

Gestion de l'azote en grandes cultures : les connaissances et outils disponibles permettent-ils de concilier exigences agronomiques et environnementales ?

Marie-Hélène Jeuffroy¹
Philippe Gate²
Jean-Marie Machet³
Sylvie Recous⁴

¹ Inra-AgroParisTech
UMR211 Agronomie
Bâtiment EGER
78850 Thiverval-Grignon
France
<Marie-Helene.Jeuffroy@grignon.inra.fr>

² ARVALIS-Institut-du-végétal
3 rue Joseph et Marie Hackin
75116 Paris
France
<p.gate@arvalisinstitutduvegetal.fr>

³ Inra
UR AgrolImpact
Pôle du Griffon
180 rue Pierre-Gilles de Gennes
02000 BARENTON-BUGNY
France
<Jean-Marie.Machet@laon.inra.fr>

⁴ INRA-URCA
UMR FARE
CREA
2 esplanade Roland-Garros
BP 224
51686 Reims cedex
France
<sylvie.recous@reims.inra.fr>

Résumé

Des enjeux importants pèsent sur la gestion de l'azote dans les systèmes de culture. Des progrès indéniables ont été réalisés dans la compréhension et la quantification de la dynamique des besoins d'une diversité de cultures, des déterminants des processus impliqués dans l'organisation et la minéralisation de l'azote des matières organiques du sol, et de l'origine de la variabilité de l'efficacité d'utilisation d'un engrais apporté. Ces connaissances ont été intégrées dans des outils de raisonnement de la fertilisation azotée, et des outils de pilotage. Ceux-ci visent à raisonner les apports d'azote de manière à subvenir aux besoins de la culture tout au long du cycle en vue de maximiser sa croissance, impliquant de fait des périodes de suralimentation. Des connaissances récentes permettent d'envisager de nouveaux paradigmes du raisonnement de la fertilisation azotée, autour de la notion de carence temporaire utile, visant à maximiser l'efficacité d'utilisation des engrais apportés, et minimisant les pertes environnementales. Enfin, d'autres leviers que la fertilisation azotée peuvent être mobilisés pour gérer l'azote dans les systèmes de culture, et à l'échelle du territoire.

Mots clés : azote ; carence ; cycle de l'azote ; efficacité d'utilisation ; environnement ; gestion.

Thèmes : méthodes et outils ; productions végétales ; ressources naturelles et environnement ; sols.

Abstract

Nitrogen management in arable crops: Can available knowledge and tools reconcile agronomic and environmental needs?

Nitrogen management in cropping systems must face strong challenges. Substantial progress has been made in understanding the dynamics of nitrogen requirements for diverse crops, the determinants of immobilization and mineralization of nitrogen from organic matter in the soil, and the factors explaining the variability in the use efficiency of nitrogen fertilizers. This knowledge has been integrated in decision-making support tools for nitrogen fertilization as well as in monitoring tools. Such tools aim at satisfying crop nitrogen requirements throughout the crop cycle in order to maximise growth but often lead to periods of excess nitrogen nutrition. More recent knowledge on the effects of temporary nitrogen deficiencies make it possible to reflect upon new paradigms for nitrogen fertilization management. They involve the concept of useful nitrogen deficiency based on the objective of maximizing nitrogen efficiency as a fertilizer and thus minimising environmental losses. Finally, other levers than nitrogen fertilization can be mobilized to take the above mentioned challenges in nitrogen management into account and enlarge the question to the landscape scale.

Key words: environment; fertilization; monitoring techniques; nitrogen; nitrogen cycle.

Subjects: natural resources and environment; soils; tools and methods; vegetal productions.

Tirés à part : M.-H. Jeuffroy

doi: 10.1684/agr.2013.0639

Pour citer cet article : 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 ? *Cah Agric* 22 : 249-57. doi : 10.1684/agr.2013.0639

De nombreux enjeux pèsent aujourd'hui sur la gestion de l'azote en agriculture, et en particulier concernant les grandes cultures. D'une part, les questions économiques, souvent au centre des décisions des agriculteurs, ont une influence sur les pratiques de fertilisation azotée : on a assisté, dans les dernières années, à la fois à une envolée des cours des engrais azotés de synthèse (le prix a quasiment triplé entre janvier 2000 et janvier 2009), et à une forte variabilité du prix des produits récoltés (le prix du blé a évolué entre 90 euros/t en 2005 et 180 euros/t en 2011, avec des pointes pouvant aller jusqu'à 250 euros/t). D'autre part, la responsabilité de l'agriculture est maintenant avérée dans les nombreux impacts environnementaux identifiés aujourd'hui (MEA, 2005). Concernant la teneur trop élevée des eaux souterraines en nitrate, l'accroissement des émissions de gaz à effet de serre, corrélées aux pratiques de fertilisation azotée (Snyder *et al.*, 2009), ou la volatilisation ammoniacale des engrais épanchés, le rôle de la fertilisation azotée dans la pollution de l'eau et de l'air est reconnu. Par ailleurs, la fabrication et le transport des engrais azotés de synthèse requièrent de larges quantités d'énergie fossile, venant ainsi grever une ressource qui se raréfie. Enfin, l'agriculture constitue une voie possible et intéressante de valorisation des produits résiduels organiques, à condition de bien raisonner leur gestion.

Pour de nombreuses espèces de grandes cultures, en région tempérée, la couverture des besoins en azote (N) nécessaires pour satisfaire la production maximale permise par le climat requiert un apport d'engrais, car les quantités fournies par le sol ne suffisent pas. Les besoins d'azote par quintal de grains produits varient, pour les principales grandes cultures, de 2,2 kg N/q (orge, maïs) à 6,5 kg N/q (colza). Ce recours à l'engrais est d'ailleurs différent entre les situations pédoclimatiques, en fonction notamment de la profondeur et du type de sol. Les seules espèces pour lesquelles un apport d'engrais azoté n'est pas nécessaire sont les légumineuses (à graines ou fourragères), qui disposent de la capacité de fixer l'azote atmosphérique par fixation symbiotique.

L'ajustement des apports aux besoins de la culture et à la disponibilité du sol fait, depuis la fin des années 1960, l'objet de nombreuses recherches. Celles-ci se sont traduites par la mise au point d'outils de raisonnement de la fertilisation qui concernent soit la dose totale à appliquer, soit le fractionnement de celle-ci, soit le pilotage des apports. Ces outils ont, pour la plupart, d'abord été développés sur blé, puis ont souvent été adaptés à d'autres grandes cultures des zones tempérées. La méthode statique du bilan azoté, élaborée dès le début des années 1970, permet d'estimer la dose totale d'engrais N à apporter à une culture en fonction de la différence entre les besoins de celle-ci (pour atteindre un rendement donné) et la disponibilité de l'azote du sol, estimée à travers différents postes du cycle de l'azote (Rémy et Hébert, 1977). Cette méthode a été déclinée sous différentes formes (logiciel Azofert[®], réglette azote). La difficulté de gestion de la fertilisation consiste alors essentiellement à ajuster le plus précisément possible les apports à la dynamique des besoins de la culture et aux conditions d'utilisation les plus favorables, car toute déviation par rapport à ces principes conduit inévitablement à des pertes d'azote vers l'environnement. Or, la prévision de la dynamique des besoins de la culture et de l'offre du sol dépend de facteurs inconnus au moment de la prévision, notamment du climat pendant l'ensemble du cycle de la culture, mais également de processus biologiques dont la variabilité peut être très importante. Étant donné les quantités d'azote mises en jeu, l'ajustement de la fertilisation azotée doit être précis à 10 % près pour éviter les pertes vers l'environnement ! Dès lors, il apparaît difficile de prévoir aussi précisément les processus biologiques, c'est pourquoi les acteurs de la filière se sont plutôt attachés à travailler sur des outils, faciles d'usage, de suivi de l'état de la culture et du sol, afin de pouvoir ajuster, en cours de culture, l'offre aux besoins, en tenant compte du suivi de l'état de la culture ou du sol. Ainsi plusieurs outils de pilotage (méthode Jubil[®], méthode HNT[®], méthode de la 'bande double densité', Farmstar[®], Héliotest, etc.) ont été mis au point pour identifier plus précisément les dates optimales de fertilisation,

compte tenu de la dynamique des besoins de la culture, ainsi que la dose du dernier apport, corrigeant ainsi l'incertitude liée à l'estimation des postes du bilan et à la croissance plus ou moins forte du peuplement selon le climat de l'année. Tous ces outils reposent sur l'hypothèse d'un fonctionnement optimal du couvert végétal (sans facteur limitant autre que l'azote), et d'un objectif de rendement que l'on espère atteindre. Pourtant, il est clair aujourd'hui que ces outils de pilotage ne permettent pas de relever les défis majeurs de l'avenir (satisfaire un rendement élevé, une qualité requise par les usages et la minimisation des pertes vers l'environnement) et il apparaît nécessaire de changer de paradigme pour renouveler les modes de raisonnement de la fertilisation. Des connaissances récentes peuvent efficacement nous y aider.

Des connaissances nouvelles dans la compréhension des processus liés au cycle de l'azote

Trois grands domaines de connaissances, ayant une forte influence sur le calcul des doses à apporter, ont été explorés dans les travaux de recherche des vingt dernières années : la fourniture d'azote par le sol, en quantité totale et en dynamique, la cinétique de besoin des cultures, et les déterminants de l'utilisation de l'engrais azoté apporté par les cultures.

La fourniture d'azote au niveau du sol

Depuis les premiers travaux sur la méthode du bilan azoté, qui constituait un réel progrès à l'époque pour tenter d'ajuster la fertilisation azotée à la demande de la culture en tenant compte de l'offre du sol, les outils de raisonnement se sont multipliés. L'amélioration de la connaissance des processus a permis d'affiner la méthode du bilan et de la rendre plus précise (Comifer, 2011).

De nombreuses avancées ont notamment été réalisées dans les connaissances concernant les deux processus élémentaires opposés qui déterminent la minéralisation nette : l'organisation brute et la minéralisation brute de l'azote. Ces processus constituent, avec la nitrification, le « cycle interne de l'azote » dans le sol. La minéralisation brute reflète la libération d'azote minéral à partir de la dégradation des sources organiques (principalement l'humus du sol) alors que l'organisation brute reflète les besoins en azote des décomposeurs pour dégrader les matières organiques fraîches riches en carbone dégradable (résidus de récolte, litières racinaires, produits résiduels). Ainsi des situations peuvent être proches du point de vue de leur minéralisation nette d'azote, mais correspondre à des bilans de flux bruts très différents (Recous *et al.*, 1999).

Les travaux visant à prévoir la décomposition des résidus végétaux, en fonction de leur composition et de leur quantité, ont permis de montrer que la dynamique de minéralisation de l'azote, associée à leur décomposition, est fortement déterminée par la qualité des organes concernés (Trinsoutrot *et al.*, 2000 ; Nicolardot *et al.*, 2001 ; Bertrand *et al.*, 2006) qui peut être, pour les résidus de récolte, approchée par leur rapport carbone/azote. Ces connaissances permettent de proposer des équations de simulation de la quantité d'azote minéral issu de ces résidus, d'ores et déjà incorporées dans les outils de raisonnement de la fertilisation azotée (Azofert[®] notamment). Ces mêmes formalismes s'appliquent aux résidus de la culture précédente, mais également aux cultures intermédiaires mises en place puis enfouies dans le sol, et aux produits résiduels organiques.

La minéralisation de l'azote organique a longtemps été simulée à travers l'équation dite du K2 (Hénin et Dupuis, 1945). Une caractérisation dynamique de cette fonction a pu être obtenue grâce à la notion de temps normalisé, prenant en compte les variations de température et d'humidité du sol (Andren et Paustian, 1987). Ce formalisme permet notamment de standardiser les références acquises dans des contextes très variés, et de tenir compte des conditions environnementales dans la dynamique de fourniture d'azote par le milieu. Une

équation unique a été proposée et peut être utilisée, aussi bien au laboratoire que dans n'importe quelle parcelle agricole (Recous *et al.*, 1999). Des travaux récents ont montré qu'on pouvait améliorer significativement la qualité prédictive des modèles de minéralisation en utilisant un modèle statistique (Valé *et al.*, 2007).

La compréhension des processus déterminants des pertes gazeuses (Hénault *et al.*, 2005) a été améliorée et est d'ores et déjà valorisée dans les outils de raisonnement de la fertilisation. Les dernières améliorations concernant la méthode du bilan (à travers le logiciel AzoFert[®]) permettent notamment de tenir compte de la volatilisation d'ammoniac et de la dénitrification, à l'origine d'émissions de N₂O, dans le calcul de la dose totale à appliquer.

La dynamique de nutrition azotée des cultures

Les besoins en azote d'une culture sont, pour la plupart des grandes cultures, estimés en fonction de l'objectif de production visé. Ainsi, par exemple chez le blé, le besoin unitaire a été estimé à 3 kg d'azote par quintal de grains produits. Ce formalisme ne permet pas totalement de tenir compte de la variabilité de la production, liée aux conditions de culture. Des modèles de culture ont alors été développés dans le but de caractériser la dynamique de croissance et d'absorption d'azote d'une culture, afin d'estimer celle des besoins et ainsi de mieux prévoir la stratégie de fertilisation azotée souhaitable. Fondés pour la plupart sur le formalisme de Monteith (1972), ces modèles permettent de simuler la dynamique de production de biomasse d'une culture en fonction de son cycle phénologique et du rayonnement photosynthétiquement actif disponible. À partir des fonctions d'interception du rayonnement par les surfaces vertes de la culture, et de conversion de ce rayonnement en biomasse, la croissance de la culture peut être simulée, en fonction du climat. À ces fonctions « potentielles » peuvent s'ajouter des freins, liés à un stress hydrique ou à une carence azotée, à une maladie ou à un ravageur (plus rarement présents dans

les modèles), qui viennent perturber la croissance.

Depuis les travaux de Lemaire et Salette (1984), la notion de courbe de dilution a été largement utilisée. Cette notion traduit la baisse de teneur en N de la culture au fur et à mesure de sa croissance aérienne. Les travaux de Justes *et al.* (1994), appliquant cette notion au blé, ont montré qu'il existait une teneur en azote critique, c'est-à-dire une valeur minimale de pourcentage d'azote, pour une biomasse donnée, permettant d'assurer la croissance maximale de la culture : si la teneur en azote de la culture est inférieure à cette teneur critique, alors la croissance ultérieure de la culture est réduite. La stabilité de cette courbe critique, pour une large gamme de sols, de variétés et de climats, a été démontrée et permet d'utiliser cette référence pour estimer les besoins en azote de la culture, en fonction de sa dynamique de croissance. À partir de cette notion, le concept d'indice de nutrition azotée a été développé pour caractériser l'état de nutrition d'une culture, et notamment l'existence d'une carence en cet élément. D'abord utilisé sur les graminées fourragères pour optimiser la production de matière sèche végétative, cet indicateur a été décliné pour les espèces à grains afin d'optimiser le rendement : les outils de raisonnement de la fertilisation azotée disponibles aujourd'hui visent à maintenir cet indice au-dessus de 1 tout au long du cycle, pour éviter toute carence, préjudiciable à la croissance, et donc *a priori* au rendement.

Enfin, les progrès dans les connaissances sur la relation entre nutrition azotée et élaboration de la qualité des grains (teneur en protéines ou en huile en particulier) permettent de tenir compte de cette caractéristique pour raisonner la fertilisation azotée. Ainsi, la teneur en protéines est le résultat de l'accumulation relative entre N et C dans les grains, ces deux processus étant déterminés par le ratio entre offre et demande pour chaque type d'assimilats, mais également par les conditions climatiques qui vont jouer sur leur dynamique de disponibilité. Chez le blé par exemple, la quantité d'azote qui s'accumule dans les grains est principalement déterminée par la remobilisation vers ces derniers de l'azote accumulé dans les parties végétatives avant floraison, avec une

faible variabilité génétique sur ce caractère (Barbottin *et al.*, 2005). En revanche, l'amidon qui s'accumule dans les grains provient plus largement de la photosynthèse post-floraison. Mais cette dernière est directement affectée par le processus de sénescence des organes foliaires, qui dépend étroitement de la remobilisation d'azote vers les grains. Il y a donc une interaction très étroite entre nutrition carbonée et azotée pendant cette phase du cycle, que l'on retrouve chez de nombreuses autres espèces (colza, pois, tournesol, blé dur). Ces éléments sont aujourd'hui pris en compte dans les conseils de fertilisation : ainsi, pour obtenir une qualité satisfaisante pour les grains d'orge destinés à la brasserie, il est recommandé de réduire l'apport d'azote d'une trentaine d'unités par rapport à la dose calculée par la méthode du bilan. Au contraire, pour satisfaire les exigences des meuniers en termes de qualité des grains de blé ou des pastiers concernant la qualité du blé dur, il est recommandé de réaliser un troisième apport, proche de l'épiaison, pratique qui s'est aujourd'hui largement répandue sur ces deux espèces. L'antagonisme existant entre rendement et teneur en protéines pourrait être en partie dépassé dans l'avenir grâce à la découverte de gènes codant pour une stimulation de l'absorption postfloraison (Harrison *et al.*, 2004).

Les déterminants de la disponibilité de l'azote pour les cultures

Depuis longtemps, on sait que, lors d'un apport d'engrais azoté, la totalité n'est pas valorisée par la culture : une partie de l'engrais est organisée dans le sol (Recous et Machet, 1999), une partie peut être volatilisée (Le Cadre *et al.*, 2004) ou lixiviée ou encore perdue sous forme de N₂ et de N₂O par dénitrification (Hénault *et al.*, 2005). Les processus conduisant à ces pertes sont influencés par les conditions climatiques au moment de l'apport (température, vent, présence de pluie), la nature chimique et physique des fertilisants apportés, les caractéristiques du sol lors de l'apport (contenu en eau, pH notamment), ces déterminants agissant en interaction. Ces connaissances peuvent être mobi-

lisées pour choisir les périodes optimales d'apport permettant de favoriser l'utilisation par la culture. Par exemple, un apport d'engrais suivi rapidement d'une pluie, sous réserve qu'elle ne soit pas trop intense pour ne pas induire de lixiviation, sera mieux valorisé que s'il est suivi par une période de sécheresse.

À côté de ces facteurs externes, Limaux *et al.* (1999) ont montré, sur blé, que la vitesse de croissance aérienne de la culture, au moment de l'apport, jouait également un rôle déterminant dans l'efficacité d'utilisation de l'engrais apporté : il existe une corrélation très étroite entre le coefficient d'utilisation de l'azote (apparent ou réel) et la vitesse de croissance dans les jours suivant l'apport. Cette relation traduit l'effet des besoins instantanés de la culture dans sa capacité à absorber l'azote, au détriment des autres processus dans le sol (organisation, lixiviation notamment). Ainsi, le sol ne constitue pas un réservoir dans lequel on peut « stocker » temporairement de l'engrais azoté, qui sera mobilisé par la culture lors de ses besoins. Si l'engrais est apporté à une période de faible besoin pour la culture, cet azote sera mobilisé par d'autres processus et ne sera plus disponible pour la culture. Il est donc particulièrement important de réaliser les apports d'azote au plus près des besoins de la culture.

Une diversité d'outils existants pour raisonner la fertilisation azotée

Ces connaissances ont progressivement été incorporées dans les outils de raisonnement de la fertilisation azotée disponibles auprès des producteurs et des conseillers. Aujourd'hui, l'outil AzoFert[®], largement utilisé en régions Centre, Picardie, Nord-Pas-de-Calais et Champagne-Ardenne en France pour réaliser les préconisations de fertilisation suite à une mesure de reliquat d'azote minéral en sortie hiver, repose sur une approche dynamique des processus élémentaires de fournitures en azote dans le sol (et non

de la minéralisation nette comme auparavant) et des besoins en azote de la culture. Cette amélioration a cependant un effet pervers : chacun de ces postes ouvre la possibilité de définir une marge d'erreur et leur cumul conduit à une marge de sécurité qui peut devenir excessive et induire des pertes d'azote.

En parallèle et pour pallier les défauts de la méthode du bilan, liés notamment à notre incapacité à prévoir le climat à moyen terme et ses conséquences sur les besoins azotés des cultures et sur l'offre du sol, des outils de pilotage de la fertilisation azotée ont vu le jour. Ces derniers permettent notamment d'ajuster les apports d'engrais azotés, en fonction de l'état du système sol-plante mesuré au cours du cycle. On peut notamment citer la « Bande Double Densité », dont le principe est d'accroître, en semant une double densité sur une toute petite zone de la parcelle, les besoins précoces du peuplement, et donc de détecter par observation visuelle du couvert la date d'entrée en carence de cette zone, indicatrice d'une entrée en carence proche du reste de la parcelle. Le même raisonnement est inclus dans l'outil Héliotest, adapté à la culture du tournesol. On peut également citer les outils basés sur la mesure de la teneur en nitrate du jus de base de tige tels que Jubil[®], les outils basés sur une mesure de transmittance des feuilles tels que le HNTester[®] (estimation de la teneur en chlorophylle, corrélée par variété et par stade à la teneur en azote), et, depuis une dizaine d'années, les outils basés sur des images satellitaires des parcelles entières tels que Farmstar[®]. Si ces outils ont permis de faire de réels progrès dans l'ajustement de l'offre azotée aux besoins de la plante, réduisant de fait les pertes vers l'environnement car ajustant mieux la dynamique de l'offre à celle des besoins de la culture, en tenant compte de la variabilité inter-annuelle ou interparcellaire dans l'évolution des besoins de la culture, on constate qu'ils ne permettent pas d'éviter totalement ces pertes.

En effet, tous les outils disponibles aujourd'hui pour raisonner la fertilisation azotée sont basés sur le principe de couverture totale des besoins en azote de la culture pour maintenir un état de nutrition azotée non limitant tout au long du cycle, condition nécessaire à

l'obtention du rendement maximum permis par le climat. Ce principe conduit inévitablement à des périodes de suralimentation : l'offre en azote est supérieure aux besoins, ce qui est favorable à un détournement de l'azote par les processus microbiens du sol ou l'entraînement par l'eau de drainage, au détriment de la valorisation par la culture. De plus, même en utilisant les connaissances les plus précises pour prévoir les besoins, les incertitudes liées à la variabilité interannuelle du climat, en particulier la température et la pluie qui jouent sur la minéralisation d'azote dans le sol, et le rayonnement qui joue sur la croissance de la culture, peuvent conduire à des erreurs d'estimation des besoins de l'ordre de 30 à 40 kg N/ha pour un blé à floraison (figure 1).

Un changement de paradigme est nécessaire dans le raisonnement de la fertilisation azotée

Les outils actuels de fertilisation ont tous pour principe d'anticiper les périodes de forte absorption par la culture, et donc de favoriser une disponibilité d'azote dans le milieu non limitante pour la culture. Au contraire, raisonner les apports d'engrais de manière à maximiser l'efficacité de leur utilisation par la culture conduit à apporter

l'engrais seulement au moment où les besoins de la culture sont élevés, mais induit un risque d'occurrence de carences azotées temporaires. Pour favoriser cette pratique, il est donc important de connaître les effets de telles carences, selon leur occurrence dans le cycle cultural, pour éviter les carences les plus préjudiciables au rendement.

L'analyse des conséquences, sur le rendement et la teneur en protéines des grains, de périodes de carence azotée à différentes périodes du cycle, a montré que le rendement d'une culture de blé ayant subi une carence n'est pas systématiquement significativement inférieur au rendement d'une culture conduite à l'optimum de nutrition azotée tout au long de son cycle (Jeuffroy et Bouchard, 1999). Ainsi, en l'absence de maladie et de stress hydrique, des carences précoces, suivies par une période d'alimentation azotée optimale, permettent d'obtenir les meilleurs rendements (figure 2). L'analyse d'une diversité de situations ayant présenté une carence au printemps montre que le rendement n'est pas affecté si la culture peut remonter à un niveau de nutrition azotée satisfaisant pendant le mois qui précède la floraison. À cette condition, une carence précoce, même longue, n'handicape pas le rendement. Par ailleurs, on sait que l'absorption d'azote par la culture autour de, et même après, la floraison est favorable à l'accroissement de la teneur en protéines des grains. Ces connaissances ont permis de proposer une trajectoire optimale de nutrition azotée pour une culture de blé, favorable au rendement et à la teneur en protéines : celle-ci est caractérisée par une période de carence « utile » jusqu'au stade « 2 noeuds », puis une dynamique de croissance et d'absorption importante pendant le mois précédant la floraison (figure 3). La valorisation de l'engrais étant améliorée dans ces situations, les cultures sont caractérisées par un besoin en azote par quintal de grains produits plus faible (on passe par exemple de 3 kg/q environ à 2,7) : on peut donc économiser environ 20-30 unités d'azote apporté par hectare, sans affecter le rendement.

Pour atteindre ces trajectoires de nutrition azotée, il est indispensable de réduire (voire, le plus souvent, de

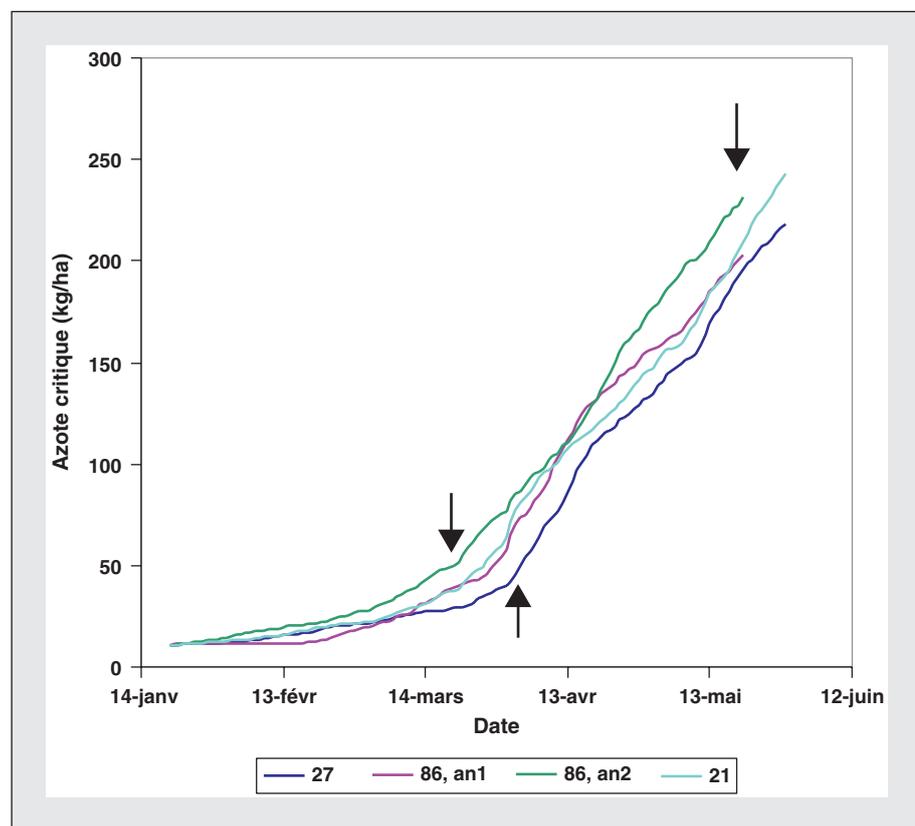


Figure 1. Variabilité interannuelle et interparcelle de la dynamique d'évolution des besoins en azote d'une culture de blé (simulée ici par la quantité d'azote critique de la culture, c'est-à-dire la quantité d'azote minimale nécessaire pour assurer la croissance maximale de la culture).

Figure 1. Inter-year and between-fields variability of the time-course change of nitrogen requirements in a wheat crop (simulated by the critical amount of nitrogen in the crop, that is to say the minimum amount of nitrogen required for maximal growth).

Simulation issue d'Azodyn. À floraison, l'écart entre les besoins cumulés peut atteindre 30 à 40 kg N/ha. Les courbes correspondent à des départements de France (27 = Eure, 86 = Vienne, 21 = Côte d'Or) et à des années différentes (2 années pour le département 86, 1 année différente pour les deux autres départements). Les flèches correspondent aux stades « début montaison » et « floraison ».

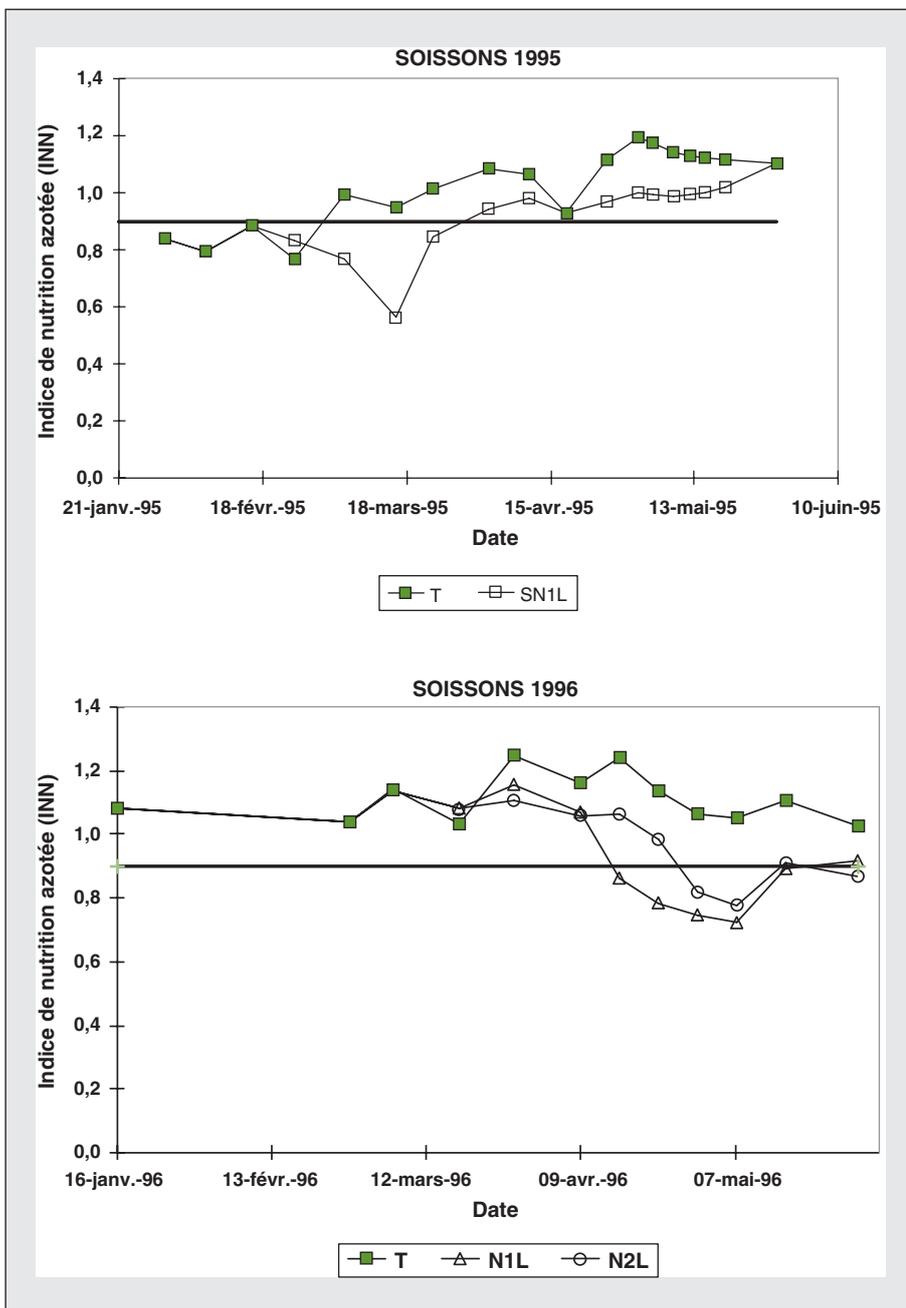


Figure 2. Effet de carences azotées temporaires sur le rendement d'une culture de blé (cv Soissons) pour deux années (1995 et 1996).

Figure 2. Effect of temporary nitrogen deficiencies on wheat yield (cv Soissons) for two years (1995 and 1996).

Des périodes du cycle où l'indice de nutrition azotée (INN) est en dessous de 0,9 caractérisent des carences azotées. Ici, les rendements obtenus par les modalités SN1L (en 1995) et N1L et N2L (en 1996) ne sont pas significativement différents du rendement des cultures bien alimentées en N (T). Rendements (q/ha) : SN1L = 98,8 ; T(95) = 93,1 ; N1L = 106,9 ; N2L = 107,0 ; T(96) = 109,6.

supprimer) le premier apport, réalisé généralement à la sortie de l'hiver, et de décaler une grosse partie de la dose totale (jusqu'à 66 %) de l'apport réalisé au stade « Epi 1 cm » à l'apport

réalisé au stade « dernière feuille ». Ces stratégies ont conduit, sur plusieurs essais, à des rendements au moins équivalents (voire supérieurs de 1 à 2 q/ha) et à des gains systématiques

en teneur en protéines (+ 1,2 à + 1,7 points) (Gate, com. Pers.). Par ailleurs, la valorisation de l'engrais par la culture étant meilleure, les pertes d'azote vers l'environnement sont réduites. Par ce type de stratégie, non permise par les outils actuels étant donné leur calibrage, on gagne donc sur tous les tableaux : rendement, qualité et environnement (Meynard *et al.*, 2002) !

Dans le but d'affiner le raisonnement de la fertilisation azotée, un autre moyen est mobilisable : celui des différences de comportement variétal vis-à-vis des carences azotées temporaires. En effet, pour un même niveau de carence, certaines variétés maintiennent un rendement plus élevé que d'autres (figure 4). L'écart entre variétés est de l'ordre de 7 q/ha. Il semble principalement lié aux capacités d'absorption de la variété pendant les périodes où l'azote est limitant et à sa vitesse d'assimilation. Des progrès génétiques sont possibles sur ces caractères, qui pourraient permettre de tolérer plus souvent de telles carences. Mais sa valorisation nécessiterait de caractériser les variétés inscrites sur ce critère, ce qui n'est pas le cas actuellement. Des travaux récents (Gate, com. pers.) ont montré l'existence d'un lien entre le niveau de fertilité des épis et le besoin par quintal : les variétés qui élaborent leur nombre de grains par mètre carré davantage par le nombre de grains par épi que par le nombre d'épis par mètre carré sont plus efficaces vis-à-vis de l'azote. Cette aptitude génétique est cohérente avec la notion de carence utile temporaire en début de montaison : cette dernière a effectivement comme incidence de privilégier l'élaboration du nombre de grains par épi en faisant régresser plus rapidement les talles végétatives en excès. De ce fait, l'azote apporté contribue directement à la croissance des futurs épis. Enfin, on sait que les pertes gazeuses liées à la fertilisation azotée sont étroitement liées aux conditions climatiques après apport : l'absence de pluie, la présence de vent fort, ou d'une température élevée sont favorables aux processus de volatilisation. Les progrès des prévisions climatiques à court-moyen terme devraient permettre un meilleur positionnement des apports, à condition que leur incertitude n'accroisse pas le risque d'erreur.

Des leviers efficaces pour améliorer la gestion de l'azote à l'échelle du système de culture

La gestion de l'azote à l'échelle du système de culture ne repose pas uniquement sur une bonne gestion de la fertilisation azotée. L'entrée d'azote dans les systèmes peut être efficacement et gratuitement atteinte grâce aux cultures de légumineuses. Une culture de pois, par exemple, peut fixer jusqu'à 250 kg N/ha en un cycle cultural. La réduction des surfaces de légumineuses à graines, passées de près de 800 000 hectares dans les années 1992 à près de 100 000 hectares en 2009 a ainsi fait perdre près de 175 000 tonnes d'azote gratuites. De même, la réduction des surfaces de légumineuses fourragères (de 3 millions d'hectares dans les années 1960 à 400 000 hectares environ depuis 2000), remplacées par des cultures ou prairies fertilisées, a fait consommer de l'ordre de 650 000 tonnes d'engrais minéral de synthèse en plus. Alors qu'en France, les achats d'engrais correspondent en moyenne à 2 400 000 tonnes d'azote par an, c'est près d'un tiers de l'engrais azoté de synthèse qui pourrait être économisé grâce aux légumineuses, même s'il n'y a pas substituabilité parfaite entre ces espèces en termes d'usage. Outre le gain économique, cette substitution permet également un gain environnemental : réduction de la consommation d'énergie fossile de 50 % sur une culture de pois par rapport à une culture fertilisée et de - 11 % à l'échelle d'une succession de 5 ans incluant un pois (Nemecek *et al.*, 2008) ; réduction des émissions de N₂O (Jeuffroy *et al.*, 2013), de 75-80 % à l'échelle de la culture du pois à 20 % environ sur une succession de 3 ans incluant un pois.

Les légumineuses ont l'inconvénient de laisser dans le sol, après leur cycle cultural, des quantités d'azote minéral plus élevées, en moyenne de 20 kg N/ha, qu'une céréale ou un colza (Munier-Jolain et Carrouée, 2003) : elles contribuent donc à accroître le risque de lixiviation pendant

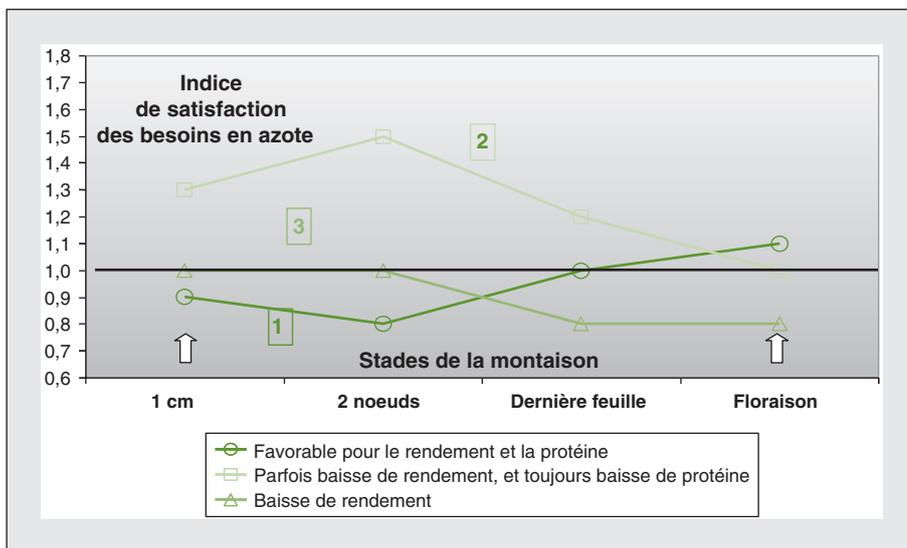


Figure 3. Trajectoires de nutrition azotée (indice de nutrition azotée, INN) en fonction des stades de la culture du blé (« 1 cm » : stade début montaison) et conséquences sur le rendement et la teneur en protéines des grains.

Figure 3. Time-course change of crop nitrogen nutrition according to the developmental stages ("1 cm" = beginning of stem elongation) and consequences on yield and grain protein content.

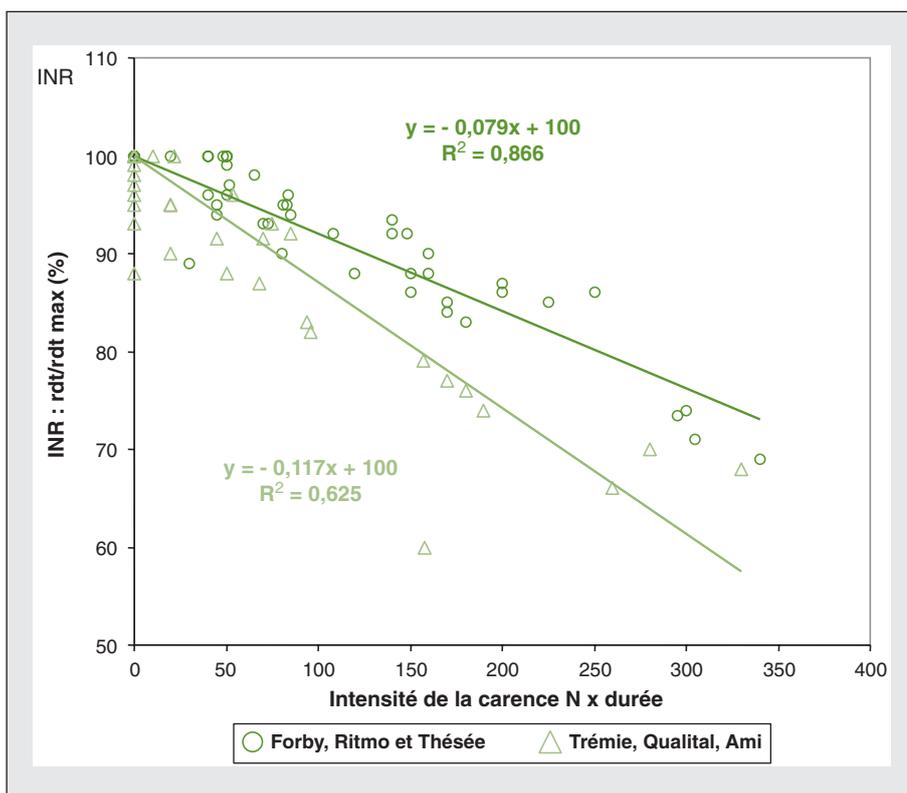


Figure 4. Réponse variétale du rendement au niveau de carence subi par la culture.

Figure 4. Cultivar response of yield (INR = ratio of yield for a crop with a nitrogen deficiency / yield of a crop with no nitrogen deficiency) to nitrogen deficiency of the crop.

Pour un même niveau de carence azotée, mesurée ici par le produit de l'intensité par la durée de la carence (Jeuffroy et Bouchard, 1999), la perte de rendement (INR = ratio du rendement sur la culture carencée et du rendement sur une culture non carencée cultivée dans les mêmes conditions) diffère entre variétés
Rdt = rendement.

l'automne/l'hiver qui suit si aucune mesure préventive n'est prise. L'association de légumineuses à des céréales permet de réduire significativement les quantités d'azote laissées dans le sol après récolte (Pelzer *et al.*, 2012). Ainsi, par la culture d'espèces associées, il est possible d'obtenir un rendement moyen au moins égal au rendement moyen des deux espèces cultivées pures, tout en réduisant de manière importante la fertilisation azotée appliquée et en réduisant les risques de pertes d'azote vers l'environnement. Cette technique innovante permet donc de bénéficier des avantages de la légumineuse, sans en subir les inconvénients. Selon le même principe, des associations d'une culture de rente avec une légumineuse fourragère gélive (colza associé) ou implantée comme couvert associé en relais (par ex dans des blés conduits en agriculture biologique [Thiessen Martens *et al.*, 2001 ; Amossé *et al.*, 2013]) pourraient contribuer à l'enrichissement du système sans accroître les risques de pertes.

Un autre moyen de réduire les risques de lixiviation derrière légumineuse, ou derrière une culture ayant mal valorisé l'azote disponible, est d'implanter une culture intermédiaire (Tonitto *et al.*, 2006) ou une plante de couverture (Ghiloufi *et al.*, 2010). Si l'implantation de la culture est réussie, les quantités de nitrate lixiviées sont réduites significativement chaque hiver. De plus, sur le long terme, le retour récurrent de telles cultures intermédiaires permet d'enrichir le sol en matière organique, grâce au retour de la biomasse produite par la culture intermédiaire (Constantin *et al.*, 2010). Cette technique est intéressante, mais sur le long terme, l'augmentation de la minéralisation de l'azote stocké nécessite d'être également prise en compte, bien que difficile encore à estimer, dans la gestion de la fertilisation azotée et des intercultures. Des possibilités d'adaptation de la conduite de la culture suivante à la disponibilité de l'azote laissé dans le sol par la culture précédente existent. Ainsi, la culture de colza, particulièrement efficace dans l'absorption de l'azote en automne, peut valoriser ces situations et réduire les risques de lixiviation hivernale, en particulier si sa date de semis est avancée (Dejoux *et al.*, 2003). Cependant, l'identification de telles situations est souvent limitée par le manque d'outils de

diagnostic, utilisables directement par les agriculteurs. Dans les aires d'alimentation de captages (AAC), l'amélioration de la qualité de l'eau prélevée, par des changements de pratiques efficaces, butte souvent sur l'identification précise des causes de pertes vers la nappe : selon qu'il s'agit de pratiques de surfertilisation azotée ou de gestion insuffisante des fortes disponibilités d'azote dans les sols à l'automne, les pratiques correctrices à préconiser dans les plans d'action ne seront pas les mêmes. Or, les acteurs locaux sont aujourd'hui bien souvent démunis pour réaliser de tels diagnostics, conduisant, au mieux, à proposer des mesures trop drastiques (par exemple passage à l'agriculture biologique sur une grande partie du captage), qui rebutent les agriculteurs, ou à des mesures inefficaces (ajustement de la fertilisation azotée, si ce n'est pas cette pratique qui est à l'origine des surplus). Un outil de gestion de l'azote au sein des territoires est en cours de mise au point (Syst'N), et devrait favoriser l'apprentissage des acteurs sur le diagnostic de la gestion de l'azote à l'échelle des systèmes de culture et permettre ainsi d'améliorer les pratiques (Parnaudeau *et al.*, 2012). Enfin, l'agriculture est fortement mise à contribution pour participer au recyclage des déchets organiques générés par les diverses activités humaines. Sa contribution dans l'utilisation des effluents d'élevage est déjà forte (environ 94 % des produits sont recyclés), mais génère localement des surplus importants (CGDD, 2012), pouvant aller jusqu'à plusieurs centaines de kg N/ha. Ce résultat est en partie lié à la concentration des élevages français dans certaines régions, et à la réduction drastique du lien entre polyculture et élevage dans la plupart des régions françaises. L'objectif de bouclage des cycles de l'azote devrait à terme renvoyer des questions fortes à la gestion territoriale des déchets. D'autre part, la production croissante de déchets municipaux verts, de boues résiduaires urbaines ou de déchets organiques par l'industrie interroge l'agriculture quant à sa capacité de recyclage. La valorisation de tels produits en agriculture n'est pas sans risque car ils sont caractérisés par une grande diversité dans leur composition, et donc dans leur dynamique de fourniture en azote, induisant là encore

des incertitudes sur la prévision de leur fourniture d'azote. De nombreux travaux de recherche ont été initiés pour caractériser ces dynamiques (Parnaudeau *et al.*, 2004), ainsi que les risques de pertes gazeuses, souvent accrues pour ces produits organiques (Génermont et Cellier, 1997), et proposer des indicateurs susceptibles de les anticiper, afin de préconiser des méthodes de valorisation efficaces.

Conclusion

La production de nouvelles connaissances de base, pour nécessaire qu'elle soit, ne suffira pas à réduire les risques de pollution : il est également indispensable de les traduire en connaissances opérationnelles pour les acteurs impliqués dans la gestion de l'azote. Insérer ces connaissances dans des outils de raisonnement de la fertilisation azotée est devenu une étape indispensable. Face aux limites des outils, qui viennent d'être identifiées, il est également nécessaire de produire de nouvelles règles de décision, cohérentes avec les nouveaux paradigmes : il ne s'agit plus seulement d'améliorer à la marge les outils existants, mais il est nécessaire de les remettre en cause pour en produire de nouveaux, basés sur ces connaissances récentes et des concepts renouvelés.

Une valorisation des connaissances acquises dans le cadre de la génétique et de l'écophysiologie doit également être mieux réalisée par les agronomes pour la mise au point de ces nouveaux outils de gestion des pratiques agricoles.

Leur utilisation par les acteurs a suscité de nombreux travaux de recherche récemment. Ainsi, plusieurs auteurs s'accordent pour dire que la mobilisation de tels outils est d'autant plus forte et réussie que les acteurs ont participé à leur mise au point (Cerf *et al.*, 2012). Par ailleurs, ils ne sont pas toujours utilisés comme pouvaient l'avoir anticipé leurs auteurs (Cerf et Meynard, 2006 ; Schneider *et al.*, 2010). Ils constituent parfois davantage des sources d'apprentissage du fonctionnement des systèmes que les acteurs doivent gérer. Dans ce sens, la mise au point d'indicateurs de diagnostic, facilement actionnables par les acteurs,

devrait constituer un objectif prioritaire pour la recherche.

Finalement, le changement des modes de gestion de l'azote dans les systèmes de culture est une affaire collective : les acteurs de la sphère agricole ne sont pas les seuls à être concernés. Il mobilise également les citoyens (potabilité de l'eau), les pouvoirs publics, les collectivités territoriales, les associations de défense de l'environnement. Cette mobilisation sans précédent est une opportunité inespérée pour renouveler les objectifs et les manières de produire vers plus de durabilité. ■

Remerciements

Cet article a été le support d'une communication présentée lors 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* », organisée par Jean-Claude Germon.

Références

- Andren K, Paustian K, 1987. Barley straw decomposition in the field : a comparison of models. *Ecology* 68 : 1190-200.
- Barbottin A, Lecomte C, Bouchard C, Jeuffroy MH, 2005. Nitrogen remobilisation during grain filling in wheat : genotypic and environmental effects. *Crop Science* 45 : 1141-50.
- Bertrand I, Chabbert B, Kurek B, Recous S, 2006. Can the biochemical features and histology of wheat residues explain their decomposition in soil ? *Plant and Soil* 281 : 291-307.
- Amossé A, Jeuffroy MH, David C, 2013. Relay intercropping of forage legumes in organic winter wheat: effects on performance and resource availability. *Field Crops Research* 145 : 78-87.
- Cerf M, Meynard JM, 2006. Les outils de pilotage des cultures : diversité de leurs usages et enseignements pour leur conception. *Nature, Sciences, Sociétés* 14 : 19-29.
- Cerf M, Jeuffroy MH, Prost L, Meynard JM, 2012. Participatory design of agricultural decision support tools : taking account of the use situations. *Agronomy Sustainable Development* 32 : 899-910.
- Commissariat Général au Développement Durable, 2012. L'analyse spatiale des pressions agricoles : surplus d'azote et gaz à effet de serre. *Le point sur*, N°113. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/L-analyse-spatiale-des-pressions.html>
- Comifer, 2011. *Calcul de la fertilisation azotée. Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales*. Paris : Comifer. <http://www.comifer.asso.fr/index.php/publications.html>
- Constantin J, Mary B, Laurent F, Aubrion G, Fontaine A, Kerveillant P, Beaudoin N, 2010. Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching and balance in three long-term experiments. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 135 : 268-78.
- Dejoux JF, Meynard JM, Reau R, Roche R, Saulas P, 2003. Evaluation of environmentally-friendly crop management systems based on very early sowing dates for winter oilseed rape in France. *Agronomie* 23 : 725-36.
- Génermont S, Cellier P, 1997. A mechanistic model for estimating ammonia volatilization from slurry applied to bare soil. *Agricultural and Forest Meteorology* 88 : 145-67.
- Ghiloufi M, Picard D, Saulas P, de Tourdonnet S, 2010. Y a-t-il un intérêt agronomique à associer une culture commerciale et une plante de couverture ? *Cahiers Agricultures* 19 : 420-31. doi: 10.1684/agr.2010.0438.
- Harrison J, Hirel B, Limami AM, 2004. Variation in nitrate uptake and assimilation between two ecotypes of *Lotus japonicus* and their recombinant inbred lines. *Physiologia Plantarum* 120 : 124-31.
- Le Cadre E, Génermont S, Azam F, Recous S, 2004. The SAHGA model to calculate the spatial ammoniacal heterogeneity at the soil surface after fertiliser granule application. *Biology and Fertility of Soils* 40 : 178-80.
- Hénault C, Bizouard F, Laville P, Gabrielle B, Nicoulaud B, Germon JC, Cellier P, 2005. Predicting in situ soil N₂O emission using NOE algorithm and soil database. *Global Change Biology* 11 : 115-127.
- Hénin S, Dupuis M, 1945. Essai de bilan de la matière organique des sols. *Annales Agronomiques* 15 : 17-29.
- Jeuffroy MH, Bouchard C, 1999. Intensity and Duration of Nitrogen Deficiency on Wheat Grain Number. *Crop Science* 39 : 1385-93.
- Jeuffroy MH, Baranger E, Carrouée B, de Chezelles E, Gosme M, Hénault C, Schneider A, Cellier P, 2013. Nitrous oxide emissions from crop rotations including wheat, rapeseed and dry peas. *Biogeosciences* 10 : 1-11.
- Justes E, Mary B, Meynard JM, Machet JM, Thelier-Huche L, 1994. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Annals of Botany* 74 : 397-407.
- Lemaire G, Salette J, 1984. Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I- Etude de l'effet du milieu. *Agronomie* 4 : 423-30.
- Limaux F, Recous S, Meynard JM, Guckert A, 1999. Relationship between rate of crop growth at date of fertiliser N application and fate of fertiliser N applied to winterwheat. *Plant and Soil* 214 : 49-59.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Washington (DC) : Island Press. www.unep.org/maweb/
- Meynard JM, Cerf M, Guichard L, Jeuffroy MH, Makowski D, 2002. Nitrogen, Decision Support and Environmental Management. *Agronomie* 22 : 817-29.
- Monteith JL, 1972. Solar radiation and productivity in tropical-cal ecosystems. *Journal Applied Ecology* 9 : 747-66.
- Munier-Jolain N, Carrouée B, 2003. Quelle place pour le jolain dans une agriculture respectueuse de l'environnement - Argumentaire agri-environnemental. *Cahiers Agricultures* 12 : 111-20.
- Nemecek T, von Richthofen JS, Dubois G, Casta P, Charles R, Pahl H, 2008. Environmental impacts of introducing grain legumes into European crop rotations. *European Journal of Agronomy* 28 : 380-93.
- Nicolardot B, Recous S, Mary B, 2001. Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: A simple dynamic model based on the C:N ratio of the residues. *Plant Soil* 228 : 83-103.
- Parnaudeau V, Nicolardot B, Pagès J, 2004. Relevance of Organic Matter Fractions as Predictors of Wastewater Sludge Mineralization in soil. *Journal Environmental Quality* 33 : 1885-94.
- Parnaudeau V, Reau R, Dubrulle P, 2012. Un outil d'évaluation des fuites d'azote vers l'environnement à l'échelle du système de culture: le logiciel Syst'N. *Innovations Agronomiques* 21 : 59-70. http://www7.inra.fr/ciag/revue/volume_21_septembre_2012
- Pelzer E, Bazot M, Makowski D, Corre-Hellou G, Naudin C, Al Rifaï M, et al., 2012. Pea-wheat intercrops in low-input conditions combine high economic performances and low environmental impacts. *European Journal of Agronomy* 40 : 39-53.
- Recous S, Machet JM, 1999. Short-term immobilisation and crop uptake of fertiliser nitrogen applied to winter wheat : effect of date of application in spring. *Plant Soil* 206 : 137-49.
- Recous S, Aita C, Mary B, 1999. In situ changes in gross N transformations in bare soil after addition of straw. *Soil Biology and Biochemistry* 31 : 119-33.
- Rémy JC, Hébert J, 1977. Le devenir des engrais dans le sol. *Comptes Rendus Académie Agriculture France* 63 : 700-10.
- Schneider A, Flénet F, Dumans P, Bonnin E, de Chezelles E, Jeuffroy MH, Hayer F, Nemecek T, Carrouée B, 2010. Diversifier les rotations céréalières notamment avec du pois et du colza – Données récentes d'expérimentations et d'études. *Oléagineux Cereales Lipides* 17 : 301-11. doi: 10.1684/ocl.2010.0332.
- Snyder CS, Bruulsema TW, Jensen TL, Fixen PE, 2009. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 133 : 247-66.
- Thiessen Martens JR, Hoepfner JW, Entz MH, 2001. Legume cover crops with winter cereals in Southern Manitoba: Establishment, productivity, and microclimate effects. *Agronomy Journal* 93 : 1086-96.
- Tonitto C, David MB, Drinkwater LE, 2006. Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: a meta-analysis of crop yield and N dynamics. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 112 : 58-72.
- Trinsoutrot I, Recous S, Bentz B, Linères M, Chêneby D, Nicolardot B, 2000. Biochemical quality of crop residues and carbon and nitrogen mineralization kinetics under nonlimiting nitrogen conditions. *Soil Science Society of America Journal* 64 : 918-26.
- Valé M, Mary B, Justes E, 2007. Irrigation practices may affect denitrification more than nitrogen mineralization in warm climatic conditions. *Biology and Fertility of Soils* 43 : 641-51.