

Ce document provient de l'Agrithèque. Toute reproduction sous quelque forme que ce soit, n'est autorisée que dans le cadre de l'usage privé du copiste ou après autorisation obtenue auprès des Chambres d'Agriculture de Bretagne.




Azote

30 ans de références

30 ans d'actions et de mobilisation des agriculteurs, techniciens et chercheurs bretons... pourtant, le sujet nitrate reste sous le feu des projecteurs !

Est-ce à dire que rien n'a été fait ? Qu'aucun résultat n'a été obtenu ? Certes non, ces 30 ans de références sont aussi 30 ans d'efforts, de modifications de pratiques et de systèmes, d'investissements lourds pour l'agriculture bretonne (bâtiments, matériels, traitements des déjections...) avec des résultats notables sur la teneur en nitrate des eaux de surfaces.

Cependant, la problématique azote évolue avec une notion de flux d'azote qui s'ajoute à celle des teneurs en nitrate.

Ce dossier reprend des éléments diffusés lors d'une journée de synthèse scientifique organisée conjointement par les chambres d'agriculture de Bretagne, Arvalis Institut du Végétal et l'Inra Agrocampus Ouest, qui a réuni près de 300 participants, agriculteurs, techniciens et chercheurs impliqués sur la problématique azote et qualité de l'eau en Bretagne.

Coordination du dossier
Paul Jegat (Terra) avec Bertrand Decoopman (chambres d'agriculture de Bretagne).

Rédaction

- Pour les chambres d'agriculture de Bretagne : Bertrand Decoopman, Daniel Hanocq, Jean Grall, Yvon Lambert, Olivier Manceau.
- Pour l'Inra Agrocampus : Thierry Morvan, Françoise Vertès.
- Pour Arvalis Institut du Végétal : Jean Pierre Cohan.

Composition : Jeanine Deshoux.



30 ans de références pour comprendre et limiter les fuites d'azote à la parcelle...

Les références acquises en Bretagne sur le sujet de l'azote sont certainement les plus riches en France. Le premier enseignement que l'on peut en tirer est qu'il faut être particulièrement humble vis-à-vis de l'agronomie et de la dynamique de l'azote dans les sols du fait du grand nombre de facteurs qui entrent en jeu mais aussi du niveau de précision nécessaire. Comme le rappelle Philippe Leterme (Inra Agrocampus Ouest), une lixiviation de 45 kg N/ha suffit pour atteindre souvent les 50 mg/l alors que, dans un sol avec 3 % de matière organique (MO), ce sont 4 500 kg N/ha qui sont susceptibles d'interagir, soit un niveau de précision nécessaire de l'ordre de 1 % dans un milieu sous la dépendance de processus biologiques non contrôlés !

Joseph Ménard (chambres d'agriculture de Bretagne) a souligné quelques points forts ressortant des références présentées :

- 1) **La matière organique** : quelle que soit sa forme, c'est une richesse pour la Bretagne mais aussi un facteur de risque difficile à contrôler. Pour les déjections, les travaux menés nous montrent qu'il n'y en a pas de bonnes ou de mauvaises dès lors qu'elles sont bien utilisées et gérées dans la durée.
- 2) **Les prairies** : comme les autres cultures, une bonne gestion est nécessaire afin d'en limiter les fuites, même si c'est moins l'effet de la dose apportée qui joue que le chargement ou la date d'apport.
- 3) **Les légumineuses** : elles permettent d'introduire de l'azote dans le système et d'améliorer l'autonomie des exploitations notamment en réduisant les quantités d'engrais utilisées. Mais là encore, les conséquences sur l'environnement ne sont pas systématiquement optimales et les légumineuses nécessitent également une bonne maîtrise technique et une

réflexion pour les adapter à chaque système.

Au-delà de cette complexité, tous les travaux s'accordent à montrer que l'équilibre de la fertilisation et l'implantation de couverts végétaux efficaces constituent le socle de base pour limiter les fuites d'azote à la parcelle.

Georges Galardon (Arvalis Institut du Végétal) a souligné que ces références ne sont qu'une petite partie des éléments que chaque agriculteur doit intégrer au jour le jour dans ses choix. Il n'y a plus de système d'exploitation ou de modèle agricole unique, ce qui signifie également qu'il n'y aura pas de modèle environnemental unique et que chaque agriculteur devra intégrer les problématiques économiques et environnementales dans son système d'exploitation. Pour cela, toutes les structures devront l'accompagner dans ses évolutions et il faudra également s'assurer que les réglementations actuelles et futures ne soient pas un frein aux adaptations des exploitations ; c'est une priorité pour leur durabilité économique mais également pour leur efficacité environnementale. ▀

Olivier Manceau

Lexique

Drainage : écoulement de l'eau retenu en excès dans les sols.

Nappes phréatiques : eau souterraine stockée qui se renouvelle plus ou moins rapidement, permettant d'alimenter les sources.

Lixiviation : souvent appelé lessivage - se dit en particulier des éléments fertilisants qui traversent le profil du sol sous l'action du drainage et qui se retrouvent en profondeur, hors de portée des racines.

Lame drainante : quantité d'eau de pluie qui traverse le profil du sol.

Case lysimétrique : outil expérimental installé dans des sites spécifiques, composé d'une cuve de dimensions variables (0.5 m² sur 0.9 m profondeur à 4 m² sur 2 m profondeur dans les dispositifs Ouest), remplie de terre et équipée au fond d'un dispositif permettant de récupérer les eaux de drainage chargées des éléments lixiviés.

Cipan : Culture Intermédiaire Piège à Nitrate non fertilisée enfouie (à la différence des cultures dérobées pouvant recevoir une fertilisation et être récoltée, qui peuvent également jouer un rôle de piégeage de nitrate).

La rhizosphère : c'est la région du sol directement formée et influencée par les racines et les micro-organismes associés.

Relation exponentielle :

En mathématique et en biologie, on parle d'un phénomène à croissance exponentielle (ou géométrique) lorsque la croissance de la population est proportionnelle à la population existante, c'est-à-dire lorsque le taux de croissance est constant.

L'ion nitrate (NO₃⁻) est l'élément absorbé par les cultures mais il est aussi très soluble. De ce fait, il peut être entraîné en profondeur par l'eau qui percole dans les sols : le risque de fuite de nitrate (lixiviation) dépend principalement de l'azote nitrique présent dans les sols à l'automne et de la lame drainante.

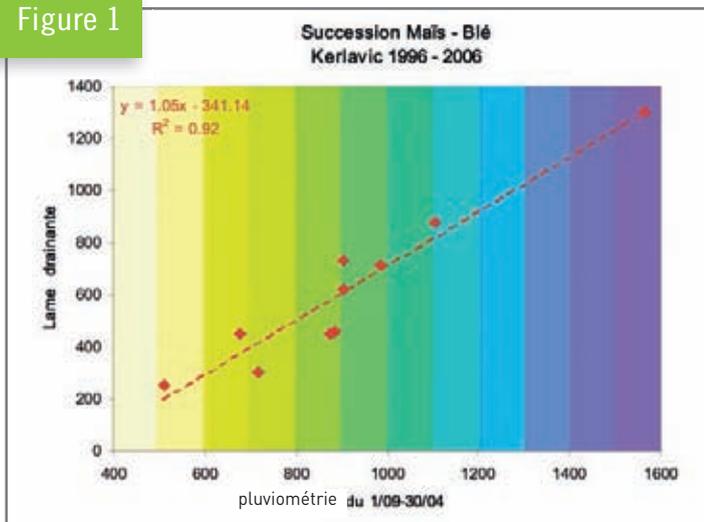
Le drainage : un élément fondamental pour comprendre le risque

La quantité d'eau qui va traverser le profil de sol pendant l'hiver et entraîner par lixiviation le nitrate vers les nappes phréatiques dépend de plusieurs facteurs, en particulier :

De la pluviométrie de l'hiver

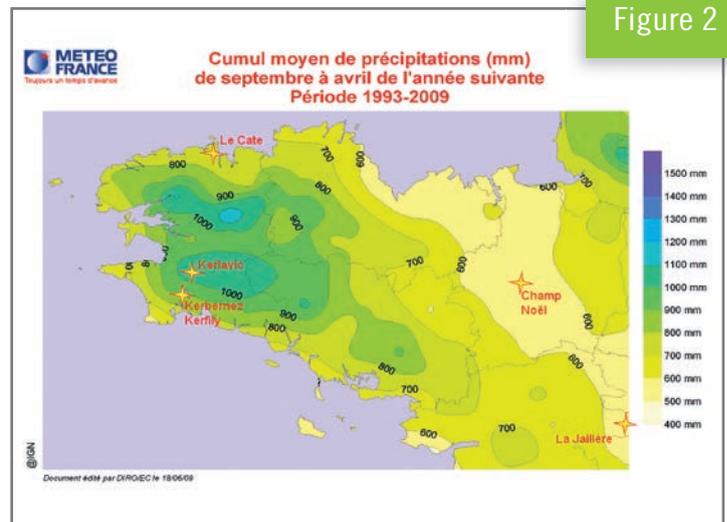
La relation entre la lame drainante (en mm) et la pluviométrie de septembre à avril est étroite.

Figure 1



▲ Variabilité des lames drainantes mesurées à Kerlavic (29) après un maïs selon la pluviométrie de l'année.

Figure 2



▲ Positionnement des sites expérimentaux sur la carte des cumuls moyens des précipitations.

● A la Jaillière (44-Arvalis) et à Champ Noël (35-Inra), la lame drainante est en moyenne de 150 mm pour une pluviométrie de près de 600 mm du 1^{er} septembre au 30 avril.

● A Kerlavic (29-Crab), la lame drainante moyenne varie de 530 à 620 mm selon les rotations pour une pluviométrie de plus de 1 000 mm du 1^{er} septembre au 30 avril.

De l'importance et de l'état de la réserve en eau du sol à l'automne

Plus la RU (réserve utile en eau du sol) est élevée et le sol est sec en automne, plus la quantité d'eau nécessaire pour la remplir sera importante, réduisant d'autant la lame drainante pour une même pluviométrie hivernale.

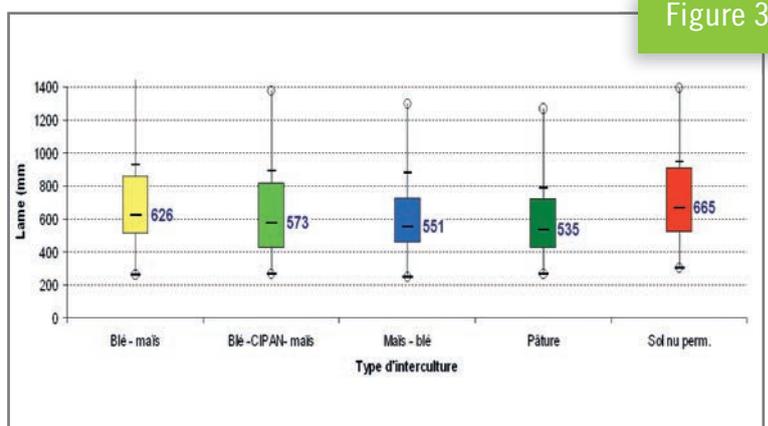
Ainsi, les caractéristiques du drainage vont bien sûr dépendre du contexte pédoclimatique, mais aussi de l'occupation du sol en été et en automne-hiver et du développement de la culture estivale : tout ce qui va influencer le bilan hydrique. Une bonne prise en compte de la variabilité du drainage entre années et entre situations pédoclimatiques est indispensable pour apprécier le risque de lixiviation du nitrate et les leviers d'actions à mettre en place, le cas échéant.

Sur la ferme expérimentale de Kerlavic (29-Crab-Arvalis), le drainage a été mesuré chaque hiver à l'aide de cases lysimétriques. Les résultats ont été analysés sur une période de 10 ans (automne 1996 au printemps 2006) pour 5 modes différents d'occupation du sol.

L'occupation du sol a également un impact sur la date du début drainage : à Kerlavic, par exemple, le drainage sous maïs commence 10 jours plus tard que sous une prairie ou une Cipan après céréale, la demande en eau du maïs étant supérieure aux deux autres couverts.

Ces grosses différences de lames drainantes (de 1 à 4 selon les sites et de 1 à plus de 6 entre années) induisent nécessairement des différences dans les quantités de nitrate lixivié et peuvent impacter le reliquat sortie hiver (RSH). ▲

Figure 3



▲ Importance des lames drainantes en mm mesurées selon l'occupation du sol l'année précédente et pendant l'interculture - Kerlavic (Crab-Arvalis) 1996-2006.

► L'interculture est la période privilégiée des fuites du nitrate

Tout ce qui peut contribuer à limiter la teneur en nitrate du sol avant et pendant le drainage sera de nature à limiter les fuites. Les recherches menées permettent de répondre à plusieurs questions :

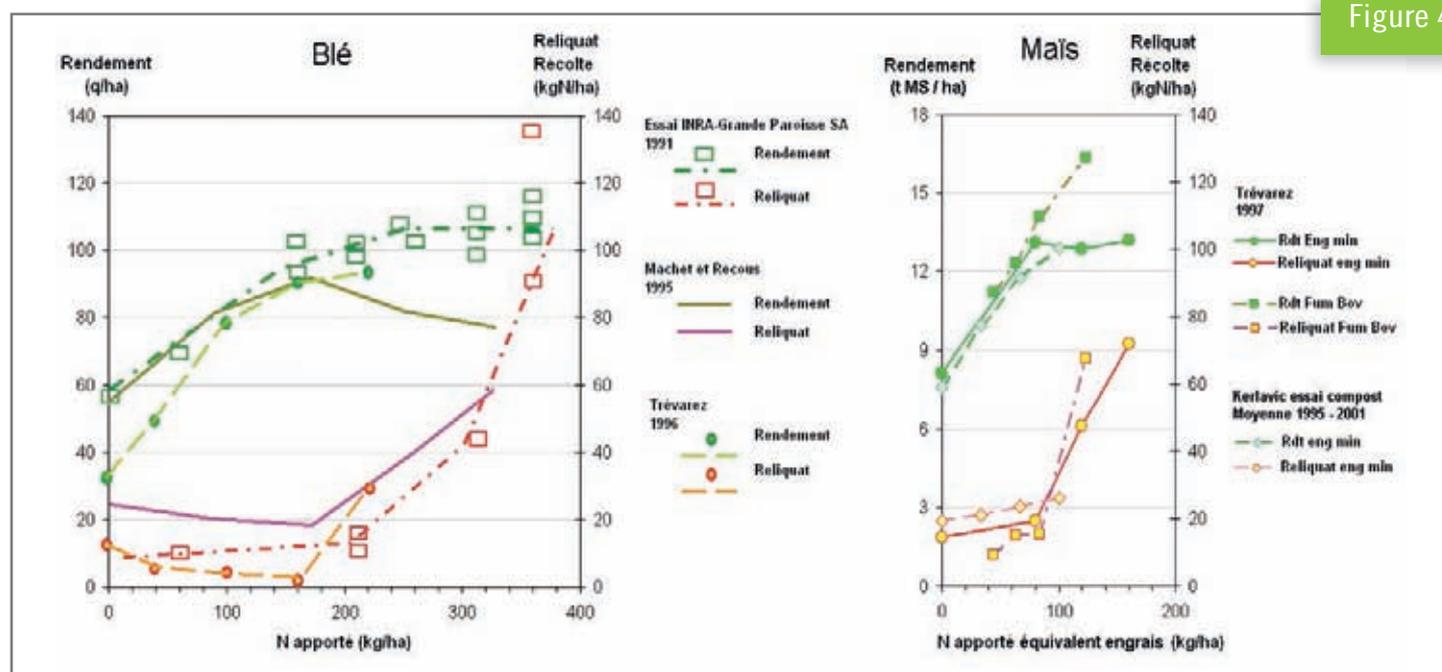
● Pas de lien entre fertilisation raisonnée et risque d'excédent d'azote

Il n'y a pas de lien direct entre le reliquat observé sous une parcelle à la récolte et la dose d'azote apportée à la culture, tant que cette dernière est conforme à la satisfaction des besoins. Seule une surfertilisation est susceptible d'augmenter le reliquat récolte.

La plupart des cultures ont besoin de plus d'azote pour exprimer leur potentiel de production que le sol ne peut en fournir (sauf parfois après la destruction d'une prairie de plusieurs années). La fertilisation azotée (et/ou la fixation symbiotique pour les légumineuses), minérale ou organique, vise donc à satisfaire leurs besoins et on observe un accroissement du rendement de ces cultures avec des apports d'azote croissants jusqu'à une valeur optimale. On remarque sur la figure 4 que l'efficacité de l'apport d'azote (gain de rendement par unité d'azote supplémentaire apporté) diminue

avec l'augmentation des doses. Le reliquat d'azote mesurable dans le sol à la récolte reste stable tant que cette efficacité est bonne, puis augmente dès que cette dernière diminue. Au final, lorsque la dose apportée dépasse l'optimum technique (c'est-à-dire le rendement maximum que la culture peut atteindre dans le contexte agronomique de la parcelle et de l'année), le supplément d'azote apporté va accroître de façon quasi proportionnelle le reliquat récolte.

Cet optimum technique correspond souvent à des doses supérieures à l'optimum économique, qui correspond à la dose à partir de laquelle le supplément de rendement obtenu avec une quantité supplémentaire d'azote apporté ne justifie plus ce supplément d'azote. L'optimum économique varie bien sûr avec les conditions économiques, le prix de l'engrais azoté d'une part et le prix du produit récolté d'autre part.



▲ Reliquat d'azote minéral mesuré et rendement du blé et du maïs mesurés à la récolte en fonction de l'azote apporté en équivalent engrais.

▲ Les fuites de nitrate restent faibles lorsque la fertilisation est ajustée.

● Les couverts végétaux (Cipan) réduisent les pertes d'azote

Les couverts végétaux piège à nitrate, par exemple une Cipan de type raygrass d'Italie entre blé et maïs, permettent de réduire sensiblement les pertes d'azote par ha.

A Kerlavic (29-Crab-Arvalis), les pertes moyennes d'azote sous sol nu entre blé et maïs sont estimées à 76 kg N/ha, contre 63 kg N/ha entre maïs et blé. L'implantation d'un RGI après blé diminue les fuites d'azote de 70 kg N/ha en moyenne (de 45 à 100 kg N/ha selon le niveau de fuite initial, et selon la lame drainante).

Cette diminution s'explique essentiellement par l'absorption du couvert (y compris rhizosphère) et par la réduction de la lame drainante, de l'ordre de 50 mm à Kerlavic et de 36 mm à Champ Noël (35-Inra). Si l'impact est mineur pour de fortes lames drainantes (600 mm à Kerlavic), il est beaucoup plus important en dessous de 200 mm de drainage comme à Champ Noël.

A Kerlavic, la quasi-totalité de l'effet du couvert est liée à l'azote absorbé par les parties aériennes et réorganisé par les racines (rhizosphère) (figure n° 5).

L'effet "piège à azote" d'une Cipan ne se limite en effet pas à l'azote absorbé par les parties aériennes. Il est remarquable de constater que l'azote absorbé par le couvert de type RGI (azote des parties aériennes) ne représente qu'une part de l'effet Cipan : en moyenne, il a été mesuré 57 kg N/ha dans les parties aériennes du RGI en février lors de sa destruction, tandis que la somme de son impact sur les fuites et sur le stock d'azote du sol atteignait en moyenne 92 kg N/ha. La quantité d'azote mesurée dans les parties aériennes du RGI représente donc 60 % de l'effet du Cipan sur les fuites de nitrate, ordre de grandeur de la réorganisation d'azote mesurée dans la rhizosphère par ailleurs (travaux Arvalis) et trouvée dans la bibliographie (Arvalis 2011, expertise collective Inra 2012). Ces valeurs correspondent à des Cipan bien développées, ce qui ne va pas être toujours le cas, en particulier lors de semis tardifs après récolte du maïs (figure n° 6).

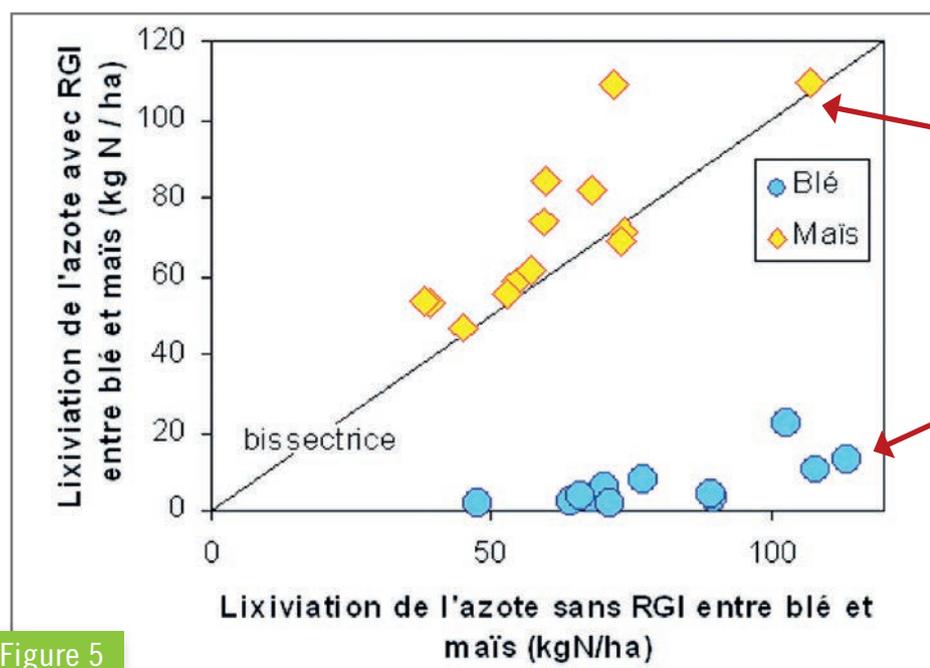


Figure 5

Exemple : le point jaune le plus haut correspond au lessivage d'azote de 100 kg/ha après maïs sans couvert. Dans la même rotation, un blé, quand il y a un couvert, ne lessive plus que 20 kg.

▲ Impact de l'implantation d'un couvert végétal entre le blé et le maïs sur les fuites d'azote après le blé et après le maïs - Kerlavic (Crab-Arvalis) 1995-2008.

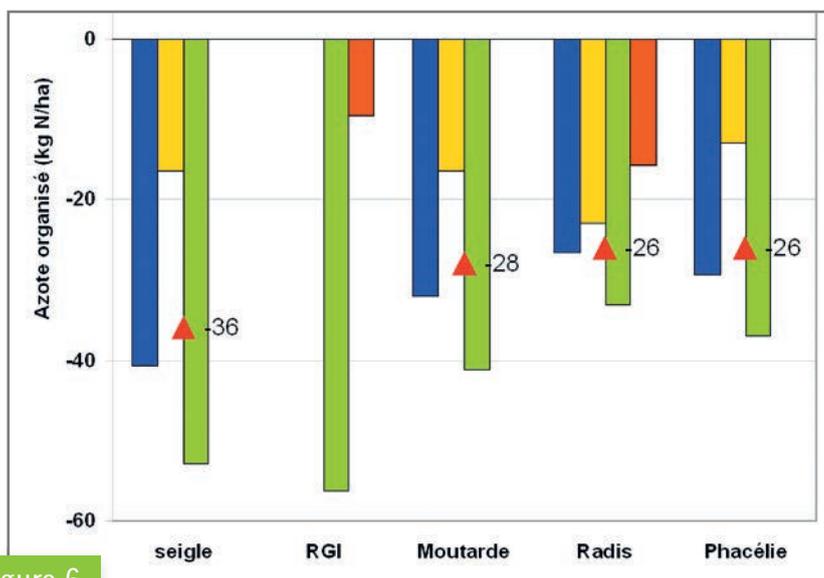


Figure 6

▲ Calcul des quantités d'azote organisé dans la rhizosphère des couverts végétaux. F. Laurent 1996.

● Entre deux maïs : quel couvert semer pour plus d'efficacité ?

Pour une récolte du maïs en ensilage

Pratiqué lors de la première décade de septembre, le couvert de type RGI a limité les fuites d'azote dans tous les essais référencés (semé sous couvert ou implanté après la récolte). Ces résultats sont en accord avec ceux d'autres dispositifs comme celui de Kerfily (cases lysimétriques Inra Quimper) où on évalue en moyenne, sur 14 années, l'impact d'un couvert de type RGI non fertilisé implanté entre 2 maïs à plus de 50 % de diminution des fuites.

Le prélèvement d'azote par une Cipan semée tardivement (fin octobre) atteignant rarement plus de 10-20 kg d'azote. L'effet du semis d'un couvert de type RGI en juin dans le maïs au stade 8/10 feuilles a été étudié. La grande majorité des expérimentations réalisées conduit à conclure que l'impact du RGI semé sous couvert du maïs ne gêne pas le maïs s'il reste peu développé à la récolte, ce qui est le cas quand il est semé au stade 8 à 10 feuilles du maïs. La meilleure efficacité de piégeage a été obtenue avec un RGI implanté sous maïs, mais la différence reste assez modérée (-20 à -30 kg d'azote). Au regard de l'impact modéré sur les fuites d'azote, l'intérêt d'implanter un couvert de type RGI sous couvert du maïs plutôt qu'après la récolte semble faible. Néanmoins, il faut replacer cela dans le contexte pratique d'une exploitation agricole d'élevage. En pratique, l'alternative à un semis de couvert de type RGI sous couvert du maïs ne sera jamais un semis en plein immédiatement après la récolte. Le cas général sera une intervention plus tardive, une fois que tout le chantier d'ensilage sera terminé et que les conditions de ressuyage du sol le permettront.

Cette technique mérite néanmoins d'être préconisée lorsqu'une problématique "nitrate" se pose dans un terri-

toire, d'autant qu'elle présente également un intérêt sur le plan de la protection hivernale des sols et de la limitation du ruissellement. On peut également recourir à des variétés de maïs plus précoces, ce qui augmente la possibilité de semer une interculture efficace, mais réduit souvent le potentiel de production du maïs en augmentant peu le fourrage produit par le couvert qui suit.

Entre deux maïs grain (figure 7)

Les différences essentielles par rapport au cas précédent du maïs ensilage sont :

- une récolte souvent de l'ordre d'un mois plus tard,
- la présence de résidus de récolte abondants (5 ou 6 t MS/ha) et dont le rapport C/N est élevé (≈ 50).

Les possibilités de croissance d'un couvert végétal entre la récolte et le début du drainage sont donc encore plus faibles que pour un maïs ensilage, et le développement d'un couvert semé dans le maïs "sous" les cannes de maïs après la récolte pose question. Par contre, on peut tester différentes possibilités de gestion des cannes de maïs pour optimiser l'organisation d'azote minéral du sol.

En théorie, plus les résidus sont fractionnés et mieux ils sont mélangés intimement au sol, plus les phénomènes d'organisation d'azote minéral sont importants. Plusieurs expérimentations sur céréales ont montré que le broyage (ou non) et l'enfouissement (ou non) de résidus riches en carbone (paille) ont des conséquences sur l'évolution du stock d'azote du sol. Cet impact reste minime derrière un maïs grain dans les conditions expérimentales de Kerlavic.

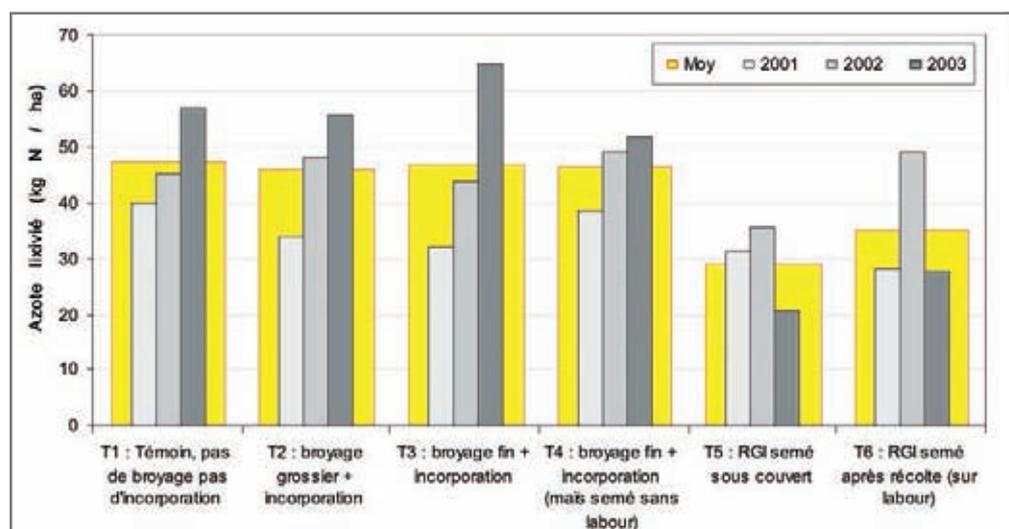


Figure 7

▲ Fuites d'azote entre 2 maïs grain selon les modalités de gestion de l'interculture - Kerlavic (29-Crab-Arvalis) 2001 à 2004 (récolte septembre).

Ces résultats amènent les conclusions suivantes :

- Les différentes modalités de traitement des cannes de maïs grain ont un effet limité sur les fuites d'azote, bien que leur présence permette une organisation d'azote minéral du sol de l'ordre de 5 à 15 kg N/ha que l'on n'observerait pas en sol nu.
- L'implantation d'un couvert de type RGI, que ce soit sous couvert du maïs ou après récolte et labour, réduit faiblement les fuites d'azote (15 à 20 kg N/ha) avec semble-t-il un léger avantage pour le semis sous couvert, les résidus du maïs gênant peu la reprise du RGI après la récolte.

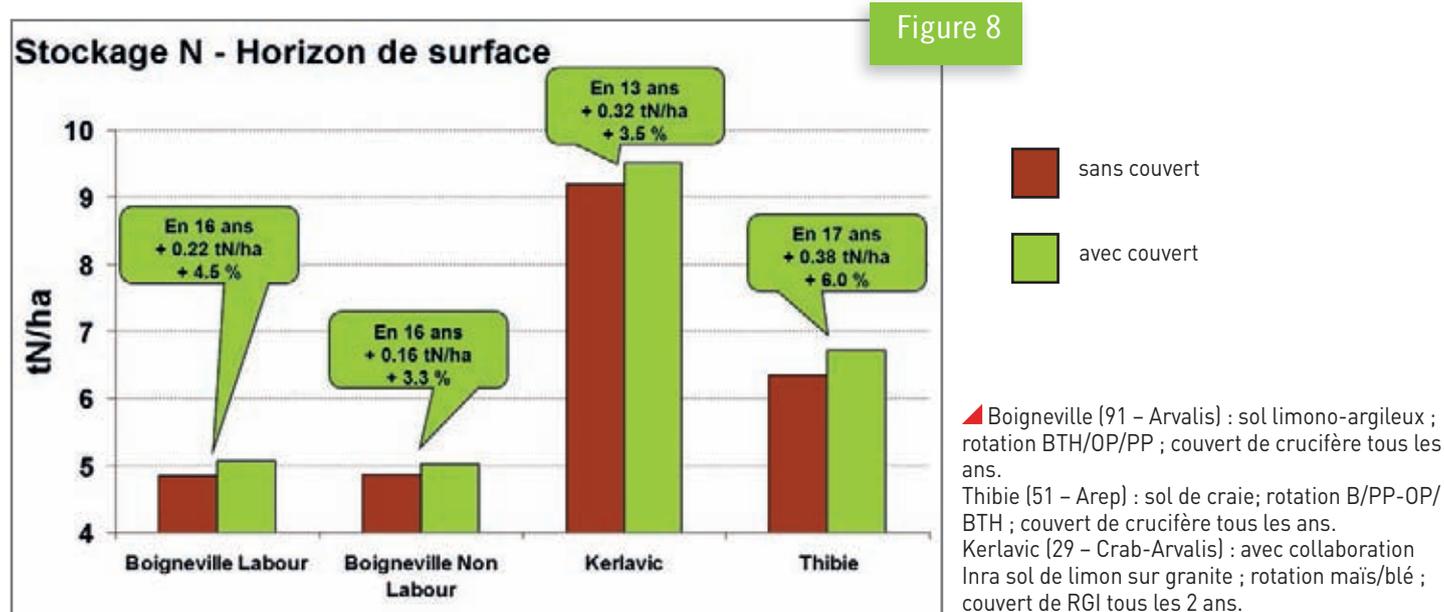
La réduction des fuites varie de 0 à 40 kg N/ha et dépend de la date de récolte du maïs (semis sous couvert) ou de la date de semis après récolte. Au-delà de fin septembre, il n'y a plus d'effet sensible de la Cipan sur la diminution des fuites.

● Les couverts d'interculture régulièrement enfouis en fin d'hiver augmentent la fourniture d'azote par le sol

L'incorporation répétée de matières végétales riches en azote des couverts d'interculture modifie la dynamique de l'azote et du carbone organique du sol. Divers essais long terme ont permis de démontrer les points suivants (thèse J. Constantin, 2010) :

- une augmentation des stocks d'azote et de carbone organique de l'horizon de surface du sol par rapport à une situation dont l'interculture a été maintenue en sol nu. Pour le site de Kerlavic (29-Crab-Arvalis) sur 13 ans (7 couverts enfouis), ce surplus se chiffre significativement à 0.32 t N/ha (soit + 3.5 %) et 4.3 t C/ha (soit + 4.4 %),

- un effet cumulatif positif sur la minéralisation de l'humus se chiffrant de manière significative à + 2.6 kg N/ha/an. Ainsi, au-delà de l'impact à court terme sur la culture suivante, l'introduction des couverts induit des effets positifs à long terme sur les fournitures d'azote par le sol, qui mettent néanmoins plus de 10 ans à se manifester. Ils sont liés à la fréquence de retour du couvert et à ses niveaux de production et sont de faible ampleur dans un premier temps. Cela expliquerait pourquoi on ne voit pas de conséquences significatives sur la fourniture d'azote aux cultures dans les 10 à 15 premières années d'essais en dehors de l'année de l'enfouissement. ▲



Ce qu'il faut retenir de l'interculture

- L'implantation d'un couvert après la récolte de la céréale permet de baisser en moyenne les fuites d'azote entre blé et maïs de 70 kg N/ha.
- Une date d'implantation précoce après moisson est primordiale pour maximiser cet effet.
- Dans le cas d'un couvert comme le RGI, l'effet piège à nitrate est aussi dû à de la réorganisation de l'azote dans la rhizosphère.

▲ Le semis précoce du couvert après céréales permet de maximiser l'effet piège à nitrate.



Ce document provient de l'Agrithèque. Toute reproduction sous quelque forme que ce soit, n'est autorisée que dans le cadre de l'usage privé du copiste ou après autorisation obtenue auprès des Chambres d'Agriculture de Bretagne.



Les reliquats d'azote dans les sols en sortie d'hiver évoluent

Comment utiliser et valoriser des références issues de mesures ponctuelles et de réseaux ?

En Bretagne, on dispose maintenant de plus de 20 ans de mesures de reliquats réalisés en sortie d'hiver (RSH). Le RSH baisse en moyenne en Ille-et-Vilaine depuis 1987. Ceci est un bon indicateur de l'amélioration des pratiques de fertilisation des producteurs. En zone arrosée (ouest de la Bretagne, plus de 400 mm), la forte lame drainante lessive presque toujours la totalité de l'azote présent dans le sol avant et durant l'essentiel de la période de drainage, ne laissant en sortie d'hiver qu'une partie de la minéralisation hivernale. Les RSH sont généralement compris entre 10 et 50 kg N-NO3/ha (figure 9), la variabilité interannuelle des RSH dépendant beaucoup des pluies des mois de décembre et janvier.

Dans l'Est de la Bretagne, une partie de l'azote présent à l'automne persiste dans le reliquat en sortie d'hiver, du fait d'une lame drainante moindre (partie gauche de la figure 9).

Lorsqu'on classe les lames drainantes en 5 groupes de drainage (faible à élevé) et que l'on considère les résultats de chaque groupe par ordre chronologique, le même constat peut être fait d'une baisse des RSH moyens avec les années (figure 10). La comparaison de 2 années sèches (1992 et 2005) montre que le reliquat passe de 238 kg à 80 kg d'azote par hectare. Dans la classe intermédiaire (200 mm de lame drainante) le reliquat de 209 kg en 1991 est descendu à 50 kg N/ha en 2010-2011. Ces exemples illustrent l'évolution importante des pratiques de fertilisation et la généralisation des Cipan puisque pour une même lame drainante, le RSH moyen du département de l'Ille-et-Vilaine baisse au fil du temps. ▲



▲ De nombreux prélèvements sont réalisés début février pour mesurer l'azote disponible dans les sols (RSH).

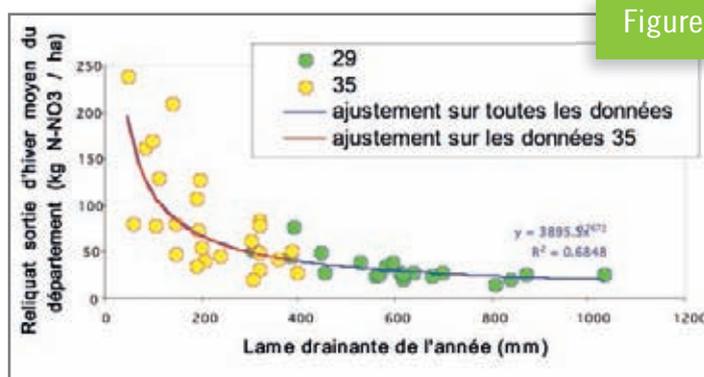
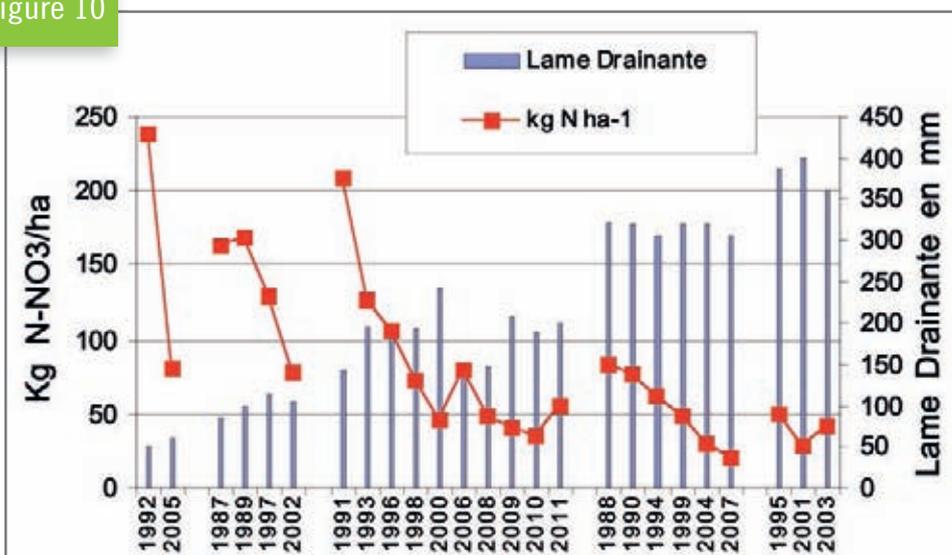


Figure 9

▲ Impact de la lame drainante sur le niveau moyen de reliquat sortie hiver (Ille-et-Vilaine 1987-2011, Finistère 1992-2011).

Figure 10



▲ Classement des RSH d'Ille-et-Vilaine en fonction des lames drainantes.



▲ La connaissance du RSH est nécessaire pour calculer la dose d'azote.

Quelle gestion azotée des prairies ?



Les prairies présentent plusieurs différences avec les cultures dont trois essentielles :

- 1) Elles sont pluriannuelles, avec plusieurs récoltes par an et des besoins en azote importants tant que les conditions climatiques permettent la croissance (y compris pendant l'hiver, où elles sont aptes à utiliser l'azote minéral du sol). Elles présentent un potentiel de prélèvement d'azote très élevé (dépassant 400 kg d'azote environ par ha en conditions favorables d'ouest Bretagne).
- 2) Cet azote, exporté de la parcelle en cas de fauche, va être en grande partie restitué par les déjections des animaux au pâturage. L'exportation nette de la parcelle représentera alors moins de 5 % (adultes en entretien) à un maximum d'environ 25 % (vaches laitières en production) de l'azote de l'herbe ingéré par les animaux.
- 3) Une part de l'azote mis en jeu (fertilisant, fixation, plante, déjections) est organisée dans les sols avec stockage d'azote et de carbone sous forme organique. Le stockage limite les pertes durant la vie de la prairie, mais cette réserve va être en partie minéralisée lors de la destruction de la prairie pour mise en culture.

De ces caractéristiques découlent plusieurs enseignements :

● Une fertilisation azotée raisonnée des prairies en période de pousse ne provoque pas ou peu de fuite d'azote

La figure 11 présente une compilation de résultats reliant l'azote lixivié mesuré à la fertilisation, dans divers dispositifs expérimentaux européens pâturés ou fauchés, le plus souvent en régions à drainage hivernal élevé. On mesure de faibles pertes pour des apports de fertilisant azoté inférieurs à 200 kg N/ha/an, mais une très large variabilité de la lixiviation du nitrate pour des apports supérieurs à 250-300 kg N/ha. Cette dernière observation indique que le niveau de fertilisation n'explique pas complètement les fuites mesurées. Pour des doses très élevées (300 à 500 kg N/ha), les fuites peuvent dépasser 150 kg N/ha pour une prairie pâturée mais rester modérées pour une prairie de fauche.

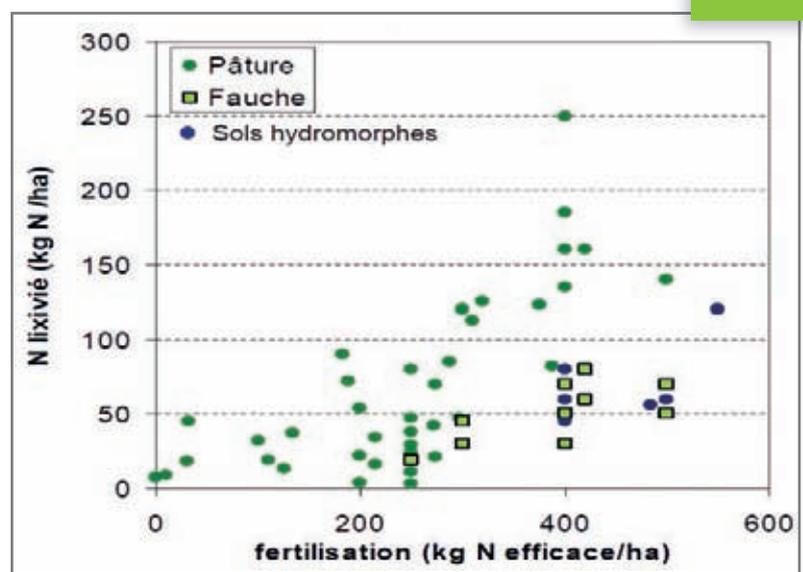
Pour une même dose d'azote, 2 facteurs vont influencer très fortement le niveau de fuites : la répartition de la dose dans l'année et surtout la présence plus ou moins importante des animaux sur la parcelle et les déjections correspondantes. D'une manière générale, plus les apports d'azote sont concentrés durant la période de forte croissance de la prairie (de février à fin de printemps - début été selon les contextes climatiques), plus les fuites seront modérées, grâce à une valorisation maximale de l'azote apporté et donc à une meilleure production de la prairie. Quels que soient les sites, les apports tardifs d'azote augmentent les pertes par lixiviation.

Ces différences de fractionnement ont un impact sur la production globale d'herbe et modifient légèrement la répartition de cette production, avec plus d'herbe au printemps et moins en été, ce qui peut avoir des conséquences sur la conduite du troupeau et la récolte des fourrages "herbe" conservés de l'exploitation. Les associations avec des légumineuses, plus productives en fin de printemps-été qu'en sortie d'hiver, sont une autre façon d'assurer une souplesse dans l'offre de pâturage pour les animaux.

La mauvaise valorisation de l'azote par l'herbe dès que ses conditions de croissance deviennent défavorables, par exemple lors d'une sécheresse estivale, est parfaitement illustrée par l'évolution du Coefficient Apparent d'Utilisation de l'azote apporté au cours de la saison, qui varie de 60 à 95 % au printemps à Kerlavic (29-Crab-Arvalis) selon les années, contre 15 à 35 % en été. Les conditions de pousse estivale constituent donc un critère très pertinent à prendre en compte dans le raisonnement de la dose d'azote.

En outre, une répartition plus tardive de l'azote apporté entraîne également un décalage dans la pousse de l'herbe, et, si elle est pâturée, des déjections au pâturage encore plus tardives.

Figure 11



▲ Fuites d'azote mesurées sous prairies selon la fertilisation azotée apportée : synthèse d'essais (In Vertès et al. 2010, d'après Werther (1989), Jarvis (1993) ; Simon (1997), Laurent (1999), Le Gall (2000), Wachendorf (2004)).

● La lixiviation d'azote en prairie pâturée dépend du chargement

La figure 12 basée sur le même jeu de données expérimentales que la précédente, illustre la relation de forme exponentielle trouvée avec le chargement animal exprimée en Unité Gros Bétail x nombre de jours équivalent de pâturage (UGB.JPE/ha/an). La lixiviation de nitrate reste faible ou modérée jusqu'à 450 à 550 UGB JPE/ha puis augmente rapidement pour atteindre des niveaux élevés, avec des pertes supérieures à 100-120 kg N/ha/an. Cette relation a été reprise pour caractériser des niveaux moyens de lixiviation sous prairies de façon simplifiée dans le module azote de l'outil Territ'eau (figure 15).

Si l'on voit clairement que la réduction du nombre de jours de pâturage aura un impact fort sur la réduction des fuites

d'azote, la réflexion doit également porter sur l'étalement vertical de ce nuage de points. Par exemple, pour un niveau de chargement de 400 à 500 jours de pâturage, les fuites peuvent varier de 20 à 80 kg N/ha/an. Cette variabilité s'explique parfois par des différences de lame drainante (pertes très faibles pour des chargements moyens en zones à faible drainage, pertes élevées dues à la mortalité partielle du couvert liée à une forte sécheresse) ou de types de sols (moindres pertes par lixiviation en sols hydromorphes), ou de conditions expérimentales, mais aussi par des facteurs de pratiques telles que le fractionnement de la dose d'azote, l'adéquation de celle-ci au potentiel de pousse estivale et par un plus ou moins bon ajustement entre la gestion du pâturage par les animaux et le potentiel de production lui-même.

Les principales pratiques à risque sont celles qui déconnectent l'apport d'azote de la valorisation par le couvert. On citera en particulier la situation où les animaux restent au pâturage avec un complément fourrager extérieur, en restituant plus d'azote que l'herbe n'en avait absorbé. Les parcelles "parking" proches de la salle de traite, qui présentent des chargements très élevés sont les sites les plus à risque de lixiviation de l'azote.

Notons que l'amélioration des pratiques permet en général à la fois une meilleure production et valorisation de l'herbe, et une diminution des pertes.

▲ Relation entre l'importance de la pression de pâturage et les quantités d'azote perdues par lixiviation. Notons que le nombre de jours de pâturage x UGB intègre la "part de fauche" et le niveau de fertilisation par le biais de la production d'herbe qui s'en suit.

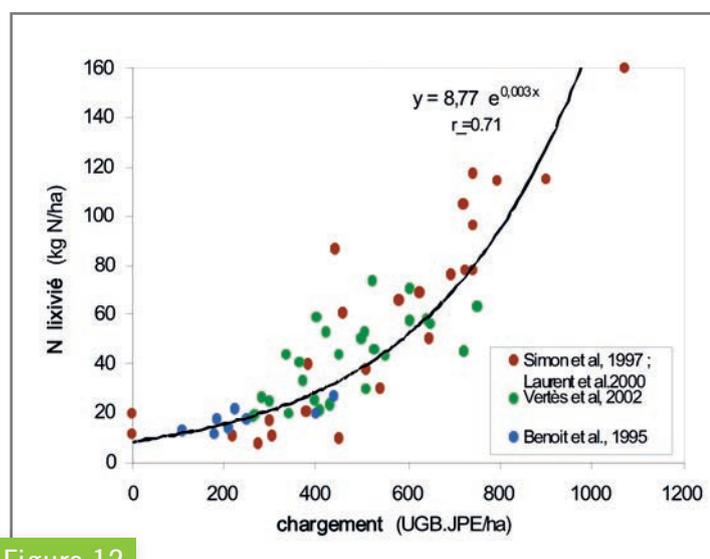


Figure 12

● La minéralisation de l'azote suite à un retournement de prairie pâturée est très importante la première année

Les quantités totales d'azote minéralisé après destruction d'une prairie de 5 à 10 ans varient entre 120 et 450 kg N/ha la première année, pour un total minéralisé de 200 à 700 kg N/ha à l'issue de 2 années selon les sites et les modalités testées. Ainsi, même si elles sont affectées d'une grande variabilité, ces quantités sont toujours importantes et il est nécessaire de disposer de références pour les estimer sur le terrain et les intégrer dans le raisonnement de la fertilisation. Les cinétiques de minéralisation calculées à partir des mesures au champ présentent toutes la même "allure", dont la figure 13 donne quelques exemples : une 1^{ère} phase linéaire de minéralisation intense est suivie d'une 2^e phase, linéaire aussi, avec une vitesse de minéralisation plus faible. La 1^{ère} phase, d'une durée variable entre essais mais généralement comprise entre 4 à 8 mois environ, correspond au cumul de l'effet du retournement de prairie et de la minéralisation de l'humus du sol. La 2^e correspond principalement à l'effet de la minéralisation de l'humus du sol, une fois que le surplus de minéralisation à court terme dû au retournement s'est estompé.

On n'observe pas d'effet notable de l'époque de destruction sur la cinétique de minéralisation.

Ces références ont été traduites par une grille de valeurs à prendre en compte en cas de retournement de prairie (voir les "grilles azote" des chambres d'agriculture de Bretagne et le document "Calcul de la fertilisation azotée des cultures annuelles et des prairies 2012" du Comifer).

L'étude des conséquences des retournements de prairie sur la minéralisation de l'azote du sol a fait l'objet d'un important travail scientifique et technique dans le grand ouest de la France. Les conclusions de ces travaux ont pu être comparées à celles d'autres équipes de recherche européennes et, pour la plupart, sont communes à l'ensemble des dispositifs étudiés : forte minéralisation dans les mois qui suivent la destruction, suivi d'un retour à la minéralisation basale dès l'année suivante (prairies de courte durée) ou au bout de 2-3 ans (prairies de plus de 5 ans).

La valorisation de l'azote libéré est optimale par des cultures de printemps tel le maïs (avec un couvert intermédiaire) ou la betterave fourragère. L'interculture suivante reste toutefois clairement "à risques" en matière de fuites d'azote. En zone climatique à pluviométrie et drainage hivernal élevés, les destructions d'été ou d'automne (prairie - colza et prairie - céréales d'hiver) présentent des risques de fuite élevés sur l'automne et l'hiver du semis de la culture suivante étant donné la faible dynamique d'absorption d'azote pendant la phase active de minéralisation post-retournement. La protec-

tion de l'interculture suivante peut par contre être parfaitement assurée grâce à un couvert efficace. La variabilité entre sites est importante et il n'existe pas à ce jour d'indicateur simple permettant de prédire avec précision la minéralisation de l'azote post destruction de prairie. Les références élaborées (cf grilles) permettent néanmoins un bon ajustement de la fertilisation azotée des cultures suivantes. Rappelons que la réglementation interdit tout apport d'azote à la culture qui suit une destruction d'une pâture de plus de 3 ans. ▲

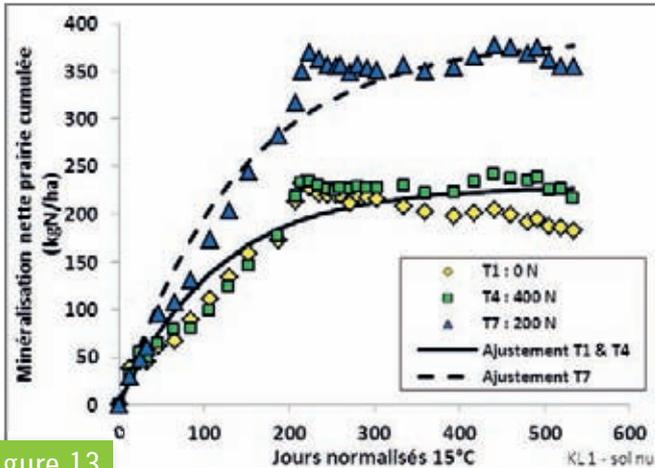


Figure 13

Les sites T1, T4 et T7 sont différents.

Le niveau de minéralisation entre T7, T1 et T4 est dû à un effet de site plus qu'à un effet de niveau de fertilisation. Ce qu'il faut retenir, c'est que quels que soient le site et le niveau de fertilisation, la cinétique de minéralisation suit une courbe semblable : forte minéralisation durant un an environ puis stabilisation (300 jours normalisés sous le climat breton correspond à un peu plus d'un an).

▲ Cinétiques de minéralisation nette de l'azote due à un retournement de prairie. Les points représentent les mesures. Les courbes reproduisent les ajustements statistiques sous forme exponentielle simple. Essai de Kerlavic 1, les différents traitements correspondent à des niveaux de fertilisation différents de la prairie (T1 : sans apport d'azote ; T4 : apport de 400 kg N/ha ; T7 : apport de 200 kg N/ha).

Ce qu'il faut retenir de la fertilisation des prairies

- Une fertilisation azotée raisonnée apportée en période de pousse ne provoque pas ou peu de fuite d'azote.
- En moyenne, une pression de pâturage de 500 à 550 UGB.JPE/ha/an ne provoque que des fuites modérées
- La minéralisation du sol après retournement est très importante durant environ un an. Elle devient plus faible par la suite.



Photo E. Bignon - Réussir

▲ Une fertilisation azotée raisonnée apportée en période de pousse ne provoque pas ou peu de fuite d'azote.

Les déjections ont deux effets "engrais azoté"

Deux effets des effluents animaux, rebaptisés aujourd'hui "*Produits Résiduaire Organiques issus des Elevages (PROE)*" (fumiers, lisiers, composts, issues de traitements,...) sont couramment admis : un effet court terme, se traduisant par de l'azote disponible pour la culture de l'année et un effet à plus long terme qui s'exerce au cours des années suivantes.

● L'effet azote direct à la culture, exprimé en "équivalence engrais" permet le calcul de la dose d'apport du produit organique

Seule une fraction de l'azote organique contenu dans un engrais ou amendement organique se minéralise au cours du cycle d'une culture, contrairement à de l'azote de synthèse (urée, ammonitrate...).

Connaître cette fraction de l'azote du PROE utile à la culture permet un bon ajustement de la dose. Cette fraction est exprimée en "*équivalence engrais minéral*". Cette grandeur est obtenue par des essais fondés sur la mise en œuvre de courbes de réponse à l'azote, essais réalisés pour les principales cultures (blé, maïs...) et les principaux produits organiques (lisier de porc, fumier de bovin et volaille...).

Le rendement (ou autre paramètre mesuré sur la culture) obtenu suite à l'apport de la déjection à une dose d'azote a priori inférieur à l'optimum, est comparé à ceux obtenus avec des doses croissantes d'azote minéral. On en déduit ainsi la part de l'azote de la déjection se comportant comme de l'engrais.

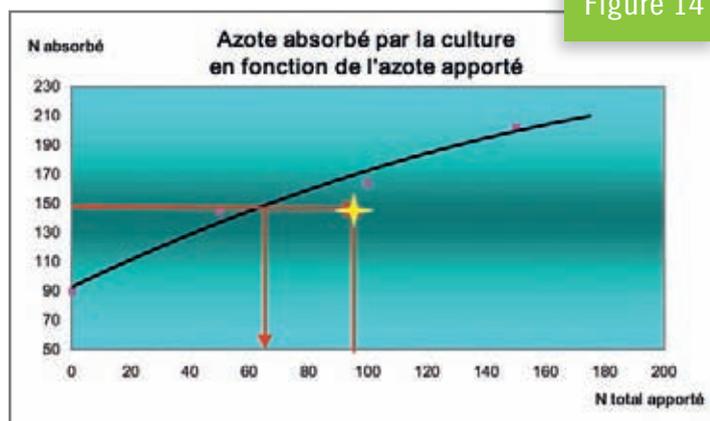
Pour des cultures ou des produits organiques moins courants, cette approche au champ est remplacée par des analyses de laboratoire (minéralisation potentielle de l'azote) plus rapide et moins coûteuse.

Les coefficients "*équivalent engrais*" présentent des variations annuelles et spatiales très importantes pour une même matière organique et même culture selon notamment les durées et les conditions précises de stockage de ces PROE, mais aussi les conditions d'épandage et d'enfouissement.

Les chiffres publiés (cf. tableau des "*coefficients d'équivalence engrais selon les cultures*") des chambres d'agriculture de Bretagne) sont des moyennes qui ne prennent pas en compte toute la variabilité.

Les dates d'apport mais aussi, pour les PROE riche en ammoniac, le mode d'apport (palette, pendillard, injection) vont influencer ce coefficient.

Figure 14



▲ Exemple d'un lisier de porc sur blé : (Plélo 2011 Crab). Paramètre mesuré : l'azote absorbé par la culture.

● Les apports répétés de PROE ont un effet sur l'activité minéralisatrice du sol

Les dispositifs expérimentaux de moyenne et longue durée mis en place au niveau régional dans les années 80-90 permettent aujourd'hui de mieux les quantifier.

Les résultats obtenus sur ces essais montrent que les apports de PROE régulier sur des longues périodes entraînent pour la majorité des essais une différenciation significative des teneurs en matière organique des sols, comparativement au traitement en fertilisation minérale, cet accroissement de la matière organique se traduisant par un supplément de minéralisation significatif, avec des quantités supplémentaires annuelles d'azote minéralisé variant de 25 à plus de 80 kg N/ha selon les situations et les scénarios d'apport à l'issue de plusieurs années d'apports répétés.

On peut logiquement s'attendre à ce que le supplément de minéralisation des sols induit par les apports de PROE entraîne une augmentation à moyen et long terme des risques de pertes par lixiviation du nitrate pendant la période hivernale.

Les données expérimentales acquises sur les essais de longue durée ainsi qu'une approche modèle ayant permis de calculer le risque de lixiviation pour différents scénarios

d'apport et différentes situations pédo climatiques conduisent à conclure à un risque modéré de pertes dans le cas d'apports d'effluent, à condition toutefois que l'on se situe dans le cadre d'apports à dose agronomique. On observe en effet une augmentation très modérée des stocks de d'azote minéral au début de l'automne, dans les sols recevant des PROE dans le cas de fertilisation raisonnée, et l'approche modèle permet de conclure à une augmentation modérée des pertes résultant du supplément de minéralisation pendant la période automne-hiver sous sol nu.

Ce niveau de risque est maîtrisable par une gestion appropriée des périodes d'interculture.

Pour améliorer le conseil en fertilisation, les chambres d'agriculture de Bretagne et l'Inra ont mis en place depuis 2011 un réseau de 140 parcelles représentatives de la diversité des sols, du climat et des systèmes de culture de l'Ouest, avec pour objectif d'acquies de nouvelles références sur la minéralisation des matières organiques humifiées du sol (réseau Mh). ▲

► Territ'eau : un outil Agrotransfert (Inra - Crab) qui diagnostique les fuites d'azote sur un territoire

Il a pour objectif de mettre à disposition d'un large public des référentiels et outils de calcul pour mieux quantifier et maîtriser les pollutions diffuses agricoles dans les bassins versants de taille moyenne (de 10 à 100 km²).

Il rassemble trois grands groupes d'outils :

- 1) Des référentiels de connaissances, développés dans un vocabulaire accessible à un large public, incluant des bases de données techniques et environnementales, issues de divers travaux scientifiques.
- 2) Des diagnostics fondés sur des indicateurs relatifs aux espaces cultivés, interstitiels et semi-naturels, relatifs aux principales pollutions diffuses (C, N, P, bactéries, produits phytosanitaires...). Ces outils de diagnostic portent sur les éléments semi-permanents des paysages (bords de champ, cours d'eau...) et sur les activités agricoles sous la forme de typologie de rotation associées à des pratiques agricoles de fertilisation (cultures) et d'utilisation (prairies). Le diagnostic se veut fonctionnel, au sens où chaque élément ou activité est traduite en une ou des fonctions, qui sont évaluées quantitativement ou qualitativement, suivant l'état des connaissances.
- 3) Des exemples d'initiatives de terrain, incluant la manière dont ils ont été mis en œuvre.

Territ'eau encourage une démarche participative des habitants du territoire, par exemple, pour prendre en compte des éléments du paysage qui impactent les fuites vers le milieu naturel. Cette démarche est expliquée sur un support numérique (http://agro-transfert-bretagne.univ-rennes1.fr/Territ_eau/accueil.asp) très visité par la communauté francophone (500 visiteurs par mois).

Elle doit permettre :

- 1) une appropriation du milieu dans lequel s'inscrit l'exploitation agricole et du fonctionnement d'un bassin versant agricole,

- 2) de juger de l'effet (élémentaire et combiné) des systèmes de culture et des éléments du paysage dans un environnement donné, sur la qualité des eaux. Cette démarche est importante alors que beaucoup de confusion, voire même de controverse, porte sur ces aspects.

Le module azote estime par une "note nitrate" une émission de nitrate vers les eaux superficielles, à partir d'une émission sur l'ensemble des parcelles du bassin versant, intégrée sur la durée de la rotation et en agrégeant ces émissions et en les modulant par les effets tampons, à l'échelle du bassin versant. La démarche est illustrée par la figure 15.

Le module azote estime les pratiques à risque de la parcelle au bassin versant

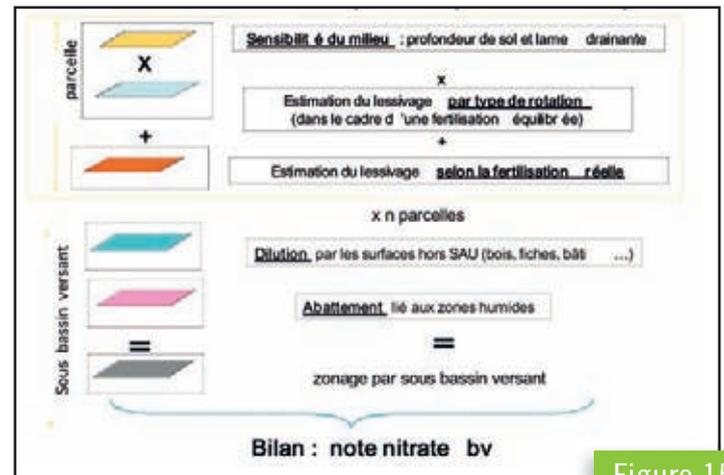


Figure 15

► Schéma de la méthode d'estimation de l'azote lessivé à l'échelle du bassin versant.

► Territ'eau : un outil pour diagnostiquer les fuites d'azote sur un territoire.



Le tableau (figure 16) récapitule quelques données sur des rotations courantes dans les exploitations d'élevages de l'ouest.

| Coefficient de lessivage = 1 | Quantité N lixivié calculée (kg/ha/an) |
|---|--|
| Prairie 9 ans < 300 UGB.JPP/ha/an /blé | 25-35 |
| Monoculture de maïs fourrage + Cipan précoce avant le 30/09 | |
| Prairie mixte fauche - pâture, refaite tous les 6 ans | 35-45 |
| Maïs/blé + Cipan | |
| Maïs/blé/colza/blé + Cipan | |
| Maïs/blé + Cipan courte durée /orge + Cipan | |
| Monoculture de maïs fourrage + Cipan sous couvert | 45-55 |
| Monoculture de maïs fourrage + Cipan tardif entre le 30/09 et 10/10 | |
| Maïs/blé/orge + Cipan | |
| Prairie pâturage modéré 300-550 UGB.JPP/ha/an/maïs-Cipan/maïs/blé | 55-65 |
| Rotations avec légumes industries (sans prairies) | 65-75 |
| Monoculture de maïs fourrage + Cipan zone froide après le 10/10 | |
| Monoculture de maïs grain | |
| Prairie pâturage intensif* 550-900 UGB.JPP/ha/an /maïs-Cipan/maïs/blé | 125-135 |
| Prairie proche stabulation "parking"* refaite tous les 6 ans | |

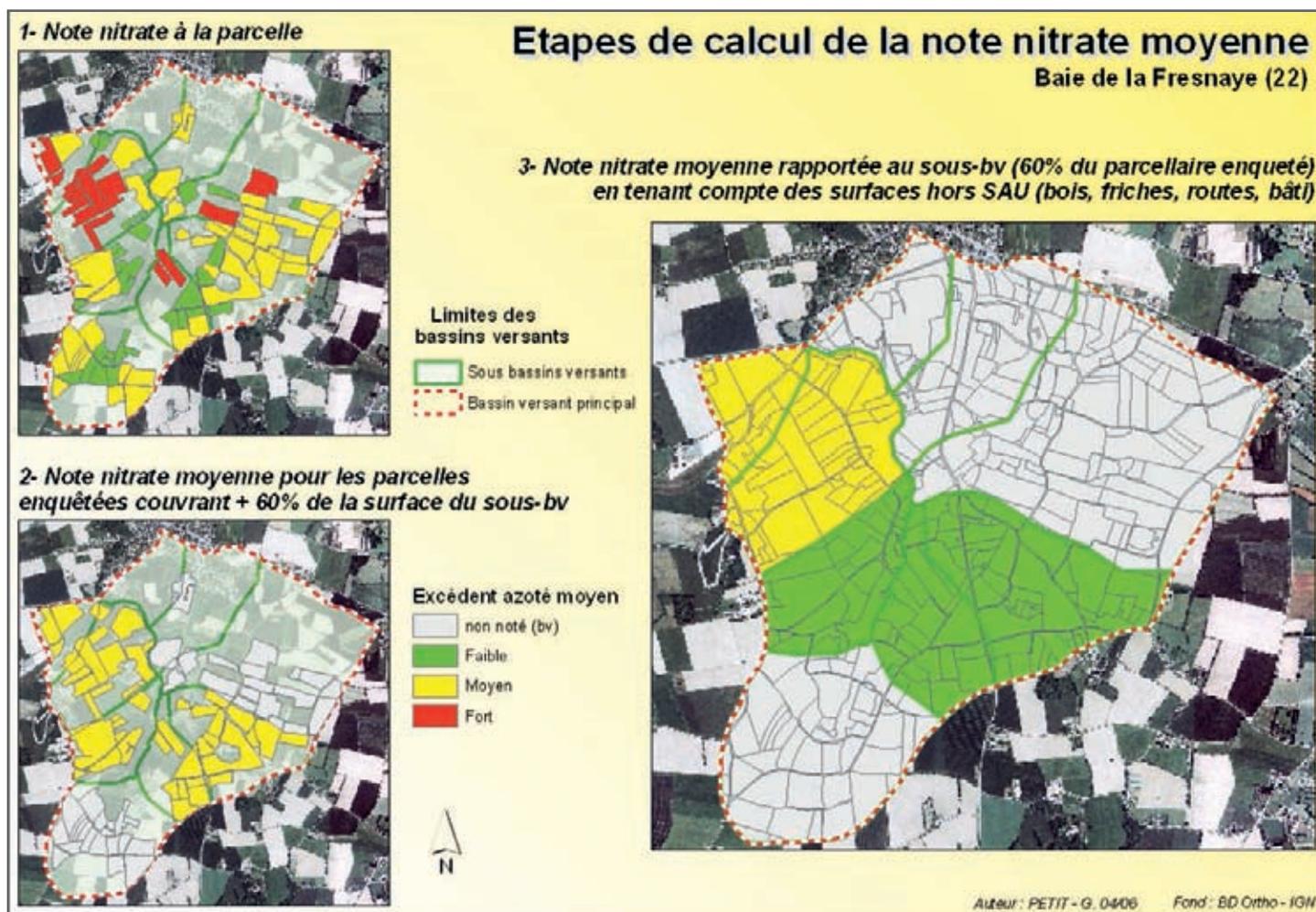
Figure 16

▲ Exemples de quantité d'azote lixivié pour des exemples de rotations (fertilisation équilibrée optimale, sol sain assez profond, contexte climatique favorables pour la pousse de l'herbe).

* nota : pour la partie prairies ces pratiques ne correspondent pas à de bonnes pratiques de pâturage.

Ces niveaux de risques "basiques" sont modulés par la sur-fertilisation éventuelle, les résultats des parcelles enquêtées sont ensuite extrapolés au territoire et la notation du risque final intègre l'effet des espaces tampons régulateurs (zones

humides). Le diagnostic ainsi réalisé permet d'orienter les actions les plus efficaces pour réduire les risques de pollutions diffuses à l'échelle du bassin-versant. ▲



▲ Lessivage d'azote à l'échelle de la parcelle, du sous bassin versant et du bassin versant.

► MesP@rcelles : un outil en phase avec les références bretonnes sur la gestion de l'azote

Comment gérer au mieux l'azote à l'échelle de l'exploitation ? C'est l'une des missions confiées à Fabien Stéphan, référent technique MesP@rcelles pour les chambres d'agriculture de Bretagne. Cet outil dédié au suivi des cultures intègre la gestion de l'azote, au plus près du contexte de l'exploitation.

- La recherche appliquée met en place régulièrement des nouvelles références qui sont parfois spécifiquement bretonnes. Comment MesP@rcelles s'adapte à ces nouvelles données régionales ?

Fabien Stéphan - Dès son lancement, MesP@rcelles a pris en compte des références spécifiquement régionales. Le plan de fumure à travers le calcul des doses d'azote, repose sur les résultats issus des travaux des Chambres d'agriculture de Bretagne, de l'Inra et d'Arvalis Institut du Végétal. Les bases du raisonnement du Comifier y sont respectés. Nous avons mis en évidence lors de la journée scientifique du 3 février 2012 que le drainage n'était pas le même entre l'est et l'ouest de la Bretagne, qu'il changeait tous les ans et qu'il entraînait donc des pertes d'azote parfois fort différentes.

- Comment MesP@rcelles prend-il en compte une perte d'azote aussi variable ?

F. S. - MesP@rcelles intègre la situation géographique de l'exploitation de l'abonné, ainsi une exploitation à Rennes ou à Brest n'aura pas le même reliquat sortie hiver (RSH) de proposer par le logiciel, ce reliquat est personnalisable en cours de campagne pour tenir compte des résultats propres à la parcelle ou issus des réseaux de reliquats.

- Une dose supérieure aux besoins de la culture est susceptible d'augmenter le reliquat fin de culture et donc les pertes d'azote. Une dose trop faible peut pénaliser son rendement. Comment MesP@rcelles peut-il intégrer la très grande variabilité des besoins des cultures ?

F. S. - La grande variabilité des besoins dépend en grande partie du rendement prévisionnel. Grâce à la consultation de l'historique parcellaire, MesP@rcelles permet de définir un rendement prévisionnel moyen.

- La Directive Nitrate IV stipule, depuis 3 ans, que tous les agriculteurs doivent couvrir leurs sols l'hiver. MesP@rcelles prend-il en compte les effets directs et à moyen terme de ces Cipan ?

F. S. - Oui, le précédent de la culture en place est pris en compte pour le calcul de la dose d'azote, de même que la date de destruction du Cipan qui influe sur la quantité d'azote restituée. Les arrières effets sont pris en compte dans le choix du système.

- La fertilisation des prairies est complexe. Elle doit prendre en compte la fertilisation non maîtrisable, la présence plus ou moins importante de trèfle, l'âge, la capacité de pousse l'été, le passé organique... Comment

un logiciel peut-il intégrer toute cette diversité d'éléments à renseigner ?

F. S. - MesP@rcelles se caractérise par une grande précision dans le calcul de dose d'azote sur prairie. Les postes tels que le pourcentage de trèfle, l'âge de la prairie, le mode d'exploitation et encore la date de 1^{ère} coupe sont pris en compte.

- Seule une part de l'azote d'une déjection apportée est efficace sur la culture qui suit l'apport. MesP@rcelles prend-il en compte des coefficients d'équivalence azote spécifiques à la Bretagne ? Varient-ils en fonction des dates d'apport ?

F. S. - Ces références sont présentes dans MesP@rcelles et elles sont issues de données bretonnes. Pour chaque apport de déjections, un coefficient d'efficacité est proposé en fonction de la déjection et de la date d'apport.

- Apporter régulièrement des déjections au sol augmente la fourniture d'azote totale de celui-ci. MesP@rcelles s'adapte-t-il à toutes les situations rencontrées ?

F. S. - MesP@rcelles prend en compte les différentes déjections utilisées en Bretagne et propose un arrière effet qui tient compte de la quantité utilisée, du type de déjection et la fréquence d'apport. ▴