

## Gestion de la fertilisation azotée en agriculture : enjeux environnementaux et perspectives agronomiques au niveau du territoire français

Jean-Claude Germon

Inra  
UMR Agroécologie  
17 Rue Sully  
21065 Dijon  
France  
<jc.germon@dijon.inra.fr>

### Résumé

La biodisponibilité de l'azote demeure l'un des principaux facteurs de régulation de la production végétale par l'agriculture. Au cours des 30 dernières années l'usage des fertilisants azotés s'est stabilisé au niveau du territoire français tandis que les principales productions végétales ont fortement progressé, indiquant une meilleure valorisation de ces fertilisants. Cependant, au cours de cette même période la contamination des eaux par les produits azotés s'est fortement accentuée. Malgré la mise en évidence d'indices d'une stabilisation voire de signes d'amélioration de la pollution azotée des eaux au cours de la dernière décennie, celle-ci demeure fortement préoccupante. Une limitation des apports d'azote aux seuls besoins de la végétation semble un mode de raisonnement susceptible d'endiguer ces pollutions. L'application généralisée de la méthode du bilan d'azote minéral comme outil de prévision de la fertilisation azotée nécessite encore des calages en fonction des contextes locaux. En parallèle à cette généralisation il apparaît nécessaire de poursuivre la recherche de méthodes de production permettant la réduction des pertes d'azote à partir des écosystèmes agricoles.

**Mots clés :** azote ; environnement ; fertilisation ; gestion.

**Thèmes :** productions végétales ; ressources naturelles et environnement ; sols.

### Abstract

**Nitrogen fertilization management in agriculture: Environmental issues and agronomical prospects for the French territory**

Nitrogen bioavailability remains one of the main factors regulating plant production in agriculture. During the last 30 years the use of nitrogen fertilizers has stabilized in France in parallel with a substantial increase in the production of the main plants, indicating better efficiency of these fertilizers. However, during this same period water contamination by nitrogenous compounds has risen sharply. Despite the identification of signs of stabilization or improvement over the last decade, water pollution by nitrates remains highly worrisome. Limiting nitrogen inputs to the sole needs of vegetation seems a mode of reasoning capable of containing this pollution. Applying the mineral nitrogen balance-sheet method as a general tool for predicting nitrogen fertilization requires further calibrations according to local contexts. In parallel to its generalized application it is necessary to continue research on production methods allowing a reduction of nitrogen losses from agricultural ecosystems.

**Key words:** environment; fertilization; management; nitrogen.

**Subjects:** natural resources and environment; soils; vegetal productions.

**Tirés à part :** J.-C. Germon

doi: 10.1684/agr.2013.0638

Pour citer cet article : Germon JC, 2013. Gestion de la fertilisation azotée en agriculture : enjeux environnementaux et perspectives agronomiques au niveau du territoire français. *Cah Agric* 22 : 241-8. doi : 10.1684/agr.2013.0638

La gestion de l'azote demeure l'un des points « chauds » de la conception des systèmes de culture, tant pour ses répercussions agronomiques que pour ses incidences environnementales. La biodisponibilité de l'azote demeure l'un des principaux facteurs - et souvent le premier facteur - de régulation de la production de biomasse végétale après la disponibilité en eau ; la production de biomasse alimentaire dépend étroitement de la capacité des agriculteurs à assurer aux cultures la fourniture d'azote assimilable correspondant aux besoins de la végétation. Parallèlement l'intensification de l'agriculture et l'accroissement des fournitures d'azote ont été accompagnés d'importantes nuisances environnementales. Les contaminations des aquifères souterrains et de surface par les pertes en azote nitrique ou ammoniacal depuis l'horizon de surface du sol demeurent une préoccupation sanitaire et environnementale forte sur une large partie de notre territoire comme le montrent les suivis répétés de la qualité des eaux (Davezac *et al.*, 2008). Les émissions de produits azotés gazeux contribuent à différentes formes de pollutions atmosphériques : retombées d'ammoniac et de sels ammoniacaux sous formes

sèches ou humides, implication du protoxyde d'azote dans l'effet de serre et la destruction de la couche d'ozone stratosphérique, contribution des oxydes nitriques aux pluies acides, à la pollution photochimique et la production d'ozone troposphérique.

Le rapport Hénin a permis dans les années 1980 une évaluation de l'état global du cycle de l'azote au niveau du territoire français métropolitain et a soulevé différentes questions sur son fonctionnement. Faisant une estimation des entrées annuelles d'azote mobilisable pour la biomasse végétale, il posait alors la question de l'équilibre global du cycle de cet élément et de l'intensité des pertes par émissions gazeuses, qui paraissent alors nécessaires pour équilibrer ces entrées et pour ne pas conduire à une accumulation dans le sol ou les aquifères. Force est de constater 30 ans plus tard que cette question centrale demeure d'actualité à différentes échelles, de la parcelle agricole à des territoires plus larges. Au niveau du territoire français, une analyse régionale (Snoubra, 2012) souligne le caractère déséquilibré du cycle de l'azote, avec un surplus moyen de cet élément par rapport aux besoins de la végétation de 36 kg N par hectare de surface agricole utile (SAU) et une

variabilité dans un rapport de 1 à 3 en fonction des régions. À l'échelle planétaire, les bilans de Schlessinger (2009) traduisent la difficulté d'équilibrer les apports d'azote utilisable dans la biosphère et la somme des flux de produits azotés dans les différents compartiments où ces apports se répartissent (tableau 1).

Les nuisances environnementales induites par l'augmentation de concentration des produits azotés, notamment des nitrates, dans les eaux de surface ou profondes ont été à l'origine de mesures mises en place par les pouvoirs publics en France pour limiter leurs apports à partir des années 1990 : directive nitrates (CEE 91/676, 1991) ; mise en place de programmes d'action départementaux à partir de 1996, avec des mesures réglementaires complétées par des arrêtés gouvernementaux (mars 2001 et août 2005) ; directive-cadre sur l'eau (DCE) d'octobre 2000 (UE 2000/60). Les préoccupations et les conflits engendrés par les teneurs en azote des eaux de surface ont été à l'origine d'une mise en demeure de la France par la Commission européenne (novembre 2009) concernant la cohérence territoriale de ses programmes d'action mis en œuvre et le contenu de certaines mesures jugées

**Tableau 1. Bilan annuel des apports et du devenir des produits azotés réactifs dans la biosphère (10<sup>6</sup>t N/an) (d'après Schlessinger [2009]).**

Table 1. Annual balance of inputs and fate of nitrogen reactive products in the biosphere (10<sup>6</sup> t N/year) (after Schlessinger [2009]).

	Flux de la période préindustrielle	Flux induits par les activités humaines	Flux annuels totaux
<b>Les apports d'azote</b>			
Fixation biologique	120	20	140
Fixation atmosphérique (orages)	5	0	5
Fixation industrielle (fertilisants)	0	125	125
Combustions de carburants fossiles	0	25	25
<b>Totalité des apports</b>	<b>125</b>	<b>170</b>	<b>295</b>
<b>Le devenir et les transformations</b>			
Stockage dans la biosphère	0	9	9
Entrainement par les cours d'eau	27	35	62
Lessivage dans les eaux souterraines	0	15	15
Dénitrification	92	17	109
Transfert atmosphérique vers l'océan	6	48	54
<b>Totalité des pertes et des transformations</b>	<b>125</b>	<b>124</b>	<b>249</b>

insuffisantes pour répondre aux objectifs de la directive nitrates. Au regard des enjeux agronomiques et environnementaux et de leur évolution, il nous est apparu utile de donner un éclairage actualisé sur la gestion de la fertilisation azotée à l'échelle de notre territoire.

## Évolution progressive de la fertilisation azotée vers une meilleure utilisation

Au niveau du territoire national, la fertilisation azotée a accompagné l'intensification de la production agricole après la dernière guerre ; l'utilisation de fertilisants azotés de synthèse s'est fortement développée dans les années 1960 et a atteint un maximum de 2,6 millions de tonnes d'azote commercialisées par an dans les années 1990 : elle s'est stabilisée puis a décliné pour revenir au cours des années dernières à son niveau des années 1980 (*figure 1* et *tableau 2*). Parallèlement à cette évolution, la production de céréales a fortement augmenté sur notre territoire au cours des quarante dernières années (*tableau 2* et *figure 2A*), ainsi qu'à un degré moindre, celle des oléagineux (*figure 2B*) ; durant cette même période, les surfaces des cultures de céréales sont demeurées globalement stables tandis que celles des oléagineux se sont sensiblement accrues (*figure 3*). Entre 1980 et 2010, la

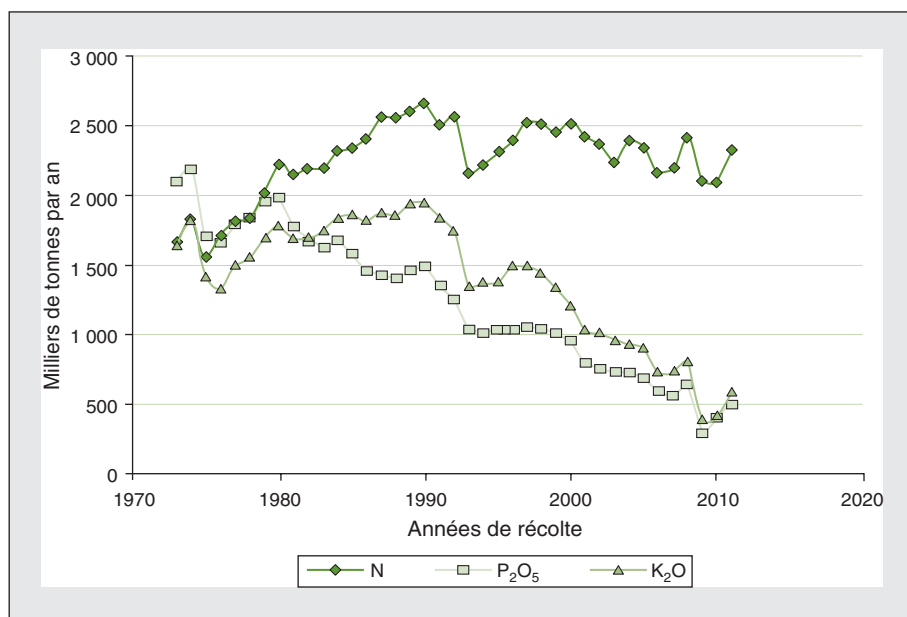


Figure 1. Évolution de la fourniture de fertilisants à l'agriculture en France métropolitaine au cours des 40 dernières années (données UNIFA).

Figure 1. Evolution of fertilizer supply to agriculture in metropolitan France over the past 40 years (UNIFA data).

proportion d'azote des apports de fertilisants exportée par ces deux types de cultures passe de 38,4 à 56,5 % (*tableau 3*) : dans la mesure où ces cultures sont celles qui font le plus fortement appel à la fertilisation azotée et où les exportations par le colza ne rendent compte que d'une faible part de ces exportations globales, l'augmentation de ce ratio, qui ne couvre pas toutes les exportations par la production agricole, traduit cependant une incontestable amélioration de l'efficacité de l'utilisation des ferti-

lisants azotés par ces cultures au cours de cette période.

## De fortes nuisances environnementales et des signes d'amélioration

La contamination par les nitrates des eaux de captage utilisées pour

Tableau 2. Évolution comparée de la fourniture de fertilisants azotés de synthèse à l'agriculture française (données UNIFA) et des principales productions céréalières (données Agreste et FAO) au cours de la période 1980-2010.

Table 2. Comparative evolution in the supply of synthetic nitrogen fertilizers in French agriculture (UNIFA data) and the main French cereal production (Agreste and FAO data) during the period 1980-2010.

Années de production	Fourniture de fertilisants azotés (10 <sup>3</sup> t N/an)		Production de blé (10 <sup>3</sup> t N/an)		Production de blé, orge et maïs (10 <sup>3</sup> t N/an)	
		Comparaison interannuelle (%)		Comparaison interannuelle (%)		Comparaison interannuelle (%)
1979-1984	2 215	100	26 125	100	46 524	100
1986-1991	2 576	116,3	31 193	119,4	53 922	115,9
2006-2011	2 229	100,6	37 377	143,7	63 090	135,6

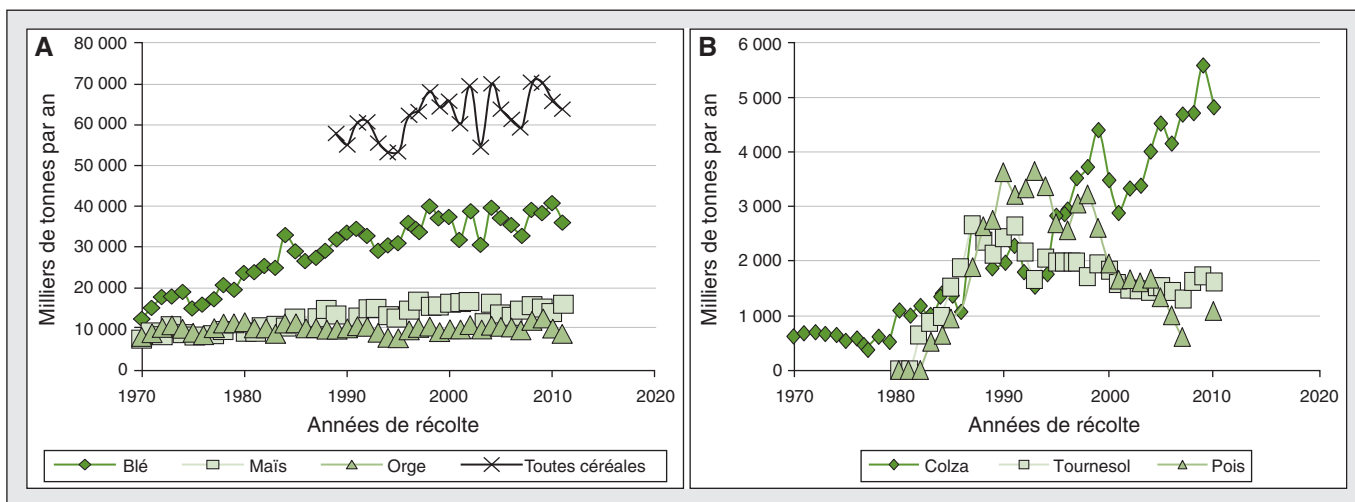


Figure 2. Évolution des productions de céréales (A), d'oléagineux et pois protéagineux (B) sur le territoire français au cours de la période 1970-2010 (données Agreste et FAO).

Figure 2. Evolution of the production of cereals (A), oilseeds and peas (B) on French territory during the period 1970-2010 (Agreste and FAO data).

l'alimentation a été mise en évidence en France dès les années 1970, avec l'observation d'une concentration croissante dans les eaux souterraines en relation avec l'augmentation de l'utilisation des fertilisants azotés (Chrétien *et al.*, 1977). Cette contamination a fait l'objet de nombreux travaux (Mariotti *et al.*, 1977 ; Mary *et al.*, 1996 ; Blum, 2004) ; elle est à l'origine de la directive nitrates (CEE 91/676, 1991) et des différents pro-

grammes d'action mis en œuvre au niveau de l'agriculture, visant à mieux ajuster la fertilisation azotée et à limiter les flux vers les aquifères. Malgré les mesures mises en œuvre, cette pollution nitrique est loin d'être supprimée, même si elle semble marquer le pas depuis une dizaine d'années : la proportion de captages fortement contaminés et présentant une teneur moyenne en nitrates supérieure à 50 mg/L n'augmente pas durant cette

dernière décennie et reste voisine de 15 % des captages échantillonnés, tandis que la proportion de captages présentant une concentration maximale épisodique supérieure à la norme de 50 mg/L tend à diminuer (Synthèses, 2012).

La contamination des eaux de surface par les produits azotés fait l'objet de suivis réguliers du fait de leur rôle dans les phénomènes d'eutrophisation. Une attention particulière est actuellement portée aux flux d'azote issus des territoires bretons vers la mer, qui sont à l'origine de proliférations d'algues sur le littoral en période estivale. Le flux annuel moyen déversé par les rivières bretonnes a été estimé à 25 kg N/ha de bassin-versant pour la période 1988-2007 alors qu'il était de l'ordre de 5 kg N/ha dans les années 1960 (Chevassus-au-Louis *et al.*, 2012). Ce flux, essentiellement sous forme de nitrates et d'origine agricole, traduit le dérèglement du cycle de l'azote dans cette région où l'excédent de la balance azotée a été estimé être de l'ordre de 85 kg N/an/ha de SAU, soit plus de 3 fois le niveau moyen national (Vertès *et al.*, 2009). Les mesures prises depuis une quinzaine d'années pour limiter ces excédents d'azote n'ont pas eu d'effet marqué sur les proliférations algales sur le littoral marin : elles se sont cependant traduites par une diminution sensible de la concentration en nitrates des eaux de rivière, avec un abaissement

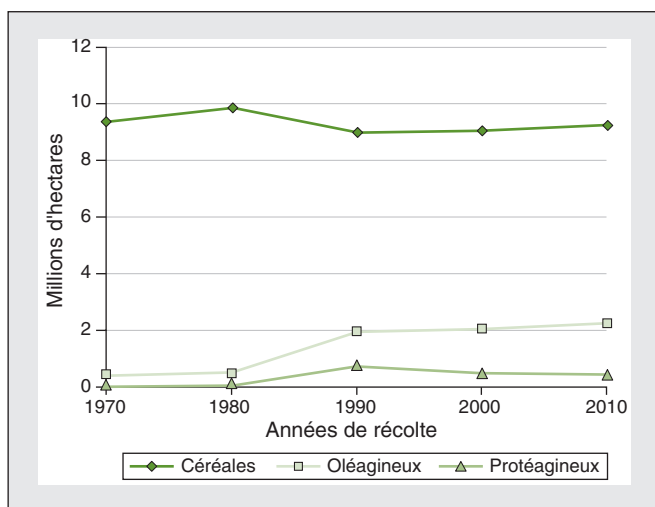


Figure 3. Évolution des surfaces en culture de céréales, oléagineux et protéagineux sur le territoire français au cours de la période 1970-2010 (données Agreste et FAO).

Figure 3. Evolution of areas under cultivation of cereals, oilseeds, and legume crops on French territory during the period 1970-2010 (Agreste and FAO data).

**Tableau 3. Évolution comparée de la fourniture de fertilisants azotés à l'agriculture française (données UNIFA) et des exportations par l'ensemble de la sole de blé, maïs grain, orge, colza et tournesol, au cours de la période 1980-2010 (données de production « Agreste » ; teneurs en azote : blé : 1,9 % ; orge et maïs : 1,5 % ; colza : 3,5 % ; tournesol : 1,9 %).**

Table 3. Comparative evolution of the supply of nitrogen fertilizer to French agriculture (UNIFA data) and exports from the entire surface of wheat, maize, barley, rapeseed, and sunflower, during the period 1980-2010 (production data from "Agreste" ; nitrogen contents: wheat 1.9%; barley and maize: 1.5%; rapeseed 3.5%; sunflower: 1.9%).

Années de production	Fourniture de fertilisants azotés (10 <sup>3</sup> t N/an)	Exportations azotées en grandes cultures (10 <sup>3</sup> t N/an)	Ratio azote exporté par les cultures /azote apporté par les fertilisants
1979-1984	2 215	851	0,384
1986-1991	2 576	1 058	0,411
2006-2011	2 229	1 258	0,565

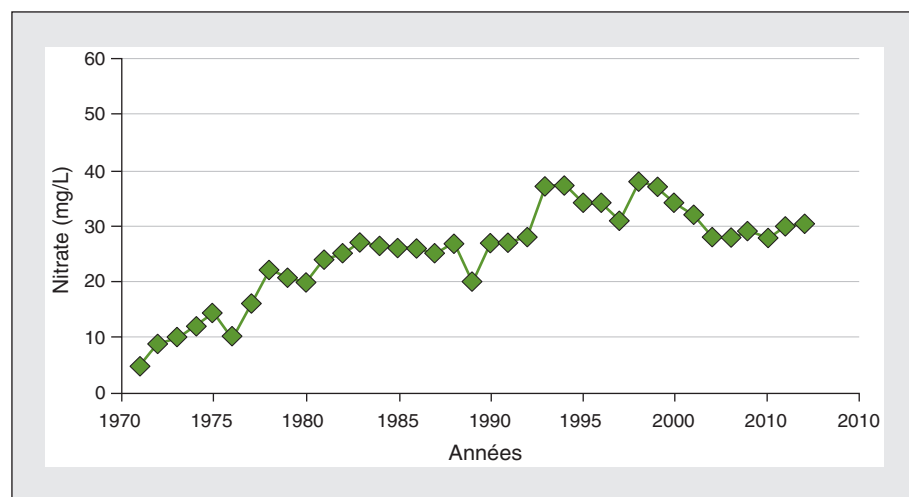
du Q90<sup>1</sup> de l'ordre de 0,5 mg/L/an (figure 4). Au niveau de l'ensemble du territoire national, les suivis de la concentration en azote des rivières indiquent une stabilité de la distribution des concentrations moyennes en nitrates, et une légère amélioration de la distribution des concentrations maximales (Synthèses, 2012). Malgré ces signes d'évolution favorable la situation générale demeure fortement préoccupante.

avec l'objectif d'atteindre un optimum économique. Ces méthodes ont évolué à partir des années 1980 à la suite de la mise en évidence des pertes d'azote et de leurs conséquences environnementales, en cherchant à satisfaire les besoins de la végétation tout en évitant ces entraînements vers les aquifères. La méthode du bilan prévisionnel de l'azote minéral proposée par Hébert (1969) puis Rémy

et Hébert (1977) est considérée comme la méthode de référence en France : elle s'inscrit dans la panoplie des méthodes d'évaluation de la fertilisation azotée qui se sont largement développées en agronomie (Greenwood, 1986). Cette méthode repose sur l'estimation des besoins de la végétation en fonction d'un objectif de rendement réalisable, et sur l'évaluation des différents postes de fourniture d'azote par le sol ou par les apports organiques exogènes, permettant d'ajuster les apports par la fertilisation minérale à ces besoins. Sa formulation a été progressivement étoffée pour prendre en compte les différents mécanismes qui entrent en jeu dans la fourniture d'azote du sol et a débouché sur des outils mis à disposition des professionnels pour évaluer les besoins de fertilisation azotée à l'échelle de la parcelle (Machet *et al.*, 2007). Elle est actuellement à la base des préconisations diffusées en France dans le cadre des programmes d'action destinés à assurer la protection des eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole. Le bien-fondé de cette méthode qui permet de raisonner la fertilisation azotée en fonction de la dynamique des besoins d'azote des plantes et de l'estimation des fournitures pour les satisfaire apparaît incontestable ; cependant, sa mise en application se heurte à plusieurs

## Prévision de la fertilisation par le bilan prévisionnel : des ajustements nécessaires

La réponse des cultures, et plus particulièrement des céréales, à la fertilisation azotée a conduit les agronomes à proposer des méthodes d'estimation des apports de fertilisants qui visaient dans un premier temps à augmenter la production des cultures



**Figure 4.** Évolution des teneurs moyennes en nitrates des eaux superficielles bretonnes de 1971 à 2007 (d'après Agence de l'eau Loire-Bretagne [cité par Chevassus-au-Louis *et al.*, 2012]).

**Figure 4.** Trends in mean concentrations of nitrates in surface waters of Brittany from 1971 to 2007 (from Water Agency Loire-Bretagne, [cited by Chevassus-au-Louis *et al.*, 2012]).

<sup>1</sup> Q90 : valeur limite de concentration en dessous de laquelle se situent 90 % des concentrations observées.

difficultés qui conduisent à des discussions sur les prescriptions qui en découlent.

La première est celle de l'évaluation de l'objectif de rendement de la culture qui doit être déterminé à la parcelle : la marge bénéficiaire des agriculteurs dépend fortement du rendement atteint à la récolte et, dans la pratique, ces derniers sont peu enclins à prendre le risque de limiter l'expression du potentiel de la culture par une insuffisance de disponibilité en azote. Afin de demeurer dans un domaine de valeurs en accord avec les potentialités du milieu, cet objectif est estimé par la valeur médiane tirée des observations de rendements des 5 années antérieures lorsqu'on dispose de références locales ; lorsqu'au niveau d'une exploitation cette référence locale n'existe pas, l'évaluation doit être faite à partir de situations jugées comparables. La valeur retenue pour une parcelle donnée peut être considérée par l'agriculteur comme inférieure aux potentialités de sa culture en conditions agronomiques favorables. Mais parallèlement, on admet aussi implicitement que la dose de fertilisant évaluée à partir de cet objectif de rendement peut correspondre à un dépassement des besoins dans 50 % des situations et à un risque de pertes non négligeable. On verra cependant que par un raisonnement agronomique adapté et l'utilisation d'outils permettant de suivre les besoins de la plante, ce risque peut être limité dans les faits (Jeuffroy *et al.*, 2013) sans être complètement éliminé.

Le second poste qui prête à discussion est l'évaluation de la fourniture d'azote à partir du stock organique du sol. Cette quantité d'azote minéralisé est le produit du stock d'azote organique humifié multiplié par un coefficient de minéralisation et par la durée de la minéralisation, pondérée par deux fonctions expérimentales sans dimension, prenant en compte l'effet de la température et de l'humidité du sol. Cette fourniture peut être estimée par l'équation suivante :

$$Mh = TNorg \times Km \times J \times Ft \times Fh$$

avec :

Mh = quantité d'azote minéralisé sur une période de durée J (kg N/ha) ;

TNorg = stock d'azote organique humifié de la couche de sol minéralisante (t N/ha) ;

Km = coefficient de minéralisation de l'azote organique humifié en conditions de température et d'humidité normalisées (kg N minéral/t N organique/jour) ;

J = durée de la période de minéralisation prise en compte (jours) ;

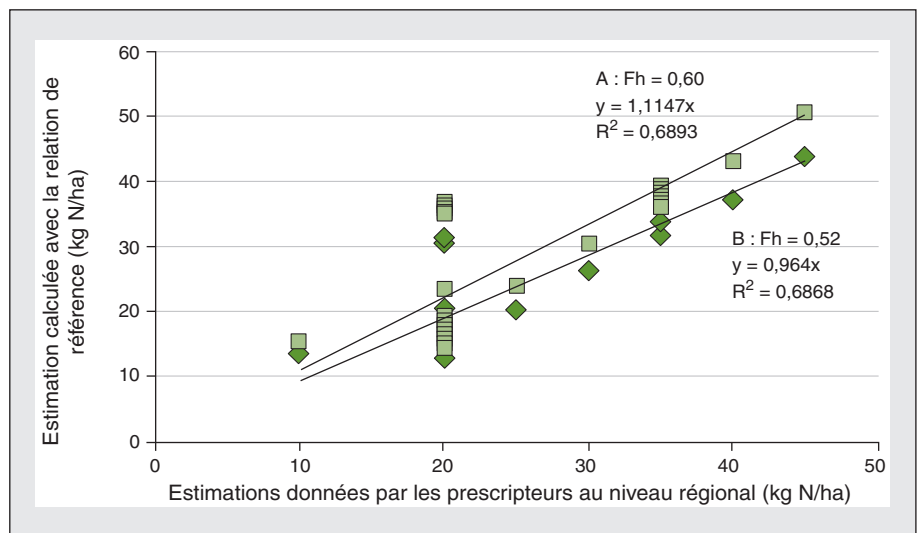
Ft = fonction correctrice de l'effet de la température sur la durée de minéralisation ;

Fh = fonction correctrice de l'effet de l'humidité du sol sur la durée de minéralisation.

Le coefficient de minéralisation Km est tiré d'une équation reposant sur un large ensemble d'observations expérimentales qui permet de relier sa valeur à la teneur du sol en argile et en calcaire (Mary et Guéris, 1994 ; COMIFER, 2011). En ce qui concerne les fonctions correctrices des effets de la température et de l'humidité du sol, en l'absence de mesures continues de ces paramètres, le mode de calcul utilise des valeurs moyennes de ces paramètres à l'échelle de territoires plus ou moins larges, conduisant à une quantité moyenne d'azote minéralisé retenue pour un territoire donné. Les

estimations obtenues présentent une grande sensibilité aux valeurs données à ces deux fonctions, comme l'illustre pour l'humidité, la *figure 5*. Une sous-estimation de la minéralisation, conduit alors à augmenter la prescription de la dose de fertilisant à apporter et à accentuer ainsi les risques de pertes. Cette grande sensibilité de l'estimation de la fourniture d'azote minéral par le sol aux effets de la température et de l'humidité du sol démontre ainsi la nécessité de disposer de références locales permettant d'étalonner les modes de calcul, et souligne les précautions à prendre pour transposer un modèle d'évaluation établi dans un contexte local à un contexte différent.

Une troisième source de discussion dans la définition des apports de fertilisants à l'échelle de notre territoire repose sur la perception par les professionnels de l'efficacité des différentes formes de fertilisants utilisés. La mise en évidence sur un ensemble de résultats expérimentaux *in situ* d'une moindre efficacité de la fertilisation sous forme de solution urée-ammonitrate comparée à la fertilisation sous forme de granulés d'ammonitrate (Le Souder *et al.*, 1997) a conduit les



**Figure 5.** Comparaison des valeurs de minéralisation de l'azote retenues pour l'évaluation de la fertilisation dans différents types de sol (Gren, 2012) et des valeurs estimées à partir du mode de calcul de la méthodologie de référence avec deux valeurs différentes de la fonction humidité : A (Fh = 0,60 : valeur tirée de situations expérimentales de Germon *et al.*, [1985], et Hénault *et al.*, [2005]) ; B (Fh = 0,52 : valeur moyenne retenue à l'échelle régionale).

**Figure 5.** Comparison of nitrogen mineralization values used for evaluation of fertilization in different soil types (Gren, 2012) and estimated from the calculation with the reference methodology using two different values depending on the response factor to soil water content : A (Fh = 0.6 : value derived from experimental situations from Germon *et al.*, [1985], and Hénault *et al.*, [2005]); B (Fh = 0.52 : average value used at the regional level).

prescripteurs à préconiser une majoration de 10 à 15 % de la fertilisation calculée par la méthode du bilan prévisionnel et appliquée sous forme de solution (COMIFER, 2011). Cette majoration est présentée comme la nécessaire prise en compte d'une augmentation des pertes gazeuses par volatilisation d'ammoniac lors de l'épandage de la solution azotée. Une telle préconisation, défendue par les prescripteurs, nécessite pour le moins d'en évaluer les répercussions environnementales et d'analyser les causes de cette moindre efficacité, qui ne semble pas systématique, de façon à définir des conditions d'épandage permettant de l'éviter.

Une autre source de discussion pourrait porter sur la prise en compte effective des apports atmosphériques d'azote et des pertes gazeuses. Par soucis de simplification de la méthode du bilan prévisionnel on a considéré implicitement que ces deux postes du bilan azoté sont de même ordre de grandeur et s'équilibrent globalement. En zone éloignée de centres d'émission par les activités agricoles ou industrielles les apports atmosphériques sont de l'ordre de la dizaine de kg N/ha/an (Hénin, 1980 ; ECETOC, 1994) tandis que les pertes par dénitrification sont effectivement de ce même ordre de grandeur en sols correctement drainés (Barton *et al.*, 1999 ; Hénault et Germon, 2000). Cependant ces valeurs peuvent être sensiblement plus élevées dans des situations particulières : en zones d'élevage intensif, les importantes émissions d'ammoniac induisent des retombées atmosphériques de plusieurs dizaines de kg/ha/an (Cellier *et al.*, 1997) ; de même, la dénitrification peut être nettement accrue par le niveau d'humidité du sol, soit lors d'irrigations, soit en sols naturellement hydromorphes (Barton *et al.*, 1999).

## Conclusion

Ces quelques considérations montrent à la fois les enjeux des discussions actuelles sur la gestion de la fertilisation azotée au niveau du territoire français, et l'intérêt de faire un point sur cette gestion. Cette dernière s'est incontestablement améliorée au cours des 20 dernières années ; une impor-

tante augmentation de la production végétale a été réalisée sans augmentation de la fertilisation azotée de synthèse, traduisant un meilleur ajustement des apports d'azote aux besoins. Cette amélioration de la gestion n'est pas parvenue à réduire autant qu'on l'espérait les pollutions azotées, tant en régions d'élevage intensif où la concentration du cheptel et les pratiques de fertilisation conduisent à des excédents structurels qu'il demeure impératif de réduire, que dans les zones de « grandes cultures » où les signes d'amélioration de la qualité des eaux demandent à être amplifiés de façon soutenue.

Dans ce contexte, la démarche d'ajustement des apports d'azote aux besoins de la végétation à travers la méthode du bilan prévisionnel demeure une excellente approche pédagogique pour les professionnels, comme l'ont déjà souligné Meynard *et al.* (1997) ; cette méthode, complétée par une démarche permettant de mieux prendre en compte l'état d'alimentation de la plante (Machet *et al.*, 2007) a permis de développer des outils opérationnels qui sont à la base des améliorations constatées. Il importe cependant de rappeler et d'insister sur l'étroitesse de la marge de manœuvre des prescripteurs : dans un contexte agronomique où les transferts d'eau du sol vers les nappes sont de l'ordre de 200 mm/an les transferts d'azote au-delà de la zone d'exploration racinaire ne devraient pas dépasser 20 kg N/ha/an pour que la concentration de l'eau qui s'infiltré demeure en deçà de la norme de potabilité. La réduction des incertitudes sur l'évaluation des fournitures d'azote à partir du sol et par voie de conséquence sur les apports nécessaires pour les compléter est un enjeu majeur pour inciter les professionnels à ajuster leurs prescriptions de façon plus précise et éviter un dépassement des apports au-delà de cette marge. L'application généralisée de cette méthode dans le cadre de la mise en place d'un programme d'action national s'appuyant sur des programmes régionaux nécessite notamment des calages et des vérifications en fonction des contextes locaux pour une meilleure prise en compte de la variabilité des différents postes de fourniture retenus dans ces bilans.

Par ailleurs, cette généralisation d'une méthode de référence ne doit pas

empêcher la poursuite de travaux sur le fonctionnement et l'évaluation des transformations mal prises en compte dans ces bilans, ni la recherche de la mise en œuvre de pratiques agronomiques susceptibles de modifier les équilibres entre les composantes du bilan azoté : dans un contexte de recherche de modes de production agronomiquement efficaces, plus sobres en énergie et respectueux de l'environnement, il importe de s'interroger sur la faible place faite aux cultures de légumineuses et à la fixation biologique de l'azote dans nos systèmes de production.

Cet article introductif en annonce trois autres qui se situent dans la perspective d'une meilleure intégration des connaissances des flux d'azote à différentes échelles pour mieux évaluer les incidences environnementales de la gestion agronomique actuelle et tentent de dégager des voies d'approche renouvelées pour les réduire.

Billen *et al.* (2013) visent à établir un bilan global des transformations de l'azote à l'échelle du bassin de la Seine et à dégager des conclusions tirées de leur extrapolation au Nord de la France. Ils concluent notamment que l'on ne peut espérer régler les problèmes aigus de pollution azotée sans une remise en cause du modèle actuel d'exploitation agricole séparant productions végétales et élevage. Ils incitent ainsi les agronomes à repenser le rétablissement de structures fonctionnelles associant plus étroitement les deux types de production.

Cellier *et al.* (2013) traitent de l'évaluation actuelle des émissions azotées gazeuses à différentes échelles de territoire et soulignent la nécessité de les prendre en compte dans l'établissement des bilans azotés. Ils font la part des principales sources d'émissions distinguant principalement l'ammoniac et le protoxyde d'azote, soulignant le rôle spécifique de l'élevage dans les émissions d'ammoniac, les liens entre les sources d'émission et les retombées atmosphériques ; ils rappellent les méthodes d'évaluation de ces flux, généralement fugaces, et les incertitudes qui les accompagnent.

Jeuffroy *et al.* (2013) proposent de repenser les approches agronomiques actuelles de gestion de l'azote avec deux idées fortes ; d'une part, en demeurant dans le cadre de la gestion

par une approche de bilan azoté, ils proposent de mieux intégrer le fonctionnement de la plante et de tirer profit de ses capacités à surmonter un stress dû à un déficit azoté passager, limitant ainsi les risques de surfertilisation en réduisant les apports les moins bien valorisés ; d'autre part, en repensant les systèmes de production végétale, Jeuffroy *et al.* soulignent la possibilité de renforcer l'intégration des légumineuses, dont on sait l'effet bénéfique sur l'effet de serre, en jouant notamment sur les associations culturales. ■

## Remerciements

Cet article a été le support de la communication introductive de la séance de l'Académie d'agriculture de France, le 16 novembre 2011, intitulée « *Gestion de l'azote en agriculture : enjeux environnementaux et perspectives agronomiques* ». L'auteur remercie Claude Gleizes, président honoraire de l'Académie d'agriculture de France, et François Papy, membre de cette même Académie, pour la relecture critique de ce document.

## Références

- Barton L, McLay CDA, Schipper LA, Smith CT, 1999. Annual denitrification rates in agricultural and forest soils : a review. *Australian Journal of Soil Research* 37 : 1073-93.
- Billen G, Garnier J, Benoit M, Anglade J, 2013. La cascade de l'azote dans les territoires de grande culture du Nord de la France. *Cahiers Agricultures* 22 : 272-81. doi : 10.1684/agr.2013.0640
- Blum A, 2004. L'état des eaux souterraines en France. Aspects quantitatifs et qualitatifs. Etudes et travaux, 43. Orléans : IFEN. [http://sigessn.brgm.fr/IMG/pdf/ifen\\_etat\\_eau\\_souterraine.pdf](http://sigessn.brgm.fr/IMG/pdf/ifen_etat_eau_souterraine.pdf)
- CEE 91/676, 1991. Directive concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles. *Journal Officiel des Communautés Européennes*, L 375.
- Cellier P, Rochette P, Hénault C, Générumont S, Laville P, Loubet B, 2013. Les émissions gazeuses dans le cycle de l'azote à différentes échelles du territoire : une revue. *Cahiers Agricultures* 22 : 258-71. doi : 10.1684/agr.2013.0641
- Cellier P, Germon JC, Hénault C, Générumont S, 1997. Les émissions d'ammoniac et d'oxydes d'azote par les sols cultivés : mécanismes de production et quantification des flux. In : Lemaire G, Nicolardot B. *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*. Paris : Inra éditions.
- Chevassus-au-Louis B, Andral B, Femenias A, Bouvier M, 2012. *Bilan des connaissances scientifiques sur les causes de prolifération de macroalgues vertes. Application à la situation de la Bretagne et propositions*. Paris : ministère de l'Écologie et ministère de l'Agriculture.
- Chrétien J, Mère C, de Grimal JP, Vigreux C, 1977. Évolution des teneurs en nitrates dans les eaux d'alimentation du département de l'Yonne. In : « *Protection des eaux souterraines captées pour l'alimentation humaine* », BRGM, Orléans, 1-2 mars, 1.
- COMIFER, 2011. *Calcul de la fertilisation azotée: guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales*. Paris : éditions COMIFER.
- Davezac H, Grandguillot G, Robin A, Saout C, 2008. *L'eau potable en France*. Paris : ministère de la Santé.
- ECETOC, 1994. *Ammonia emissions to air in Western Europe*. Technical Report, 62. Brussels : European Center for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals (ECETOC).
- Germon JC, Couton Y, Jacques D, Guiraud G, Catroux G, 1985. *Étude de la dénitrification dans différents sols cultivés ; effets des facteurs pédologiques, climatiques et culturels*. Congrès nitrates dans les eaux. Paris.
- Greenwood DJ, 1986. Prediction of nitrogen fertilizer needs of arable crops. *Advances in Plant Nutrition* 2 : 1-61.
- GREM, 2012. *Rapport technique sur le référentiel de calcul de la dose prévisionnelle d'azote*. Groupe Régional d'Expertise Nitrates Bourgogne. Dijon : Préfecture de Bourgogne.
- Hébert J, 1969. La fumure azotée du blé tendre d'hiver. *Bulletin Technique d'Information* 244 : 755-66.
- Hénault C, Germon JC, 2000. NEMIS, a predictive model of denitrification on the field scale. *European Journal of Soil Science* 51 : 257-70.
- Hénault C, Bizouard F, Laville P, Gabrielle B, Nicoullaud B, Germon JC, Cellier P, 2005. Predicting in situ soil N<sub>2</sub>O emission using NOE algorithm and soil database. *Global Change Biology* 11 : 115-27.
- Hénin S, 1980. *Rapport du Groupe de travail « Activités agricoles et qualité des eaux »*. Paris : ministère de l'Agriculture & ministère de l'Environnement.
- Jeuffroy MH, Gate P, Machet JM, Recous S, 2013. Gestion de l'azote en grandes cultures : les connaissances et outils disponibles permettent-ils de concilier exigences agronomiques et environnementales ? *Cahiers Agricultures* 22 : 249-57. doi : 10.1684/agr.2013.0639
- Le Souder C, Taureau JC, Richard H, Bethaut F, 1997. Formes d'engrais ammonitrate et solution azotée : quelle incidence sur le rendement et la teneur en protéines du blé tendre d'hiver. *Perspectives Agricoles* 221 : 67-74.
- Machet JM, Dubrulle P, Damay N, Duval R, Recous S, Mary B, 2007. *Azofert®: a new decision support tool for fertilizer N advice based on a dynamic version of the predictive balance sheet method*. 16th International Symposium of the International Scientific Centre of Fertilizers, Gand (Belgique), 16-19 septembre 2007.
- Mariotti A, Halima AB, Berger G, 1977. Contribution of isotopic study of nitrogen to knowledge of pollution of underground aquifer by nitrates in agricultural environment (Brie, Beauce, France). *Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique* 18 : 375-83.
- Mary B, Beaudoin N, Benoit M, 1996. Prévention de la pollution nitrique à l'échelle du bassin d'alimentation en eau. In : Lemaire G, Nicolardot B, eds. *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*. Paris : Inra éditions.
- Mary B, Guéris J, 1994. Intérêts et limites des modèles de prévision de l'évolution des matières organiques et de l'azote dans le sol. *Cahiers Agricultures* 3 : 247-57.
- Meynard JM, Justes E, Machet JM, Recous S, 1997. Fertilisation azotée des cultures annuelles de plein champ. In : Lemaire G, Nicolardot B. *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*. Paris : Inra éditions.
- Rémy JC, Hébert J, 1977. Le devenir des engrais azotés dans le sol. *Compte Rendus de l'Académie d'Agriculture de France* 11 : 700-14.
- Schlessinger WH, 2009. On the fate of anthropogenic nitrogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106 : 203-8.
- Snoubra B, 2012. *L'analyse spatiale des pressions agricoles : surplus d'azote et gaz à effet de serre*. Paris : ministère de l'Écologie et du Développement durable.
- Synthèses, 2012. *Directives nitrates : résultats de la surveillance*. Les Synthèses, 5. Paris : ministère de l'Écologie.
- UE 2000/60. Directive du Parlement européen et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. *Journal Officiel des Communautés Européennes*, L 327/1.
- Vertès F, Trévisan D, Gascuel-Odoux C, Dorioz JM, 2009. Developing tools to improve grassland management in two french grassland systems (intensive and extensive), to comply with Water Framework Directive. In : Tunney H, Schulte R, Schmidt O, eds. *Grassland and the water framework directive*. Wexford (Ireland) : Johnstown Castle Environmental Research Center.