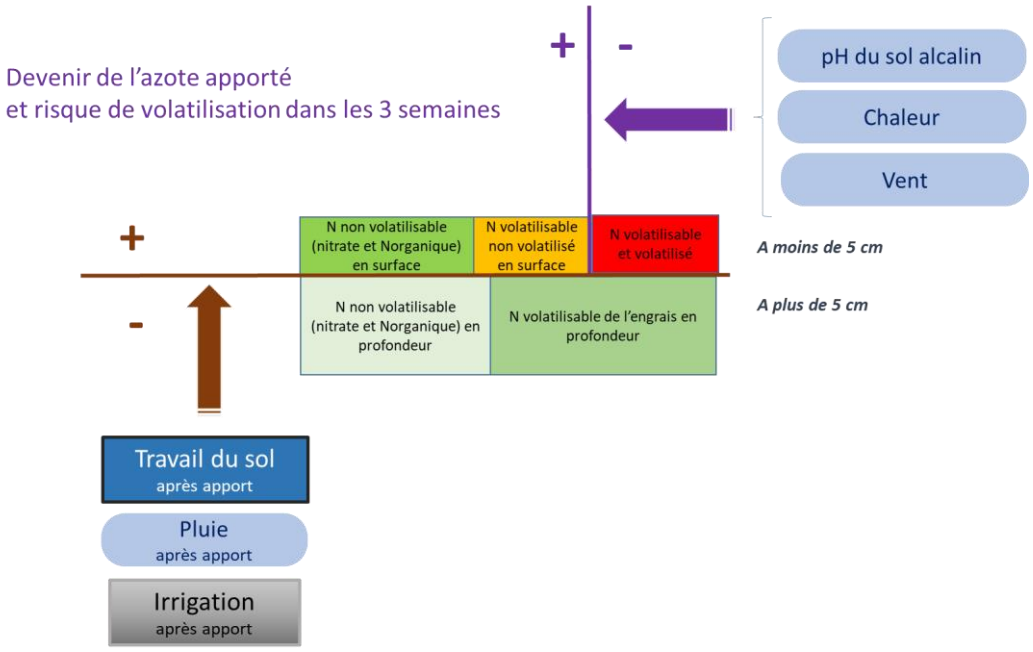

Figure 18 – Synthèse du diagnostic sur la période de 21 jours après chaque apport

Etape 7 : faire la synthèse à l'échelle pluriannuelle

Après l'analyse des apports à problème, on réalise un bilan à l'échelle de l'ensemble de la rotation, en soulignant :

- La distribution des pertes entre apports, et en montrant en quoi les hautes performances de certains apports ne compensent pas les basses performances des autres,
- Les explications des basses performances azotées, en illustrant le manque de complémentarité des combinaisons des pratiques avec le contexte pédo-climatique (les combinaisons « perdantes »).

Puis on termine par un bilan, sur ce que nous apprennent ces analyses des pertes sur le fonctionnement du champ cultivé avec ce système de culture : les pertes moyennes sont-elles élevées ? Ont-elles une valeur stable selon les cultures ou bien certaines « bonnes » situations compensent les « mauvaises » ? Est-ce que les quantités « d'azote potentiellement volatilisable » sont élevées ? Est-ce que les pertes d'ammoniac sont dues principalement à un APV élevé ou bien au contraire un APV faible mais des conditions après l'apport qui sont favorables à la volatilisation (pH, température, absence d'infiltration de l'ammonium) ? Ou bien malgré un APV élevé, les conditions après apport ont-elles été peu favorables ?

Etape 8 : identifier les pistes pour avoir de faibles pertes?

Cette synthèse a hiérarchisé les déterminants principaux à l'origine des pertes et identifié les goulots d'étranglements dans cette situation. Il y a-t-il moyen d'agir dessus ? Comment débloquer les goulots d'étranglement repérés ci-dessus, en changeant les pratiques pour une nouvelle combinaison ?

- Piloter les dates d'apport en fonction des prévisions météorologiques ?
- Changer la forme de l'engrais azoté, l'enfouir ou irriguer après certains apports ?
- Changer des cultures, pour être plus autonome vis-à-vis des engrais azotés ?

Il s'agit de construire ici d'imaginer de nouveaux systèmes de culture en modifiant à la marge certaines pratiques culturales ou en changeant plus profondément la façon de cultiver ce champ.
Dans un deuxième temps, on utilise les simulations pour vérifier que le nouveau système de culture permet de conduire à une situation à haute performance azotée. Si non, on reprend l'activité de construction pour proposer une nouvelle façon de cultiver.

Pour aller plus loin, on peut également repartir d'une feuille blanche (ou presque) et de (re)concevoir un système dans l'objectif d'avoir de faibles pertes. Il s'agira alors de combiner un ensemble de leviers complémentaires pour parvenir à cet objectif.

ANNEXE

Comment calculer les pertes avec l'outil Syst'N ?

La mise en œuvre de la méthode de diagnostic décrites est illustrée ici avec l'utilisation de l'outil Syst'N. Cet outil fonctionne à l'échelle temporelle de la rotation culturale et à l'échelle spatiale de la parcelle. Il est utilisable dans les principaux systèmes de culture en France, et permet d'estimer les pertes d'azote d'une parcelle, de comparer plusieurs parcelles ou plusieurs scénarios climatiques entre eux, ou bien plusieurs modes de conduite (système de culture).

L'outil est constitué de 2 entités :
- un modèle biotechnique de simulation des flux d'azote dans les systèmes de culture
- une base de consultation « PERTAZOTE » regroupant les simulations déjà réalisées et les mesures disponibles, qui peut être interrogée par l'utilisateur par simple requête.

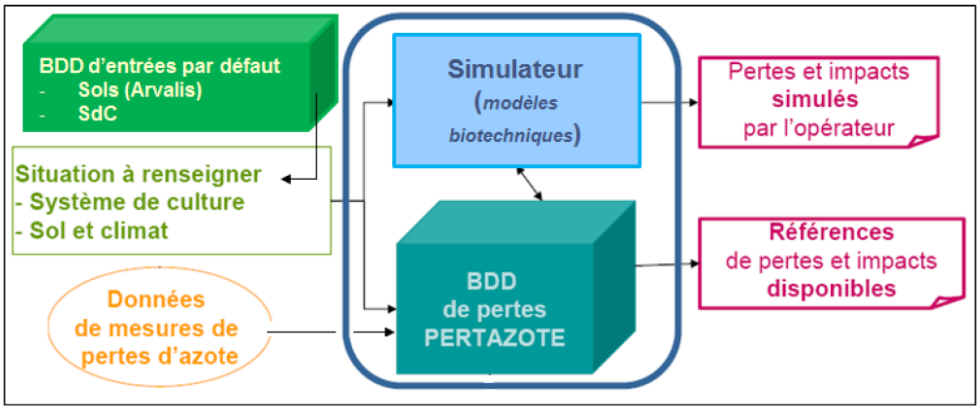

Figure 19 - Schéma conceptuel de l'outil Syst'N

Celui-ci se compose d'un modèle qui simule le fonctionnement de l'agrosystème à l'échelle spatiale d'une parcelle homogène : il est cependant possible de décrire plusieurs parcelles, afin de représenter, tout ou partie d'une exploitation, tout ou partie d'un territoire agricole. Il calcule les pertes sous 3 formes : lixiviation et ruissellement des nitrates, volatilisation de l'ammoniac et émissions de N_2O par dénitrification.

La simulation se fait à partir de données saisies par l'utilisateur qui décrivent les pratiques culturales (succession des cultures, interventions culturales) ainsi que le contexte pédoclimatique. Ces différents paramètres permettent de définir une « situation ». L'échelle temporelle de l'outil est pluriannuelle (nombre d'années de simulation au choix de l'utilisateur), afin d'intégrer les effets « précédents » des cultures et de leur conduite sur l'état de la parcelle pour la culture suivante, leurs effets « suivants », et pour rendre compte de la dynamique des pertes au cours de la succession des cultures. Le simulateur estime les pertes jour après jour, mais on les visualise à un pas de temps plus long pour en faciliter la lecture (trimestre, année, rotation).

Afin de pouvoir faire tourner le simulateur, il est nécessaire de recueillir, pour chaque système étudié les informations suivantes :

Tableau 5 - Données nécessaires pour faire tourner le simulateur de Syst'N

Rotation	Enchainement des espèces et de leurs rendements
Itinéraire technique	Dates de semis et destruction des cultures intermédiaires, dates de semis et dates de récolte des cultures de production, travaux du sol, doses et formes d'engrais et matériels d'épandage
Sol	Type de sol. Teneur en cailloux et granulométrie de chaque horizon. Teneur en matière organique, teneur en carbone, CEC et pH de l'horizon de surface
Climat	ETP, pluviométrie, rayonnement global, et températures min, max & moyenne

L'outil et le manuel d'utilisation sont téléchargeables après avoir fait une demande préalable auprès des porteurs de l'outil via une demande d'accès au site du RMT BOUCLAGE sur lesquels ils sont hébergés.

Pour télécharger Syst'N dans sa dernière version : http://www.rmt-fertilisationetenvironnement.org/moodle/course/view.php?id=8 .

Pour en apprendre plus sur l'outil et son utilisation, le guide d'utilisation est téléchargeable à l'adresse suivante (MAJ 2015) : www.rmt-fertilisationetenvironnement.org/moodle/pluginfile.php/2270/mod_resource/content/3/Manuel utilisation Syst'Nv1.3_Dec2015.pdf

Comment extraire les données de pertes (et autres données d'intérêt) de l'outil Syst'N ?

L'outil Syst'N est doté d'une interface de saisie des données ainsi que d'une interface de sortie, qui permet de visualiser les données de pertes à l'échelle du trimestre, ainsi que d'autres variables d'intérêt. Un 1er écran permet de visualiser des données moyennées à l'échelle de la succession simulée :

Rotation	Rendement	Ferti. Min. (kg N/ha)	Ferti. Orga. (kg N/ha)	CIPAN (précède la culture)
Colza d'hiver(COLH)	36.0 q/ha	165	0	
Blé tendre d'hiver(BTH)	75.0 q/ha	160	0	
Pois protéagineux d'hiver(POIH)	0.0 q/ha	0	0	
Tournesol(TOU)	30.0 q/ha	50	0	
Blé tendre d'hiver(BTH)	75.0 q/ha	160	0	
Pois protéagineux d'hiver(POIH)	0.0 q/ha	0	0	
Pois protéagineux de printemps(POIP)	40.0 q/ha	0	0	
Blé tendre d'hiver(BTH)	75.0 q/ha	160	0	

ENTREES N (kg N/ha/an)	
Fertilisation minérale *	116
Fertilisation organique *	0
Fixation d'azote	19

Solde Azote Apport-Export* (kg N/ha/an) : -72

Variation du stock d'azote total dans le sol* (kg N/ha/an) : -66

Minéralisation de l'azote du sol et des résidus de culture (kg N/ha/an) : 79

Concentration moyenne en NO3 sous le profil (mgNO3/L) : 25

SORTIES N (kg N/ha/an)	
126	Exportation par les récoltes *
61	Résidus de R., pailles exportées *
188	Absorption par les cultures principales
0	Absorption par les cultures intermédiaires

* Ces valeurs sont directement calculées à partir des informations entrées par l'utilisateur et des coefficients du CORPEN.

Pertes d'azote moyennes annuelles (kg N/ha/an)

Calculé	
Protoxyde d'azote (N2O)	0.2
soit 58.3 kg éq. CO2 *	
Ammoniac (NH3)	5
Nitrate (NO3) lessivé	8
Nitrate (NO3) ruisselé	0

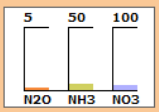

Figure 20 – Premier écran de l'interface de sortie de Syst'N présentant les résultats globaux à l'échelle de la rotation

Et un second détaille les résultats de pertes (et d'autres variables) obtenues à l'échelle du trimestre pour chaque maillon de la succession simulée :

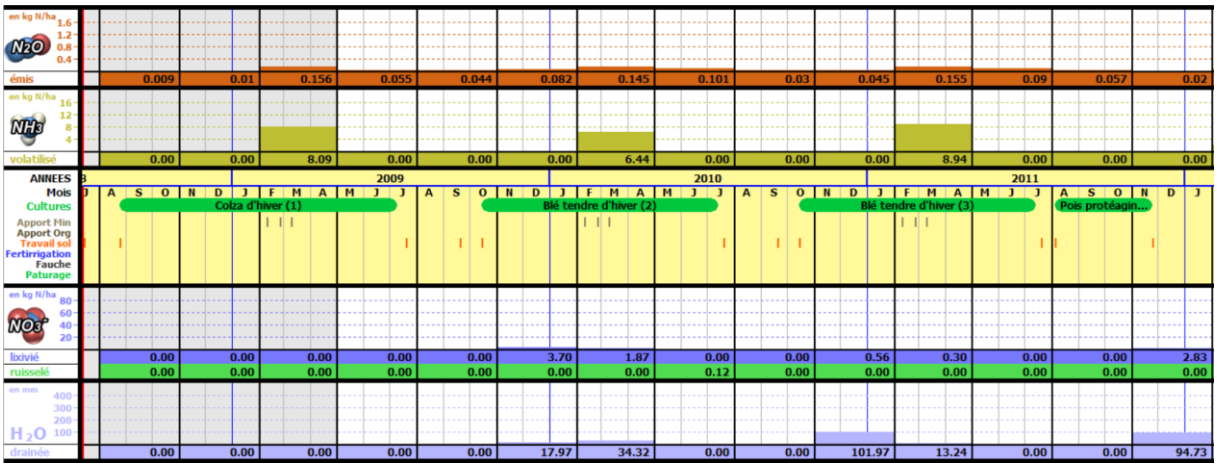

Figure 21 - Ecran de l'interface de sortie de Syst'N présentant les résultats au pas de temps du trimestre tout au long de la rotation

Ces mêmes données peuvent être extraites, au pas de temps journalier, comme aux pas de temps trimestriel et de la rotation dans sa globalité, à l'aide d'une macro développée sur EXCEL et disponible en téléchargement à l'adresse suivante :
http://www.rmt-fertilisationetenvironnement.org/moodle/course/view.php?id=61

Disponibles au sein d'un fichier EXCEL, ces résultats deviennent ainsi plus faciles à travailler et à analyser dans le détail.