



HAL
open science

Bouclage des cycles: des approches renouvelées et plus englobantes des cycles biogéochimiques

Pierre Cellier, Sylvain Pellerin, Sylvie Recous, Françoise Vertès

► To cite this version:

Pierre Cellier, Sylvain Pellerin, Sylvie Recous, Françoise Vertès. Bouclage des cycles: des approches renouvelées et plus englobantes des cycles biogéochimiques. Une agronomie pour le XXI^e siècle, Editions Quae, pp.194-214, 2019, 978-2-7592-2937-6. hal-02018421

HAL Id: hal-02018421

<https://hal.science/hal-02018421>

Submitted on 5 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Bouclage des cycles : des approches renouvelées et plus englobantes des cycles biogéochimiques

Pierre Cellier, Sylvain Pellerin, Sylvie Recous, Françoise Vertès

Les éléments majeurs tels que l'azote, le phosphore, le potassium et le soufre sont indispensables à la vie car ils sont, avec le carbone, l'oxygène et l'hydrogène, constitutifs de tout être vivant (ex. : ADN, protéines, enzymes). Ce sont en conséquence des éléments minéraux essentiels et des facteurs limitants de la vie et de la production végétale et animale sous toutes leurs formes, depuis les organismes microbiens jusqu'aux organismes les plus évolués et les plus complexes. L'un des fondements de l'agriculture a été, de tout temps, d'apporter ces éléments sous une forme facilement accessible pour la plante, notamment en incluant des légumineuses dans les rotations (pures ou en mélange), par l'association d'espèces au sein du couvert végétal (processus de facilitation entre espèces), par l'association entre cultures et élevage (apports de nutriments par le recyclage des effluents d'élevage) ou sous forme d'apports externes au système de production agricole (issus d'exploitation minière, d'engrais industriels ou de produits organiques d'origine non agricole) ou internes (brûlis et recyclage *via* les cendres). Ces éléments ne sont pas indépendants entre eux, la composition des matières organiques respecte des rapports stœchiométriques¹⁶² qui peuvent être différents selon les organismes vivants. Les apports d'éléments fertilisants doivent donc respecter, dans la mesure du possible, certains rapports.

Après la seconde guerre mondiale, la demande alimentaire a généré une forte augmentation de la production agricole, et l'intensification de la production

162. Un rapport stœchiométrique représente les proportions dans lesquelles les éléments chimiques sont impliqués dans la composition d'un composé ou d'un être vivant.

végétale qui l'a accompagnée a démultiplié l'utilisation de ces apports. Pour l'azote, la découverte du procédé Haber-Bosch pour produire de l'ammoniac dans les années 1910 a été à l'origine d'une véritable révolution dans la production agricole, et même dans la société en général. Pour le phosphore et le potassium, c'est l'exploitation minière qui, en se développant largement depuis le début du xx^e siècle, a fourni les ressources nécessaires. Le soufre a longtemps été non limitant en raison des apports atmosphériques liés aux sources de pollution de l'industrie, de l'énergie et des transports, mais le devient aujourd'hui dans certaines situations, en raison de la maîtrise de ces sources qui a commencé dans les années 1970-1980 et des fortes exportations de soufre par les produits récoltés.

Les cycles de l'azote, du phosphore et du soufre ont donc été profondément modifiés par les interventions humaines de l'échelle de la parcelle agricole à l'échelle mondiale. La contrepartie de la forte utilisation d'intrants est que nous sommes passés, en un siècle, d'une situation de limitation de la production agricole par ces éléments majeurs à une situation d'apports dépassant souvent les besoins des cultures. Ces excédents sont particulièrement sensibles dans les régions d'élevage, où les apports d'éléments fertilisants par les effluents organiques épandus n'ont souvent pas été pris en compte pendant plusieurs décennies. Ceci a eu pour conséquences des pertes croissantes d'azote et de phosphore dans l'environnement, soit vers les eaux pour des formes solubles et/ou mobiles (nitrate, formes organiques dissoutes, phosphates accumulés dans les sols et entraînés par ruissellement

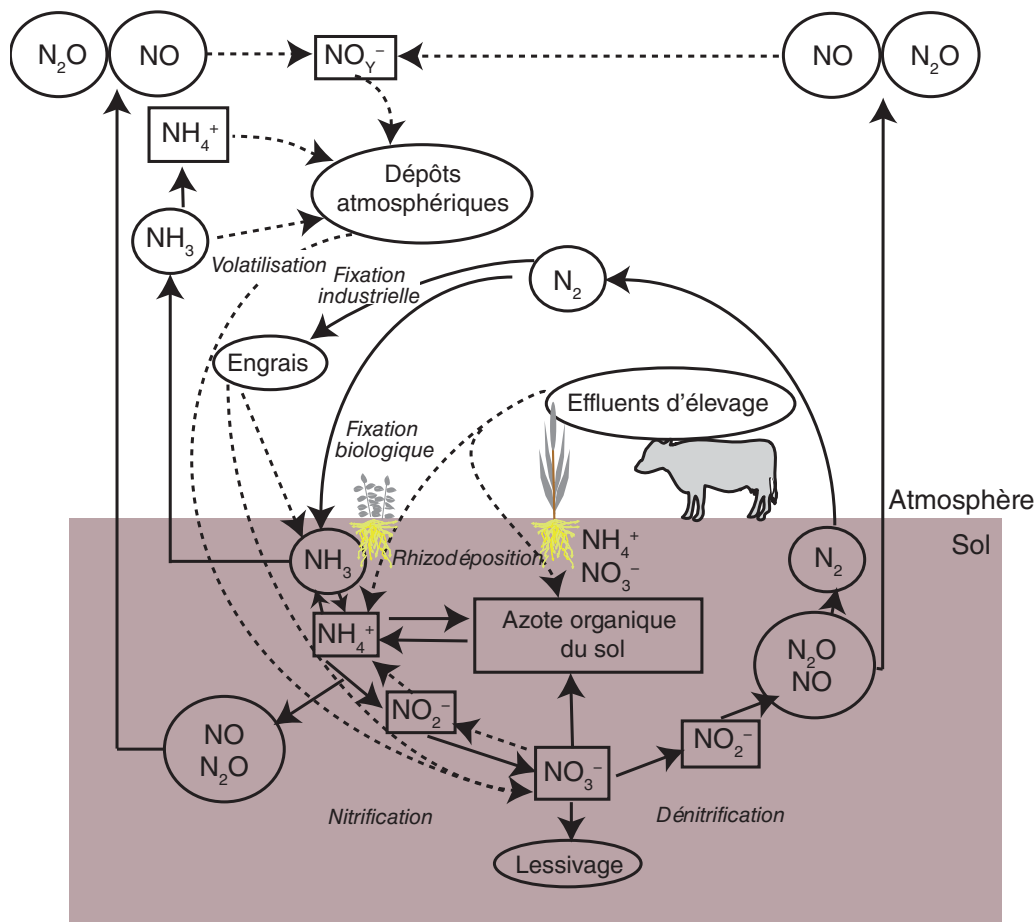


Figure 13.1. Cycle de l'azote au sein d'une culture pouvant inclure des légumineuses (fixation symbiotique) et fuites d'azote réactif vers l'environnement (flèches en pointillés : apports d'azote à l'agrosystème).

et érosion ; il n'y a pas de problème lié au potassium pour la qualité des eaux), soit vers l'atmosphère pour les formes gazeuses (ammoniac, oxydes d'azote, protoxyde d'azote) (voir figure 13.1 pour l'azote). Ces pertes ont généré des impacts environnementaux majeurs dès les années 1970 avec la contamination des nappes et des eaux de surface, puis des eaux côtières, largement liée aux pertes de nitrate et de phosphate depuis les sols agricoles. C'est à la même période qu'est apparu le phénomène des pluies acides pour lequel la responsabilité de l'agriculture, par le biais des émissions d'ammoniac, a été pointée, tout comme plus tard la contribution des émissions de protoxyde d'azote (GES majoritairement émis par les sols agricoles) au changement climatique. Ces impacts ont donné lieu à des manifestations visibles, telles que les marées vertes en Bretagne ou le dépérissement forestier dans l'est de la France et plus généralement de l'Europe. La société civile et les pouvoirs publics se sont mobilisés pour tenter de remédier à ces problèmes.

Ces impacts, les interpellations de la société et les engagements nationaux réglementaires de diminuer ces émissions ont amené à s'interroger depuis les années 1970-1980 sur la manière de mieux maîtriser ces pertes dans la chaîne allant des productions végétales jusqu'aux productions animales. Le rapport Poly en 1978, intitulé « Pour une agriculture plus économe et plus autonome », et le rapport Hénin en 1980, intitulé « Activités agricoles et qualité des eaux », ont impulsé de nouvelles visions des besoins de recherche, notamment dans le domaine des cycles biogéochimiques, avec une importance renforcée des questions environnementales, qui ont conduit à la création du Corpen¹⁶³, à laquelle les chercheurs du département EA ont largement contribué aux côtés des professionnels de l'agriculture et des acteurs de la décision publique.

La convergence de ces interrogations a poussé, dès la fin des années 1980, l'Inra à s'investir davantage dans l'étude des liens entre les cycles biogéochimiques, la production végétale et l'élevage, par le biais de la fertilisation des cultures et des prairies. Cela a conduit dans un premier temps à élaborer, sur une base scientifique, des méthodes de raisonnement de la fertilisation permettant d'adapter les apports aux objectifs de rendement, tout en diminuant les risques de pertes vers l'environnement. Dans un deuxième temps, on s'est attaché à étudier directement les pertes et leur devenir afin de mieux évaluer et maîtriser l'ensemble des impacts sur l'environnement, le climat et la santé. Sur la base d'un point de départ principalement agronomique, les concepts et méthodes se sont enrichis à partir des autres disciplines (ex. : science du sol, microbiologie, biogéochimie, bioclimatologie), de nouvelles approches en agronomie et d'un élargissement des échelles d'appréhension des cycles, dans la perspective générale de mieux s'ajuster aux besoins des cultures et de mieux évaluer et maîtriser les risques.

► La gestion de la fertilisation et l'analyse des cycles à l'échelle de la parcelle

Depuis la seconde guerre mondiale, l'utilisation d'engrais d'origine minérale, pilier de la modernisation agricole, a conditionné la forte augmentation des rendements agricoles et l'intensification de l'élevage. Néanmoins la fertilisation, minérale

163. Comité d'orientation pour des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement, <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/084000312.pdf>.

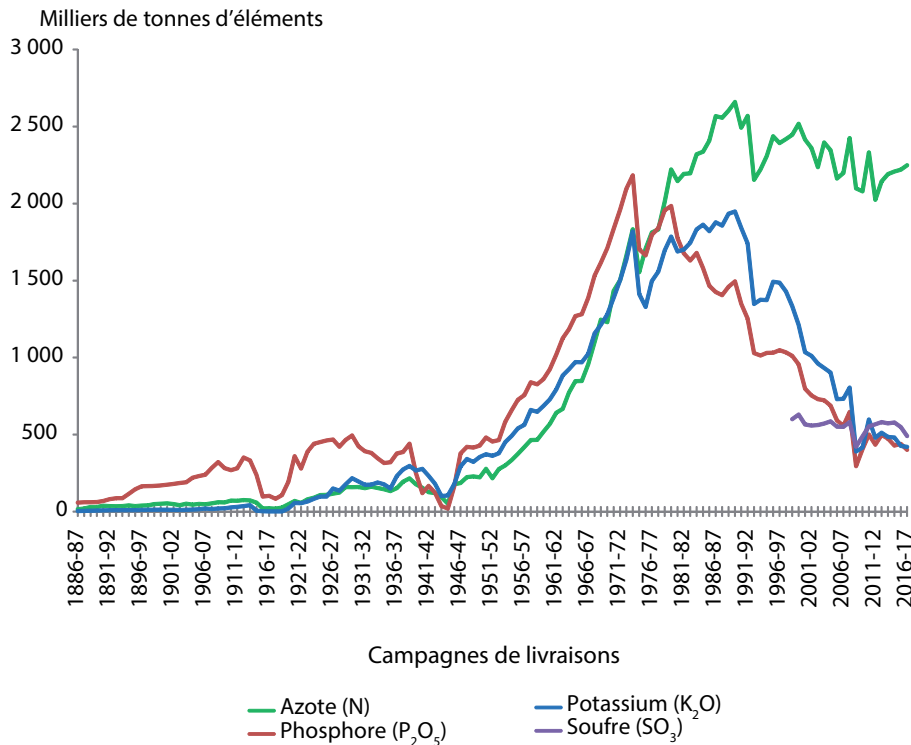


Figure 13.2. Évolution des livraisons d'engrais en France métropolitaine depuis la fin du XIX^e siècle (en kt d'éléments fertilisants ; d'après l'Union des industries de la fertilisation, Unifa).

ou organique, pèse sur l'économie des exploitations et est à l'origine d'impacts négatifs de l'agriculture sur l'environnement, le climat et la santé. Ces deux inconvénients ont tendu à réduire l'usage des engrais minéraux : l'évolution française de la consommation d'engrais indique une baisse importante et continue de la consommation de phosphore et de potassium depuis le début des années 1970, ainsi qu'une baisse, nettement moins marquée, de la consommation d'engrais azotés depuis la fin des années 1980 (figure 13.2).

Une thématique historique de l'Inra, menée largement en partenariat

Une très large part des recherches qui ont contribué à l'évolution des pratiques de fertilisation a été conduite au sein des départements Agronomie et Science du sol, fusionnés en 1998 dans le département Environnement et Agronomie (EA). Concernant la fertilisation azotée, depuis sa création et principalement dans le département Agronomie, l'Inra porte des recherches d'une part sur la dynamique de l'azote dans le sol et dans la plante, et d'autre part sur l'analyse de l'élaboration du rendement et de la qualité des produits, et donc sur les besoins en azote de la culture. Ces recherches ont contribué à l'évolution des pratiques de fertilisation azotée. Dès 1959, la méthode du bilan azoté est proposée par la station agronomique de l'Aisne (Jean Hébert), en collaboration avec l'Inra. Reprise et enrichie au cours de plusieurs décennies, cette méthode est encore aujourd'hui la méthode de référence pour raisonner la fertilisation azotée (méthode Comifer¹⁶⁴), même si elle n'est pas la seule (encadré 13.1).

164. Comité français d'étude et développement de la fertilisation raisonnée, <http://www.comifer.asso.fr/>.

Encadré 13.1. La méthode du bilan

La « méthode du bilan » proposée en France au début des années 1970 vise à calculer la quantité totale d'azote (N) à appliquer à une culture pour atteindre un rendement donné (Hébert, 1969)*. Cette méthode est basée sur un bilan complet d'azote minéral du sol en tenant compte de la profondeur de la zone d'enracinement de la culture et de l'ensemble du cycle de croissance de cette culture. Une équation exprime que la variation de l'azote minéral du sol entre les dates d'ouverture et de clôture du calcul du bilan est égale à la différence entre les entrées et les sorties de N du système sol-plante-atmosphère. Ce bilan est additif.

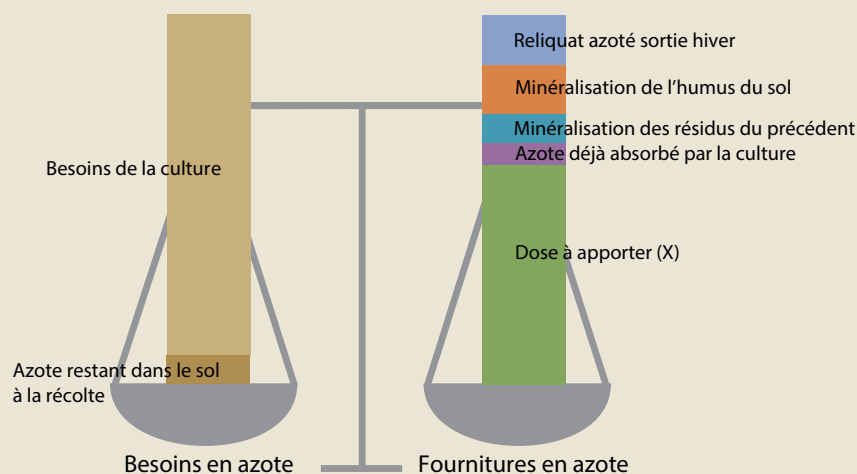


Figure 13.3. Schématisation du bilan azoté des cultures.

Référence : Calcul de la fertilisation azotée – Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales. Cultures annuelles et prairies, Comifer, Groupe Azote, mai 2013, <http://www.comifer.asso.fr/index.php/fr/publications/les-brochures-du-comifer.html>. Source = N'Edu, <https://editions.educagri.fr/num/NEDU/N3-bilan-azote/co/4-CG1.html>.

La date d'ouverture du bilan se situe généralement à la fin de l'hiver pour les cultures d'hiver et au moment des semis pour les cultures de printemps. La date limite se situe généralement au moment où l'absorption d'azote par la culture s'arrête, par exemple à la récolte pour les betteraves sucrières et les légumes de plein champ ou avant la récolte pour le colza, les céréales et le maïs. Cette équation du bilan, largement utilisée en France sous différentes formes et dans différents outils pour la gestion de la fertilisation, en raison de sa robustesse, a été évaluée dans un large éventail de conditions environnementales, a été enrichie au cours des décennies par de nombreuses références et est devenue la méthode de référence du Comifer (guide de la fertilisation) et pour les pouvoirs publics (Référentiels régionaux pour l'équilibre de la fertilisation azotée). Le Comifer est présenté dans le texte de ce chapitre.

* Hébert J., 1969. La fumure azotée du blé tendre d'hiver. *Bull. techn. Inform. Min. Agric.*, 224, 755-766.

Les approches se sont affinées pour améliorer la prise en compte de certains postes et s'inscrire dans une vision dynamique de la nutrition azotée de la plante et des pertes vers l'environnement. Plusieurs unités de recherche en agronomie et science du sol ont ainsi lancé dans les années 1980 des travaux sur les pertes de nitrate et de phosphore, leurs transformations et leur transfert vers les eaux superficielles ou profondes à l'échelle de la parcelle et du bassin versant. Parallèlement, le calcul de bilans N, P, K (voire cuivre et zinc dans les zones d'élevage granivore intensif) au niveau des parcelles et des exploitations contribuait à affiner les diagnostics de risques d'excédent ou d'émissions.

Entre-temps, les recherches menées avec des méthodes isotopiques (^{15}N), provenant de la communauté scientifique des biogéochimistes, permettaient de tracer à court et long terme la dynamique de l'azote de l'engrais dans les différents compartiments de la plante et du sol, de la solution du sol et sous forme gazeuse. Les écophysiolgistes ont à cette même période établi le lien entre production et nutrition minérale en introduisant le concept de courbe de dilution (relation décroissante entre biomasse produite et teneur en N ou P au cours d'un cycle de croissance) afin de calculer des indices de nutrition N, P et K, largement utilisés en diagnostic pour prairies et cultures (voir p. 213). On a ainsi mieux compris d'une part les déterminants du recouvrement de l'azote par la culture et d'autre part les pertes. Grâce aux apports de la science du sol, de l'hydrologie de surface et de la bioclimatologie à partir des années 1990, il a été possible d'inclure et d'affiner certains postes de l'équation du bilan, en particulier les pertes vers les eaux (nitrate, azote organique dissous) et l'atmosphère (pertes d'ammoniac et de protoxyde d'azote) dans les systèmes de culture et d'élevage, mais aussi les apports nets de nutriments à partir des matières organiques exogènes (ex. : lisiers, fumiers, composts) et leur devenir.

Concernant le phosphore, dès les années 1960, des recherches conduites à l'Inra se sont focalisées sur les méthodes de caractérisation de la biodisponibilité du phosphore dans les sols et sur l'élaboration de référentiels associés. Principalement conduits en collaboration avec des laboratoires du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), avec notamment une contribution forte de Jean-Claude Fardeau sur les travaux concernant la compréhension de l'absorption du phosphore, notamment par des méthodes isotopiques (^{32}P), ont amené ultérieurement à relativiser l'interprétation des analyses de terre par extraction chimique. Pour conduire ces travaux, l'Inra a mis en place de nombreux essais de fertilisation de longue durée qui ont été par la suite relayés par des partenaires agricoles et industriels.

Une large palette de sorties opérationnelles

L'agrégation des connaissances, réalisée avec divers partenaires du développement, a permis de les incorporer dans des outils techniques pour contribuer à l'évolution des pratiques de fertilisation. Mais cela a aussi été largement favorisé par la participation active de l'Inra à l'animation des instances de coordination des recherches sur la fertilisation (Comifer, RMT Fertilisation et environnement). Au-delà de propositions sur la prise en compte d'exigence des espèces, sur la légitimation de l'impasse sur certains apports, sur l'abandon de la notion de fumure de correction pour P et K, sur le retardement des premiers apports d'azote, les travaux réalisés dans le département à la charnière des années 1990 et 2000 ont conduit à la production de plusieurs outils d'aide à la décision :

- le logiciel RégiFert[®], pour l'interprétation des analyses de terre des exploitations agricoles. La grille Comifer, élaborée en partenariat, constitue une version simplifiée de RégiFert[®], destinée aux conseillers agricoles de proximité ;
- des outils de raisonnement fondés sur le bilan azoté prévisionnel : d'Azobil[®] (1990), méthode statique (pour 26 cultures), vers AzoFert[®] (2003), approche dynamique (pour une soixantaine de cultures) utilisée notamment par des laboratoires d'analyse des sols (encadré 13.2) ;
- des outils de pilotage au cours du cycle végétatif, qui permettent d'ajuster la stratégie de fertilisation azotée selon les conditions climatiques et leurs incidences

sur la croissance des plantes et la disponibilité du sol (Jubil[®], 1993 ; témoins « double densité », 2001¹⁶⁵). D'autres méthodes ont fait le choix de tolérer des carences temporaires sur céréales, non préjudiciables pour le rendement et la teneur en protéines, à partir d'un suivi régulier de l'état azoté de la culture en s'appuyant sur une mesure indirecte de l'indice de nutrition azotée (Appi'N)¹⁶⁶. Cette dernière approche est en rupture avec la méthode du bilan d'azote, en s'affranchissant de l'estimation d'un objectif de rendement et du reliquat d'azote minéral à l'ouverture du bilan ;

– des outils visant à quantifier des émissions d'azote vers les aquifères et l'atmosphère en fonction des systèmes de cultures et des conditions pédoclimatiques locales (Syst'N[®], encadré 13.3) ou pour des évaluations à plus larges échelles (cartographies d'émission d'ammoniac à l'échelle nationale¹⁶⁷).

Enfin, des recherches du département EA, mobilisant des données satellitaires pour estimer la croissance et l'état nutritionnel azoté des cultures, ont contribué à la production de l'outil de pilotage des cultures FarmStar, conçu par Arvalis et Terres Inovia (Cetiom jusqu'en 2015) et déjà utilisé en 2013 sur plus de 600 000 ha, sur blé, orge et colza. En 2012, ces collaborations avec les instituts techniques ont incité l'Inra à créer l'UMT « Capteurs et télédétection pour la caractérisation de l'état et du fonctionnement des cultures » afin de développer ce type d'approches à la fois sur le plan scientifique et sur le plan technologique. Ces derniers acquis illustrent les apports conjoints de l'agronomie et de la bioclimatologie à cette problématique.

La diffusion et ses médiateurs

Le déploiement de ces outils a été largement accompagné par les organismes de développement (instituts techniques, chambres d'agriculture) et les opérateurs économiques (laboratoires d'analyse, coopératives), avec lesquels l'Inra a toujours entretenu des relations étroites sur cette thématique. Les thèses cofinancées en sont l'un des vecteurs importants : sur la trentaine de thèses touchant à la fertilisation réalisées à l'Inra entre 1985 et 2014, 17 ont été réalisées en collaboration, essentiellement avec des instituts techniques et avec des industriels (thèses Cifre en particulier).

Le déploiement des méthodes et outils s'est appuyé sur un partenariat très structuré avec ces organismes, qui ont largement contribué à la mise au point des versions opérationnelles des outils et formé les utilisateurs. La coordination des acteurs du champ de la fertilisation est jusqu'ici assurée par deux structures dans lesquelles l'implication des chercheurs et ingénieurs du département EA est forte et couvre une large palette de disciplines :

– le Comifer, créé en 1980, qui regroupe les administrations publiques, la recherche, l'enseignement, les organisations professionnelles agricoles, les industriels de la fertilisation et les structures de distribution. Son objectif est de mettre à la disposition de l'agriculteur le moyen de gérer, de façon rationnelle et économe,

165. Limaux F., Meynard J.-M., Recous S., 2001. Déclencher la fertilisation azotée du blé : bases théoriques et principes généraux : le témoin « double densité ». *Perspectives agricoles*, 273, 62-70.

166. Ravier C., Jeuffroy M.H., Gate P., Cohan J.P., Meynard J.M., 2017. Combining user involvement with innovative design to develop a radical new method for managing N fertilization. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 110, 117-134, DOI: 10.1007/s10705-017-9891-5.

167. Ramanantenasoa M.M.J., Gilliot J.M., Mignolet C., Bedos C., Mathias E., Eglin T. *et al.*, 2018. A new framework to estimate spatio-temporal ammonia emissions due to nitrogen fertilization in France. *Science of the Total Environment*, accepté juin 2018, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.202.

la fertilité de son sol, tant sur l'azote que sur l'ensemble des minéraux (Guide de la fertilisation raisonnée, Comifer, 2017) ;

– le groupement « Fertilisation raisonnée », créé en 2005, visait à coordonner les recherches sur la fertilisation. Devenu en 2007 Réseau mixte technologique fertilisation et environnement¹⁶⁸ en réponse à l'appel à proposition du ministère de l'Agriculture (DGER), et comportant 34 partenaires actuellement, son objectif est d'améliorer la connaissance et la gestion des cycles biogéochimiques des éléments minéraux en agriculture, et les outils de raisonnement de la fertilisation. Ce groupement et ce RMT ont porté la mise au point et l'évolution de deux outils réalisés par l'Inra avec divers partenaires du développement, les logiciels AzoFert[®] et Syst'N[®] (encadrés 13.2 et 13.3).

Depuis la création de l'Inra, la fertilisation a donc été un domaine d'application important pour des recherches en agronomie, science du sol, écophysologie et bioclimatologie. En parallèle, la fertilisation a connu de fortes évolutions dans ses pratiques, conduisant à une diminution de l'utilisation d'engrais, notable pour P et K, moindre pour l'azote. Le département EA a fortement accompagné cette évolution, au sein de laquelle l'agronomie a été à la fois à l'origine de la démarche

Encadré 13.2. AzoFert[®], un outil d'aide à la décision pour la fertilisation azotée des cultures

Sylvie Recous, Pascal Dubrulle

AzoFert[®] permet de faire des recommandations pour plus de 60 cultures de plein champ. Cet outil est basé sur un bilan d'azote minéral complet à partir de la mesure ou d'une estimation d'un reliquat d'azote minéral du sol sur la période comprise entre l'ouverture du bilan (date de prélèvement du reliquat) et la fermeture du bilan, généralement à la récolte de la culture fertilisée. L'outil calcule la dose totale d'azote à apporter en équilibrant le besoin total de la culture et l'ensemble des fournitures. Une originalité de l'outil est qu'il intègre une modélisation dynamique de ces fournitures d'azote provenant du sol et de diverses sources organiques. Les facteurs température et humidité du sol sont modélisés afin de convertir les données exprimées en jours calendaires en nombre de « jours normalisés ».

AzoFert[®] a été testé sur un large éventail de conditions pédoclimatiques et culturales pour les céréales, la betterave sucrière et les cultures légumières en France. L'évaluation multi-locale d'AzoFert[®] et son utilisation par les laboratoires et les services de conseils aux agriculteurs dans plusieurs régions ont permis d'adapter les paramètres du logiciel à la diversité des situations agricoles, comme celles rencontrées dans les sols limoneux de Picardie et de la région Centre, dans les sols calcaires de Champagne mais aussi en Belgique et en Suisse. AzoFert[®] peut être utilisé de différentes manières, telles qu'un usage de conseil réalisé par les laboratoires d'analyses de sol auprès des agriculteurs avec remplissage d'une fiche de renseignements ou *via* une plateforme web pour chaque parcelle ou ensemble de parcelles de l'exploitation. Il a aussi été intégré dans des travaux de recherche en vue d'une adaptation à des cultures pérennes (projet N'Pérennes), ou dans l'enseignement pour un usage pédagogique (projet N'Edu). AzoFert[®] est conçu pour intégrer de nouvelles références pour les paramètres et les variables d'entrée. AzoFert[®] est une copropriété de l'Inra, du Laboratoire départemental d'analyses et de recherche de l'Aisne (LDAR) et de l'Institut technique de la betterave (ITB). Le LDAR possède la licence d'exploitation du logiciel et donne accès aux calculs *via* un service web (Webazolims).

168. <http://www.rmt-fertilisationetenvironnement.org/>.

Encadré 13.3. Syst'N[®], un outil de diagnostic des pertes d'azote dans les systèmes de culture

Sylvie Recous, Virginie Parnaudeau, Pascal Dubrulle

Syst'N[®] a été développé au sein du réseau français RMT Fertilisation et environnement, en partageant les connaissances sur les flux d'azote dans les systèmes agricoles entre agronomes et acteurs de la gestion de l'azote en agriculture. Cet outil comprend un modèle simulant la dynamique de l'azote dans les systèmes cultivés pour calculer les pertes d'azote à l'échelle temporelle de la succession de cultures, et des interfaces graphiques conviviales. L'outil comprend également une base de données (PertAzote) en cours de développement, capitalisant les données simulées par le modèle et/ou des données observées dans le cadre d'expérimentations. Le modèle biophysique est un modèle sol-culture 1D. Il simule les transformations de l'azote (N) du sol, la croissance des cultures et l'absorption d'azote, le bilan hydrique et les pertes d'azote dans l'eau (NO₃⁻) et dans l'air (NH₃, N₂ et N₂O) sur un pas de temps journalier. Les données d'entrée comprennent la description des successions de cultures, les pratiques agronomiques (fertilisation azotée, irrigation et travail du sol), le sol et le climat. Le modèle biophysique a été évalué pour diverses cultures (blé, orge, maïs, pois, colza, luzerne et tournesol) et cultures intermédiaires (moutarde blanche, ray-grass). Les formalismes de Syst'N[®] combinent des sous-modèles existants déjà publiés : Stics pour les bilans hydrique et nitrique des sols, Azofert[®] pour la minéralisation des sols et des résidus de culture, Azodyn pour l'absorption d'azote par les cultures, NOE pour les émissions de N₂ et N₂O et Volt'Air pour les émissions de NH₃. Ces modèles ont été choisis pour fonctionner avec des données d'entrée qui sont généralement disponibles pour les utilisateurs finaux identifiés. En 2018, le simulateur Syst'N[®] regroupe en France une trentaine d'utilisateurs actifs : les conseillers agricoles, les responsables environnementaux des bassins versants ou des zones de protection de l'eau et les services de développement agricole utilisent principalement Syst'N[®] pour évaluer les pertes de nitrates vers les aquifères à l'échelle du paysage et concevoir de nouveaux systèmes de culture à faible émission d'azote. Syst'N[®] est aussi mobilisé pour des projets de recherche ou recherche-développement sur l'évaluation environnementale de systèmes agricoles à l'échelle du territoire. Une utilisation émergente est celle en enseignement agronomique et agricole et formation continue, en raison des propriétés pédagogiques de l'outil. Syst'N[®] continue d'évoluer pour prendre en compte davantage d'espèces cultivées comme les légumineuses (ex. : luzerne), et les systèmes complexes incluant les cultures associées ou les pratiques en agriculture biologique.

et médiatrice pour permettre l'inclusion des apports des autres disciplines et leur appropriation par les acteurs avertis de l'agriculture. Les autres disciplines ont apporté une autre vision, voire un changement de paradigme, fondamental dans ces évolutions.

► Vers des approches plus englobantes des cycles des éléments pour conjuguer agronomie et environnement

Par nature, prendre en compte les problèmes environnementaux nécessite d'élargir le champ de vision de l'agronomie et de replacer la parcelle et l'exploitation agricole dans ses relations avec les eaux et l'atmosphère, ainsi que dans le paysage pour prendre en compte les relations de proximité et les transferts d'éléments au sein des zones agricoles et avec les zones non agricoles, qu'elles soient forestières, semi-naturelles, urbaines ou périurbaines. Bénéficiant de compétences multiples non seulement en agronomie, mais aussi en matière de transfert et

transformations dans l'environnement (hydrologie, sciences de l'atmosphère, biogéochimie, microbiologie...) et de spatialisation (de la télédétection et modélisation du profil de sol, 2D, au paysage, 3D), le département EA a pu dépasser l'échelle de la parcelle pour étudier les cycles du carbone, de l'azote et du phosphore à l'échelle du système de production, du paysage, jusqu'au niveau mondial.

Une intégration de plus en plus large des cycles de l'azote, du potassium et du soufre et des disciplines concernées

La polyculture-élevage a longtemps été le modèle d'exploitation agricole le plus répandu en Europe, les entrées d'azote se faisant par les légumineuses (herbacées prairiales ou à graines) et le recyclage par l'épandage des déjections animales pour fertiliser les cultures. La disponibilité des engrais industriels N et P a conduit non seulement à une forte intensification, mais aussi à une simplification et à une spécialisation croissante des systèmes de production. Cette évolution s'est aussi accompagnée d'une concentration des types de production sur des territoires de plus en plus spécialisés : grands bassins céréaliers, élevage-polyculture en zone de plaine, les zones moins cultivables (montagnes, zones humides ou séchantes) restant en élevage extensif. On imagine donc bien derrière ces transformations une forte augmentation des flux d'éléments, liée à une augmentation des intrants, localement ou globalement, et dont la nature est variable selon les systèmes de productions et leur spécialisation, par exemple des flux d'ammoniac importants pour des systèmes d'élevage hors-sol avec lisier.

Les productions animales jouent ici un rôle particulier, car le métabolisme de l'animal découple l'azote et le carbone présents dans les végétaux (fourrages consommés au champ ou en bâtiment, grains, aliments élaborés) pour produire de l'urine riche en N sous une forme très labile, l'urée (et en K), tandis que les fèces contiennent l'essentiel du P et du carbone (figure 13.4). Les pertes par volatilisation d'ammoniac, en bâtiments puis lors des épandages de lisiers et fumiers, sont alors importantes et rapides, partiellement maîtrisables par certaines techniques de stockage et d'épandage. Pour les herbivores au pâturage, la séparation entre urine et fèces est totale. Les bouses sont généralement bien décomposées par une faune coprophage qui disperse ses composantes. Le recouplage des cycles de l'azote et du carbone est effectué par la plante et la microflore du sol (figure 13.4) : l'urine s'infiltre rapidement dans le sol, ce qui limite la volatilisation, et l'azote peut être rapidement utilisé par des plantes prairiales si celles-ci sont peu fertilisées. L'hétérogénéité des dépôts de pissats, représentant des apports localement très forts (variant de 100 à 900 unités d'azote/ha), limite cependant leur recyclage et peut générer des lixiviations de nitrate et de la volatilisation d'ammoniac élevées, surtout en cas de chargement excessif ou de pâturage tardif en saison.

Dans tous les cas, la limitation des pertes passe surtout par l'ajustement des apports alimentaires aux animaux pour limiter les quantités d'éléments dans les déjections animales, et par l'ajustement, dans l'espace et le temps, des apports conjoints de N et P labiles par les effluents d'élevage et les engrais de synthèse aux besoins des prairies et des cultures. Ceci implique une bonne gestion des déjections animales (donc une capacité de stockage adaptée), du pâturage, ainsi que des intercultures, en évitant les sols nus en période de drainage lorsque les sols sont riches en nitrate et/ou en phosphore soluble. Pour les autres formes de phosphore, entraînées par ruissellement ou avec l'érosion des sols, les haies et autres dispositifs faisant

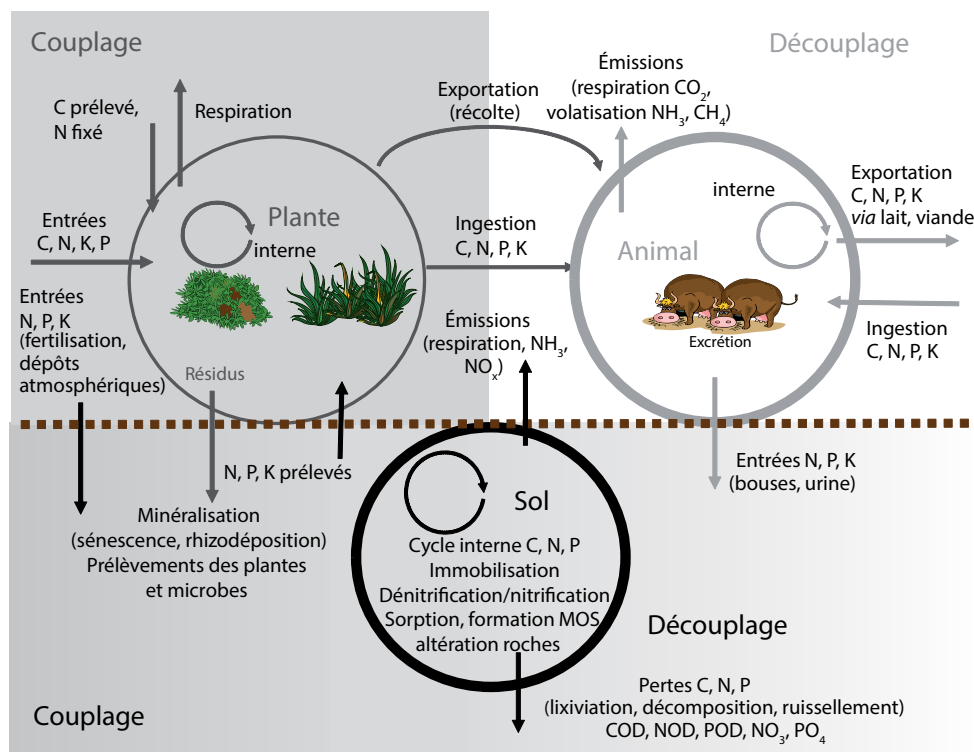


Figure 13.4. Cycle C-N-P dans un système prairial montrant les couplages et découplages entre nutriments, les flux et les processus sous-jacents.

COD : carbone organique dissous ; NOD : azote organique dissous ; POD : phosphore organique dissous.

obstacle à leur circulation dans les versants sont les principaux moyens pour limiter les pertes et leur arrivée dans les eaux de surface. Ces actions sont particulièrement cruciales dans les zones sensibles où l'eutrophisation est rapide. Tel est le cas, par exemple, des lacs de montagne et des rivières (phosphore) et de certaines zones côtières très propices au développement d'algues, comme les baies « algues vertes » en Bretagne (azote). La création du département EA a contribué à mieux appréhender ces systèmes complexes par l'association de disciplines qui a permis de traiter à des niveaux semblables l'ensemble des processus impliqués (ex. : transformation des matières organiques dans les sols, absorption des éléments nutritifs par la plante, lixiviation, volatilisation, transformations microbiennes) et des risques associés en lien avec le raisonnement agronomique et leur intégration à l'échelle de la parcelle jusqu'au système de production. Cette vision intégratrice a favorisé la rencontre avec les partenaires des sciences animales de l'Inra, des instituts techniques et des chambres d'agriculture. Les concepts et les outils ont pu à leur tour être utilisés dans des recherches participatives avec des partenaires professionnels (ex. : agriculteurs, gestionnaires des territoires) en tant qu'outils permettant de simuler les effets de scénarios agricoles¹⁶⁹ (changement de pratiques ou de systèmes de production) ou paysagers. Par exemple, le modèle Casimod'N est adapté à la problématique « algues vertes » en Bretagne, puisqu'il permet de simuler non seulement les changements de pratiques, mais aussi des changements importants des systèmes d'exploitation (simulation des itinéraires techniques, des plans d'assolement et d'épandage).

169. <https://www6.inra.fr/asirpa/Les-cas-etudes/Etudes-de-cas/Environnement-Agronomie> (gestion de la pollution d'origine agricole en Bretagne).

Du cycle de l'azote à la cascade de l'azote à l'échelle du paysage

L'azote et le phosphore réactifs, perdus depuis les sols agricoles mais aussi depuis les bâtiments d'élevage, circulent dans différents milieux (air, eaux, sols, écosystèmes) où ces éléments peuvent être stockés, mais vont surtout y être transformés, par le biais de processus chimiques et microbiologiques, en diverses formes (figure 13.5). Pour l'azote, pris ici comme illustration car il est mobile dans l'ensemble des compartiments sous différentes formes chimiques, Galloway *et al.* (2003)¹⁷⁰ ont introduit le concept de « cascade de l'azote », qu'ils définissent comme le transfert séquentiel de l'azote dans les systèmes environnementaux, s'accompagnant de transformations en différentes formes d'azote réactif et ses conséquences en termes d'impacts. Ainsi par exemple des pertes d'ammoniac par volatilisation, consécutive à des apports d'effluents d'élevage, peuvent contribuer directement à l'acidification ou à l'eutrophisation des écosystèmes proches ou produire, par réaction chimique avec les composés acides atmosphériques, des aérosols néfastes pour la santé humaine. De même, l'azote sous forme d'ammoniac ou de nitrate, transféré vers d'autres écosystèmes par voie atmosphérique ou hydrologique, respectivement, peut conduire à la formation de protoxyde d'azote (GES) lorsqu'il y rencontre des conditions plus favorables à la dénitrification que sur les champs agricoles où il a été épandu. En termes de gestion des cycles, la notion de cascade (applicable aussi à d'autres éléments que l'azote) fait apparaître la nécessité de « garder le contrôle » des éléments et d'anticiper la circulation de l'azote dans la chaîne des activités agricoles et d'élevage, parfois en lien avec d'autres activités (ex. : traitement des eaux et des déchets), pour chercher à récupérer et recycler les nutriments. Elle renforce l'idée d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'azote¹⁷¹ en agriculture à différents niveaux d'intégration et d'échelle (de la parcelle au territoire). Cela passe par un meilleur ajustement des apports aux besoins des plantes et des animaux en raisonnant sur l'ensemble de la chaîne d'utilisation de l'azote, notamment dans les liens entre productions végétales et animales. Dans les deux cas, un meilleur recyclage de l'azote organique est un levier essentiel.

On voit donc que cette nouvelle vision amène à mobiliser un large spectre de disciplines et d'approches tant conceptuelles qu'expérimentales ou de modélisation. Au-delà des disciplines engagées dans une meilleure maîtrise du cycle de l'azote à l'échelle de la parcelle (agronomie, science du sol, bioclimatologie), cette vision mobilise les approches qui permettent de « suivre » l'azote réactif et ses transformations et de le gérer à des échelles supérieures (hydrologie des petits et grands bassins versants, sciences de l'atmosphère, biogéochimie). Étant donné la complexité et la diversité des milieux concernés (sols, eaux, atmosphère, écosystèmes), le recours à la modélisation est essentiel, et celle-ci a dû être fortement renouvelée. Le département EA, et plus généralement l'Inra, ont pu se positionner rapidement dans ce nouveau champ à l'échelle des paysages agricoles grâce à la présence d'une grande partie des disciplines pertinentes dans les domaines des transferts par voie hydrologique et atmosphérique et des approches en biogéochimie, mais aussi grâce à la capacité d'intégrer le fonctionnement de l'exploitation agricole (du point de vue des flux d'éléments) et des méthodes et moyens

170. Galloway J.N., Aber J.D., Erisman J.W., Seitzinger S.P., Howarth R.W., Cowling E.B., Cosby B.J., 2003. The nitrogen cascade. *Bioscience*, 53 (4), 341-356.

171. Rapport entre les quantités d'azote exportées dans les produits agricoles, végétaux ou animaux et celles qui sont apportées (engrais, aliments...).

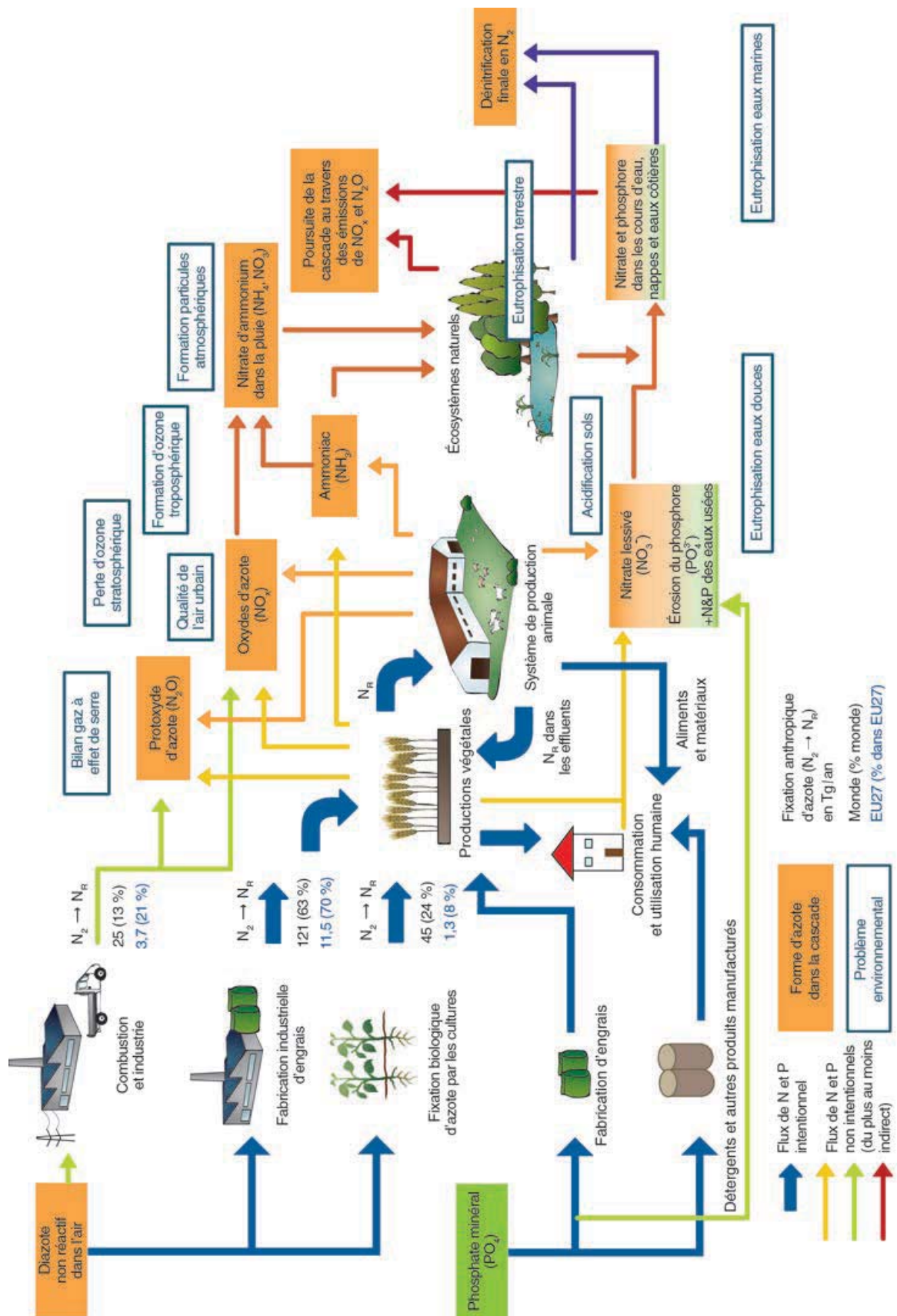


Figure 13.5. Représentation de la cascade de l'azote et des flux de phosphore et les impacts environnementaux associés.

expérimentaux pour traiter des questions scientifiques et des applications. Il est maintenant possible de simuler les effets d'aménagements d'espaces ou de linéaires non agricoles (haies, fossés, bandes enherbées) et de conversion de surfaces agricoles utiles en usage non agricole (forêts ou prairies non fertilisées fauchées) sur l'évolution de la qualité de l'eau, en intégrant les aspects spatio-temporels de la cascade de l'azote¹⁷² et, de mieux en mieux, de la dynamique du phosphore. L'intégration territoriale multi-éléments est en cours dans les études menées par des unités du département EA en lien avec des partenaires académiques en France et en Europe. L'implication des partenaires agricoles est plus récente, cette vision des cycles ne faisant pas partie, jusqu'à un passé récent, de leur champ d'activité traditionnel. Cette échelle offre de nouvelles complémentarités entre cultures et élevage pour le recyclage et la valorisation de l'azote et du phosphore¹⁷³, et donne un nouveau cadre de raisonnement pour éviter les transferts de pollution entre éléments biogéochimiques ou entre leurs diverses formes actives. Il faut également souligner que la plupart des considérations évoquées ici, surtout pour l'azote, sont transposables à d'autres éléments majeurs (P, K, S), en adaptant leurs caractéristiques de mobilité, de réactivité et de gestion.

Tout aussi importantes, les infrastructures d'expérimentation et d'observation sont des lieux où il est possible d'appréhender ces questions scientifiques grâce à des approches pluridisciplinaires à différentes échelles, à la fois sur les processus élémentaires des cycles (ex. : utilisation par la plante, liens aux matières organiques de sols), comme dans les observatoires de recherche ACBB (Agriculture, cycles biogéochimiques et biodiversité) et PRO (Produits résiduels organiques), et sur des processus spatiaux (bassins versants, zones-ateliers) concernant le devenir de l'azote (voir chapitre 8).

Des approches déclinables à des échelles plus larges

En plus de recourir à des quantités croissantes d'engrais de synthèse, et de générer des fuites vers l'environnement dont les transformations et les impacts peuvent être appréhendés par la notion de cascade, l'évolution des systèmes agro-alimentaires mondiaux après-guerre et la spécialisation croissante des systèmes de production ont été associées à une augmentation concomitante des échanges commerciaux (fertilisants, produits végétaux ou animaux, bruts ou transformés), parfois sur de très longues distances. En Europe de l'Ouest, le développement de systèmes d'élevage intensifs s'est ainsi accompagné d'un accroissement considérable des importations de soja (et maïs) en provenance d'Amérique du Sud. Ces mouvements de matière liés aux échanges commerciaux inter-régionaux ou internationaux donnent lieu à des flux associés d'éléments minéraux et à des transferts de fertilité entre régions et continents. L'analyse des flux de P à l'échelle de la France et de ses régions a ainsi montré qu'une large part du bilan P excédentaire des sols bretons provenait non pas des engrais minéraux, mais des importations d'aliments pour animaux (figure 13.6). Pour rendre compte de ces flux liés aux activités humaines, impliquant d'autres secteurs que l'agriculture (ex. : transformation et transport des produits agroalimentaires, traitement des eaux usées et recyclage des

172. Voir par exemple le projet européen NitroEurope (<http://www.nitroeuropa.eu/>) et les projets ANR Acassya (<https://www6.inra.fr/acassya>) et Escapade (<https://www.n-escapade.fr/>).

173. Voir par exemple le projet européen Cantogether, https://cordis.europa.eu/project/rcn/101746_en.html.

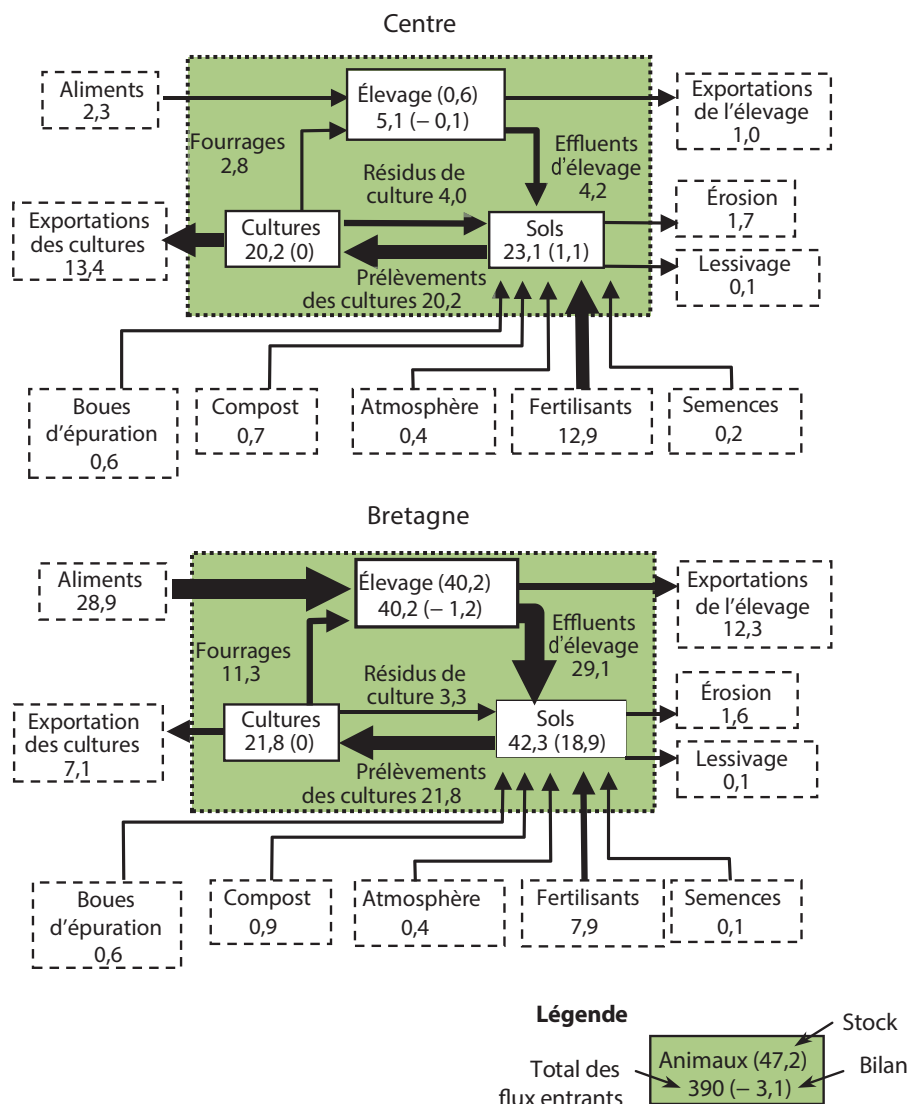


Figure 13.6. Stocks, flux et bilan P des sols de deux régions françaises (Centre et Bretagne). Moyennes de stocks (kt P) et flux (kt P/an) sur la période 2002-2006. D'après Senthilkumar K., Nesme T., Mollier A., Pellerin S., 2012. Regional-scale phosphorus flows and budgets within France: the importance of agricultural production systems. *Nutrient Cycl. Agroecosyst.*, 92, 145-159.

déchets), des cadres d'analyse ont été empruntés au domaine de l'écologie industrielle (ex. : *substance flow analysis*). Un enjeu pour l'avenir sera de développer des modèles dynamiques et spatialement explicites, permettant d'associer des flux de matières et d'éléments minéraux pour différents scénarios d'organisation du système agroalimentaire et des autres secteurs, à différentes échelles, jusqu'au niveau mondial. Cela suppose le développement de nouvelles approches de modélisation, en mobilisant fortement les sciences économiques et sociales.

► Gestion durable des flux d'éléments dans les agroécosystèmes

Des cycles fortement connectés

Du fait d'enjeux associés différents, et parce que les principaux processus gouvernant leurs dynamiques ne sont pas les mêmes, les recherches sur l'azote

d'une part, sur le phosphore et le potassium d'autre part, ont été pendant longtemps conduites de manière disjointe. La dynamique de l'azote est majoritairement gouvernée par des processus biologiques (ex. : minéralisation, organisation microbienne, nitrification), alors que celle du potassium dépend exclusivement de processus physico-chimiques (ex. : adsorption, désorption), le phosphore et le soufre représentant une situation intermédiaire. Mais une disponibilité déséquilibrée entre ces éléments affecte le fonctionnement des écosystèmes, surtout en conditions limitantes pour l'un ou l'autre des éléments. La majorité des études sur le couplage entre les cycles (approche d'écologie stœchiométrique) sont centrées sur des écosystèmes naturels (prairies, forêts, savanes). La question se pose donc de savoir si ces études sont également importantes et transposables pour les agro-écosystèmes. On peut aisément imaginer que la question de l'équilibre entre les apports de différents éléments n'a pas lieu d'être dans des milieux très fertilisés dans lesquels les cycles des éléments sont découplés. Cependant, dans le contexte de l'agroécologie, et plus spécifiquement d'une diminution des intrants avec pour idée générale que les agroécosystèmes pourraient participer à une gestion durable des cycles biogéochimiques de l'azote, du phosphore et du carbone, au même titre que les écosystèmes considérés comme « naturels », la réduction de la dépendance aux intrants des agroécosystèmes passe par un recouplage nécessaire des cycles C-N-P. Par exemple, en présence de faibles ressources, les plantes peuvent adapter leur stratégie d'acquisition des nutriments en modifiant les allocations de C et, en retour, leur impact sur leur environnement. De même, caractériser le rôle du soufre dans l'amélioration de la résistance des cultures aux stress (ex. : eau, pathogènes) et dans la valorisation de l'azote disponible (couplage étroit entre N et S) permet d'éviter la carence en S et d'améliorer la productivité tout en réduisant les émissions azotées.

Le couplage du cycle de l'azote avec celui du carbone s'est rapidement avéré incontournable du fait de processus clés associés au fonctionnement microbien dans les sols, au fonctionnement de la plante et de l'animal (élevage) impliquant des interactions entre les deux éléments (ex. : minéralisation-organisation de l'azote au cours de la décomposition des matières organiques), mais les interactions avec d'autres éléments ont été peu étudiées. Sur P et K, l'effort de recherche a beaucoup porté sur la compréhension des mécanismes physico-chimiques de mobilisation-transport dans la rhizosphère. Malgré l'ampleur des connaissances acquises, cet effort n'a pas réellement permis de renouveler les indicateurs utilisés en routine par les laboratoires pour caractériser la disponibilité en P et K des sols. Des progrès sur le mode de raisonnement de la fertilisation P et K ont été proposés, et leur adoption a abouti à une réduction significative des doses, mais celui-ci reste fondamentalement basé sur la notion de courbe de réponse et la détermination de valeurs seuils à atteindre et/ou à maintenir dans le sol pour que la disponibilité en P et K soit non limitante.

Dans un contexte où l'objectif principal assigné à la fertilisation était de satisfaire les besoins des cultures en complétant l'offre du sol par des apports d'engrais minéraux, la disjonction des cadres de raisonnement relatifs à chacun des éléments ne posait pas de problème majeur. L'usage massif d'engrais minéraux N-P-K et la forte disponibilité des nutriments dans les sols qui en résultait permettaient de s'affranchir de l'étude des interactions entre éléments, puisque ce niveau élevé de disponibilité limitait fortement ces interactions. En revanche, en prairie et dans les

zones d'élevage utilisant des engrais organiques, cette approche disjointe des différents éléments s'est vite avérée insuffisante. Une première étape a été de prendre en compte les apports d'éléments minéraux par les produits organiques, en tenant compte de leur cinétique de libération (ex. : immédiate pour K, fonction d'interactions C/N complexes pour N). Cependant, le rapport N/P des effluents d'élevage étant généralement plus faible que celui des végétaux, un calcul de la quantité à apporter basé sur N conduit à une accumulation de P dans le sol. Réciproquement, un apport d'engrais organiques calculé sur la base du P conduit à proposer un apport d'azote minéral de complément, ce qui est paradoxal dans un contexte d'excédents structurels en N et P du fait d'une forte densité d'élevage à l'échelle régionale. L'évolution du contexte visant à réduire l'usage des engrais de synthèse et les limites de l'approche mono-élémentaire ont favorisé l'émergence de deux domaines de recherches, en partie liés :

- le recyclage des produits organiques : à l'Inra, la mise en place d'un dispositif national dédié, l'ORE PRO¹⁷⁴ (pour « produits résiduels organiques »), est illustrative de l'effort de prise en charge de cette problématique (voir chapitre 17) ;
- un effort d'analyse des interactions entre les cycles des différents éléments (C, N, P, K, S...), comme par exemple l'effet de la disponibilité en P sur le cycle de l'azote *via* la fixation symbiotique par les légumineuses.

Dans un contexte de réduction des intrants, et d'augmentation concomitante des services demandés à l'agriculture (ex. : stocker du carbone dans les sols pour atténuer le changement climatique), l'étude des interactions entre cycles devient encore plus nécessaire. Compte tenu du rapport C/N de la matière organique du sol ($C/N \approx 10$) et de sa faible flexibilité stœchiométrique, une augmentation de 4 pour mille par an du stock actuel de C (environ 200 kg de C pour un stock initial de 50 t par ha) suppose un stockage concomitant de 20 kg de N. Fournir cet azote par un apport supplémentaire d'engrais irait à l'encontre de l'objectif de réduction de leur usage, et d'autres leviers sont à l'évidence préférables (ex. : réduction des pertes, augmentation de la fixation symbiotique). La prise en compte des interactions entre cycles apparaît ainsi incontournable lors de la conception et de la mise au point de systèmes agroécologiques.

Vers des systèmes de culture à bas intrants et/ou valorisant mieux les interactions entre espèces

L'agriculture française (et européenne) est actuellement placée face au défi de produire plus pour satisfaire les besoins croissants de la population mondiale mais sans dégrader l'air, les eaux et les sols, de produire une nourriture saine et diversifiée mais sans augmentation notable des prix. Ce contexte à haut risque pour les exploitants peut aussi offrir des opportunités de transformation vers des systèmes agricoles plus durables, moins consommateurs en intrants N et P. Lors de l'intensification des systèmes de production au xx^e siècle, des agriculteurs et des chercheurs ont anticipé les conséquences négatives des évolutions en cours et exploré des modes de production plus autonomes et économes beaucoup moins consommateurs d'intrants, souvent basés sur la fixation symbiotique pour l'entrée d'azote dans les systèmes et sur le recyclage pour N et P. À la même époque, des systèmes traditionnels complexes associant plusieurs cultures, parfois plusieurs étages de

174. <https://www6.inra.fr/qualiagro/Nos-partenaires/Le-reseau-SOERE-PRO>.

végétation et développés sur d'autres continents (Amérique du Sud et centrale, Asie du Sud-Est), ont formalisé certains des principes de l'agroécologie. Les recherches conduites dans le département EA s'emparent de plus en plus de ces bases agronomiques et écologiques pour l'étude de systèmes mobilisant des choix de rotations et d'espèces et des techniques culturales appropriés en vue de mieux mobiliser les ressources naturelles pour la nutrition (voir chapitre 14) et la protection des cultures et de mieux explorer les capacités du milieu. Les intercultures peuvent jouer un rôle de production (ex. : fourrages) ou de précédent favorable pour assurer une fourniture en N (P dans une moindre mesure) aux cultures suivantes.

De façon générale, la qualité biologique des sols et la préservation de leur matière organique sont devenues des sujets d'étude essentiels à l'Inra, et en particulier dans le département EA, tout comme la conception et l'évaluation de systèmes de culture innovants intégrant les risques pour l'environnement associés aux nutriments. Ces approches mobilisent également les sciences sociales, souvent à l'échelle de territoires, autour d'une expertise agronomique sur l'étude des cycles biogéochimiques et la mise au point d'outils d'aide à la décision pour la fertilisation.

Toutes ces orientations posent de nouveaux défis aux approches développées jusqu'ici qui, si les principes de base restent souvent valables, devront être éprouvées dans des systèmes à faibles niveaux d'intrants, donc avec des flux attendus faibles, et où la composante biologique devra être davantage prise en compte. De nouvelles références expérimentales restent à acquérir dans nombre de ces systèmes.

► Conclusion

Les travaux de recherche sur les cycles biogéochimiques ont fortement évolué depuis vingt à trente ans. Tout en maintenant des points forts autour du raisonnement de la fertilisation, associant souvent des partenaires du développement agricole, la vision de l'Inra s'est progressivement davantage orientée vers les problématiques environnementales, en lien avec les perturbations de ces cycles provoquées par l'action anthropique, et vers la prise en compte d'échelles plus larges. Dans le contexte général de l'évolution des systèmes de production agricoles, les compétences réunies au sein des unités du département EA ont permis d'opérer une synergie entre agronomie, science du sol, biogéochimie, hydrologie et bioclimatologie pour répondre à ces nouveaux enjeux. Cette évolution s'est également appuyée sur des collaborations avec d'autres départements de l'Inra tels Phase, SAD et BAP, ainsi que sur des collaborations construites sur le long terme avec nos partenaires académiques au sein de nos UMR (écoles d'agronomie, universités, Cirad, CNRS, etc.) et du développement agricole.

Cette synergie a pu se construire grâce au choix fait par l'Inra de maintenir un dispositif très intégratif et collectif, largement pluridisciplinaire, dans les domaines de la production agricole et de l'environnement, contrairement à la plupart des établissements de recherche européens et même dans le monde. L'Inra, à travers ses équipes et ses partenariats, s'est ainsi positionné de manière particulièrement forte grâce à la gamme des compétences qu'il rassemble autour de l'agronomie et de l'environnement, pour appréhender les enjeux environnementaux et agronomiques et les questions scientifiques et opérationnelles sur les grands cycles biogéochimiques en interaction avec les activités agricoles. Cette capacité est renforcée par les

interfaces que l'institut a su créer avec les acteurs agricoles concernés, en se nourrissant de leurs expériences et de leur expertise, en répondant à leurs questionnements, voire en les entraînant dans ces nouvelles voies. Ce positionnement a permis à l'Inra et en particulier au département EA de se positionner dans des consortiums d'une part par le biais de la modélisation intégrative de ces grands cycles dans le domaine de l'agriculture et de l'environnement terrestre, d'autre part par ses dispositifs expérimentaux à moyen (unités expérimentales) et long (Observatoires de recherche en environnement) termes.

De plus, par les nouvelles ouvertures vers les sorties environnementales, par son implication dans des expertises (locales, nationales et internationales) et grâce aux liens étroits avec les partenaires du développement agricole, l'étude des cycles des éléments majeurs est un domaine de recherche où la recherche agronomique a largement contribué à éclairer les acteurs des politiques publiques. Les travaux qui ont été conduits rendent notamment possibles des analyses englobant l'ensemble des impacts liés aux perturbations des cycles par les activités agricoles. Ils pourront aussi trouver de nouveaux champs de développements dans le domaine de la santé et de l'environnement.

Pour en savoir plus

Comifer (B. Colomb coord.), 2017. *Guide de la fertilisation raisonnée*, Éditions France agricole, 606 p.

Denoroy P., Dubrulle P., Vilette C., Colomb B., Fayet G., Schoeser M. *et al.*, 2004. REGIFERT, *Interpréter les résultats des analyses de terre*, coll. Techniques et Pratiques, Inra Éditions, Paris, 132 p.

Lemaire G., Carvalho P., Kronberg S., Recous S. (eds), 2018. *Agroecosystem Diversity: Reconciling Contemporary Agriculture and Environmental Quality*, Academic Press, Elsevier, 458 p.

Pellerin S., Butler F., Guiard-van Laethem C., 2014. *Fertilisation et environnement. Quelles pistes pour l'aide à la décision ?*, Acta/Éditions Quæ, Paris, 288 p.

Sutton M.A., Bleeker A., Howard C.M., Bekunda M., Grizzetti B., de Vries W. *et al.*, 2013. *Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution. Global Overview of Nutrient Management*, Centre for Ecology and Hydrology, Edinburgh, on behalf of the Global Partnership on Nutrient Management and the International Nitrogen Initiative, 128 p., <http://www.initrogen.org/publications/our-nutrient-world>.

Un renouvellement indispensable des paradigmes qui ont fondé la fertilisation des cultures en agronomie

Gilles Lemaire

D'une approche de type « pronostic » de la nutrition minérale des cultures conduisant à des excès de fertilisation...

L'étude de la nutrition minérale des cultures en agronomie a été fondée sur deux paradigmes essentiels : la loi « du facteur limitant »¹⁷⁵ et la loi « des rendements décroissants »¹⁷⁶. Ces lois ont permis de développer une approche de la fertilisation des cultures basée sur la formulation d'un « pronostic » de la réponse du rendement des cultures à des apports croissants d'éléments fertilisants par l'estimation du besoin des cultures et par la prévision de la fourniture des éléments dans le sol. Cette approche s'est avérée être *a posteriori* une simplification excessive du fait d'une prise en compte purement séquentielle des éléments nutritionnels limitants successifs considérés indépendamment les uns des autres ; de la vision binaire (limitant vs non limitant) de ces éléments, ignorant leur degré de co-limitation ; et des incertitudes d'un pronostic statistique de type « dose-réponse » pour définir la dose dite « optimale ».

Pour les éléments peu mobiles dans le sol comme le phosphore (P) et le potassium (K), ces pronostics ont été couplés aux analyses de sol afin de distinguer statistiquement des familles de courbes de réponse, donnant ainsi lieu à une abondante recherche en physico-chimie mais aboutissant souvent, pour les mêmes raisons liées à l'incertitude du pronostic, à des prescriptions souvent excédentaires : « apporter un peu trop pour être certain d'avoir assez ». Pour l'azote (N), la temporalité des besoins des cultures et de la minéralisation de la matière organique du sol a amené les agronomes à formaliser une écriture « prédictive » du bilan de N d'une culture¹⁷⁷. Là encore, cette approche de type pronostic, malgré les paramétrages contextuels qu'elle implique, aboutit en règle générale à des fertilisations excédentaires du fait de la surestimation systématique des rendements probables et donc du besoin réel de la culture.

... À une approche dynamique de type « diagnostic » permettant un meilleur ajustement

Les travaux de Lemaire et Salette¹⁷⁸ (1984) ont permis de développer une approche dynamique conjointe du prélèvement de N et de la croissance en matière sèche du peuplement végétal qui a abouti au concept de « courbe de dilution de N » et d'indice de nutrition N : INN (voir figure ci-après). Cette approche s'étant révélée pertinente pour un large spectre de cultures, il devenait alors possible d'établir un diagnostic d'état de nutrition N d'une culture en situation réelle en estimant directement *in situ* sa biomasse et sa teneur en N. Ainsi, d'une approche de pronostic soumise aux aléas de la prévision, on a pu passer à une approche de diagnostic prenant explicitement en compte le niveau de satisfaction du besoin réel des cultures dans des contextes précis et variés. Les deux variables clés, la biomasse de la culture et sa teneur en N, peuvent être estimées par les outils de la télédétection, ce qui ouvre la porte à des diagnostics « en temps réel » à haute résolution spatio-temporelle permettant un pilotage de la fertilisation azotée à différentes échelles (parcelle, exploitation, territoire, bassin versant, etc.) et pouvant déboucher sur des applications concrètes, notamment en agriculture de précision. Deux conséquences importantes concernant l'analyse des interactions génotype-milieu émergent de ce concept : d'une part, la co-régulation de

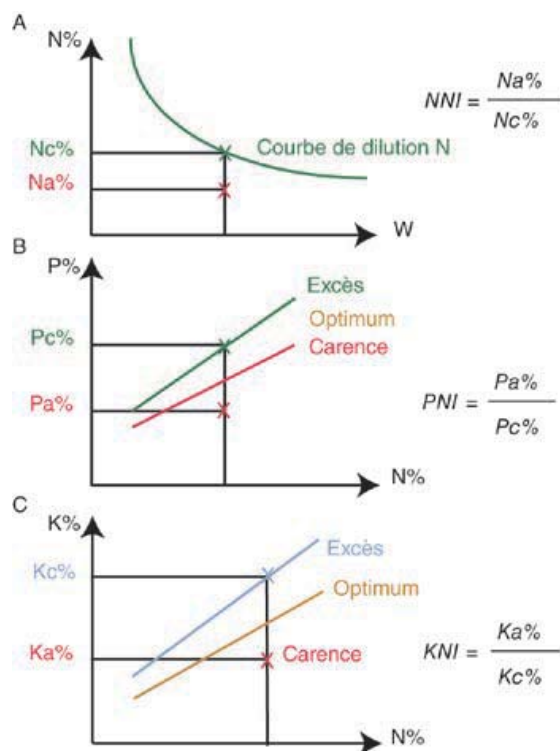
175. von Liebig J., 1855. *The relationship of chemistry to agriculture and the agriculture experiment of Mr J.B. Lawes*, 2nd edition, Braunschweig.

176. Mitscherlich E.A., 1924. *Die Bestimmung des Düngerbedürfnisses des Bodens*, Paul Parey, Berlin.

177. Rémy J.-C., Hébert J., 1977. Le devenir des engrais dans le sol. *Comptes Rendus de l'Académie d'agriculture de France*, 63, 700-710.

178. Lemaire G., Salette J., 1984. Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. II. Étude de la variabilité entre génotypes, *Agronomie*, 4, 431-436.

l'absorption de N à la fois par la disponibilité de N minéral dans le sol et par la capacité de croissance du peuplement végétal rend inopérante la notion même de disponibilité en N d'un sol, puisque celle-ci dépend en partie de propriétés inhérentes au peuplement lui-même ; et, d'autre part, l'efficacité d'utilisation de N par une culture s'accroît avec l'augmentation de biomasse de celle-ci (concept de dilution de N), ce qui revient à dire que les différences d'efficacité entre cultures, si elles existent, n'ont un sens que si on les compare à biomasse équivalente.



Détermination des indices de nutrition pour N, P et K utilisant (A) la courbe de dilution N critique, et (B et C) les relations N%-P% et N%-K%.

Sources : Lemaire G., Jeuffroy M.H., Gastal F., 2008. Diagnostic tool for plant and crop N status in vegetative stage. theory and practices for crop N management. *European Journal of Agronomy*, 28, 614-624 ; Salette J., Huché L., 1991. Diagnostic de l'état de nutrition minérale d'une prairie par l'analyse du végétal : principes, mise en œuvre, exemples. *Fourrages*, 125, 3-18.

Le concept de « dilution » fonctionne également pour le phosphore, le potassium et le soufre. Ainsi, un diagnostic global de la nutrition minérale d'une culture *in situ* peut être réalisé sur une base stœchiométrique permettant une analyse des interactions entre éléments. Ces diagnostics de nutrition N, P, K, etc., doivent permettre d'aboutir à un pilotage des apports de fertilisants au plus près des besoins correspondant aux niveaux de rendement objectifs, sans avoir à passer par des pronostics de réponse des cultures, trop soumis aux incertitudes prévisionnelles. Concilier nutrition minérale optimale des cultures et protection de l'environnement devient alors un objectif atteignable. Le défi se situe maintenant dans l'inclusion de ces concepts généraux dans des outils de diagnostics et d'aide à la décision utilisables au champ par les agriculteurs.