



HAL
open science

De la fertilisation des cultures à la cascade de l'azote

Pierre Cellier

► **To cite this version:**

Pierre Cellier. De la fertilisation des cultures à la cascade de l'azote. *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 2019, 9 (1), pp.13-17. hal-02648931

HAL Id: hal-02648931

<https://hal.inrae.fr/hal-02648931v1>

Submitted on 29 May 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

Juin 2019
volume n°9 / numéro 1
www.agronomie.asso.fr

Agronomie

environnement & sociétés



La revue de l'association française d'agronomie

Gestion de la fertilisation

Agronomie, Environnement & Sociétés

Revue éditée par l'Association française d'agronomie (Afa)

Siège : 16 rue Claude Bernard, 75231 Paris Cedex 05.

Secrétariat : 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2.

Contact : afa@inrae.fr, T : (00-33)4 99 61 26 42, F : (00-33)4 99 61 29 45

Site Internet : <http://www.agronomie.asso.fr>

Objectif

AE&S est une revue en ligne à comité de lecture et en accès libre destinée à alimenter les débats sur des thèmes clefs pour l'agriculture et l'agronomie, qui publie différents types d'articles (scientifiques sur des états des connaissances, des lieux, des études de cas, etc.) mais aussi des contributions plus en prise avec un contexte immédiat (débats, entretiens, témoignages, points de vue, controverses) ainsi que des actualités sur la discipline agronomique.

ISSN 1775-4240

Contenu sous licence Creative commons



Les articles sont publiés sous la *licence Creative Commons 2.0*. La citation ou la reproduction de tout article doit mentionner son titre, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue AE&S et de son URL, ainsi que la date de publication.

Directeur de la publication

Antoine MESSÉAN, président de l'Afa, Ingénieur de recherches, Inra

Rédacteur en chef

Olivier RÉCHAUCHÈRE, chargé d'études Direction de l'Expertise, Prospective & Etudes, Inra

Membres du bureau éditorial

Christine RAWSKI, Rédactrice en chef Cahiers Agricultures, Cirad

Guy TRÉBUIL, chercheur Cirad

Philippe PRÉVOST, Chargé des coopérations numériques à Agreenium

Danielle LANQUETUIT, consultante Triog et webmaster Afa

Comité de rédaction

- Marc BENOÎT, directeur de recherches Inra
- Héloïse BOURREAU, ingénieure à la Bergerie de Villarceaux
- Camille DUMAT, enseignante chercheuse à l'ENSAT/INPT
- Thierry DORÉ, professeur d'agronomie AgroParisTech
- Yves FRANCOIS, agriculteur
- Jean-Jacques GAILLETON, inspecteur d'agronomie de l'enseignement technique agricole
- Laure HOSSARD, ingénieure de recherche Inra Sad
- Marie-Hélène JEUFFROY, directrice de recherche Inra et agricultrice
- Aude JOMIER, enseignante d'agronomie au lycée agricole de Montpellier
- Christine LECLERCQ, professeure d'agronomie Institut Lassalle-Beauvais
- Francis MACARY, ingénieur de recherches Irstea
- Antoine MESSEAN, Ingénieur de recherches, Inra
- Adeline MICHEL, Ingénieure du service agronomie du Centre d'économie rurale de la Manche
- Marc MIQUEL, consultant
- Bertrand OMON, Chambre d'agriculture de l'Eure
- Thierry PAPILLON, enseignant au lycée agricole de Laval
- Philippe POINTEREAU, directeur du pôle agro-environnement à Solagro
- Philippe PRÉVOST, Chargé des coopérations numériques à Agreenium
- Bruno RAPIDEL, Cirad
- Jean-Marie SERONIE, consultant

Secrétaire de rédaction

Philippe PREVOST

Assistante éditoriale

Danielle LANQUETUIT

Conditions d'abonnement

Les numéros d'AE&S sont principalement diffusés en ligne. La diffusion papier n'est réalisée qu'en direction des adhérents de l'Afa ayant acquitté un supplément

(voir conditions à <http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/>)

Périodicité

Semestrielle, numéros paraissant en juin et décembre

Archivage

Tous les numéros sont accessibles à l'adresse <http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/>

Soutien à la revue

- En adhérant à l'Afa via le site Internet de l'association (<http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/>). Les adhérents peuvent être invités pour la relecture d'articles.
- En informant votre entourage au sujet de la revue AE&S, en disséminant son URL auprès de vos collègues et étudiants.
- En contactant la bibliothèque de votre institution pour vous assurer que la revue AE&S y est connue.
- Si vous avez produit un texte intéressant traitant de l'agronomie, en le soumettant à la revue. En pensant aussi à la revue AE&S pour la publication d'un numéro spécial suite à une conférence agronomique dans laquelle vous êtes impliqué.

Instructions aux auteurs

Si vous êtes intéressé(e) par la soumission d'un manuscrit à la revue AE&S, les recommandations aux auteurs sont disponibles à l'adresse suivante :

<http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/pour-les-auteurs/>

À propos de l'Afa

L'Afa a été créée pour faire en sorte que se constitue en France une véritable communauté scientifique et technique autour de cette discipline, par-delà la diversité des métiers et appartenances professionnelles des agronomes ou personnes s'intéressant à l'agronomie. Pour l'Afa, le terme agronomie désigne une discipline scientifique et technologique dont le champ est bien délimité, comme l'illustre cette définition courante : « *Etude scientifique des relations entre les plantes cultivées, le milieu [envisagé sous ses aspects physiques, chimiques et biologiques] et les techniques agricoles* ». Ainsi considérée, l'agronomie est l'une des disciplines concourant à l'étude des questions en rapport avec l'agriculture (dont l'ensemble correspond à l'agronomie au sens large). Plus qu'une société savante, l'Afa veut être avant tout un carrefour interprofessionnel, lieu d'échanges et de débats. Elle se donne deux finalités principales : (i) développer le recours aux concepts, méthodes et techniques de l'agronomie pour appréhender et résoudre les problèmes d'alimentation, d'environnement et de développement durable, aux différentes échelles où ils se posent, de la parcelle à la planète ; (ii) contribuer à ce que l'agronomie évolue en prenant en compte les nouveaux enjeux sociétaux, en intégrant les acquis scientifiques et technologiques, et en s'adaptant à l'évolution des métiers d'agronomes.

Lisez et faites lire AE&S !

Sommaire

7 AVANT-PROPOS

7 Avant-propos

A. MESSÉAN Président de l'AFA et O. RÉCHAUCHÈRE Rédacteur en chef

9 Éditorial

O. RÉCHAUCHÈRE et M.H. JEUFFROY, coordonnateurs du numéro



11 ENTREE EN MATIERE / PREAMBULE / CONTEXTE GLOBAL

13 De la fertilisation des cultures à la cascade de l'azote

P. CELLIER

19 ECLAIRAGES SUR LA GESTION ACTUELLE DE LA FERTILISATION DES CULTURES

21 Comparaison de la multifonctionnalité relative aux flux azotés induits par dix cultures de légumineuses

Maé GUINET - Bernard NICOLARDOT - Anne-Sophie VOISIN

31 Gestion de l'azote sur le blé biologique en Île-de-France

Charlotte GLACHANT

41 Rappels réglementaires sur l'utilisation des engrais et amendements organiques en agriculture biologique

Blaise LECLERC

43 LES NOUVELLES APPROCHES DE LA FERTILISATION

45 50 ans de méthode du Bilan : progrès passés et limites actuelles

Jean-Marc MEYNARD et Marie-Hélène JEUFFROY

55 Une nouvelle approche de la fertilisation des cultures

G. LEMAIRE

65 APPI-N : une nouvelle approche pour le raisonnement de la fertilisation azotée du blé

Marie-Hélène JEUFFROY, Clémence RAVIER, Arthur LENOIR, Jean-Marc MEYNARD

75 Mise au point du pilotage intégral de l'azote avec le modèle de culture CHN : approche « CHN-conduite »

B. SOENEN, M. BONNEFOY, C. DELPECH, B. PIQUEMAL, P. DESCAZEUX, F. DEGAN, F. LAURENT

87 Évaluation de la disponibilité et la gestion du phosphore dans les agrosystèmes : avancées scientifiques et techniques

Alain MOLLIER, Pascal DENOROY, Christian MOREL

99 Penser la gestion de l'azote autrement : témoignage sur le BAC du Tremblay-Omonville

Marine GRATECAP

105 Nouvelle approche de la fertilisation azotée pour répondre à de nouveaux enjeux : « revaloriser l'expertise agronomique des conseillers et des agriculteurs ».

Entretien avec Bertrand OMON

De la fertilisation des cultures à la cascade de l'azote

Pierre Cellier*

*Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR ECOSYS, 78850, Thiverval-Grignon, France

Résumé

Du fait de l'utilisation intensive d'engrais azotés depuis le milieu du XX^e siècle, le cycle de l'azote a été profondément modifié dans les agroécosystèmes et par effet de cascade, dans tout l'environnement des échelles locales (quelques hectares) à l'échelle globale. En effet, les excédents d'azote dans les agroécosystèmes induisent des fuites qui se dispersent et se transforment dans l'environnement où elles créent une diversité d'impacts sur les sols, les eaux, l'atmosphère, le climat, les écosystèmes et la santé. La cascade de l'azote est une approche de la dynamique de l'azote dans l'environnement qui permet de faire le lien entre l'utilisation de l'azote dans les agroécosystèmes et leurs impacts multiples sur l'environnement et la santé. Cette vision peut se décliner à toutes les échelles depuis la parcelle agricole jusqu'à l'échelle du globe, avec des focus souvent mis en avant aux échelles des paysages et des petits et grands bassins versants.

Abstract

Following an increase and intensification of nitrogen fertilizer use in the second half of the XX^e century, the nitrogen (N) cycle has been strongly modified in agroecosystems and in the environment at local (several hectares) to global scales. N inputs exceeding the crop or animal needs promote N losses from agriculture, where most of the reactive N is used, which are dispersed and transformed in the environment, thus creating a range of impacts on soils, waters, air, climate, ecosystems and health. The concept of N cascade describes the fate of N in the environment. It makes it possible to make the link between N use in agroecosystems and its impacts on the environment and health. This approach can be applied at a range of scales from the field plot to the global scale, the most common scales being the landscape and small or large watersheds.

Mots-clefs : cycle de l'azote ; impacts ; cascade de l'azote ; agroécosystèmes ; environnement ; santé

La fertilisation à la croisée des chemins entre alimentation et environnement

L'un des fondements de l'agriculture a été, de tout temps, d'apporter les éléments indispensables aux végétaux, tels que l'azote, le phosphore, le potassium ou le soufre, sous une forme facilement accessible pour la plante. Ces apports peuvent être exogènes (engrais minéraux, produits organiques) ou produits par l'insertion de légumineuses dans les rotations et les associations (processus de facilitation, par exemple). Si on se concentre sur le cas de l'azote, les apports sous forme minérale (engrais, dépôts atmosphériques) ou organique (lisiers, fumiers, composts, digestats de méthanisation ...), tout comme les quantités apportées par des processus biologiques (fixation symbiotique, minéralisation des matières organiques des sols ...) subissent tout une série de transformations microbiennes dans les sols qui favorisent l'absorption par la plante (par exemple minéralisation des matières organiques, nitrification¹), mais aussi leur incorporation aux matières organiques du sol (organisation) et leur élimination par retour à la forme N₂ par dénitrification² (figure 1). Les transformations dans ce cycle local de l'azote conduisent aussi à des pertes vers l'environnement sous forme de solutés (lixiviation de nitrate ou d'azote organique dissous, par exemple) vers l'hydrosphère, ou sous différentes formes gazeuses vers l'atmosphère (NH₃, NO_x, N₂O ou N₂).

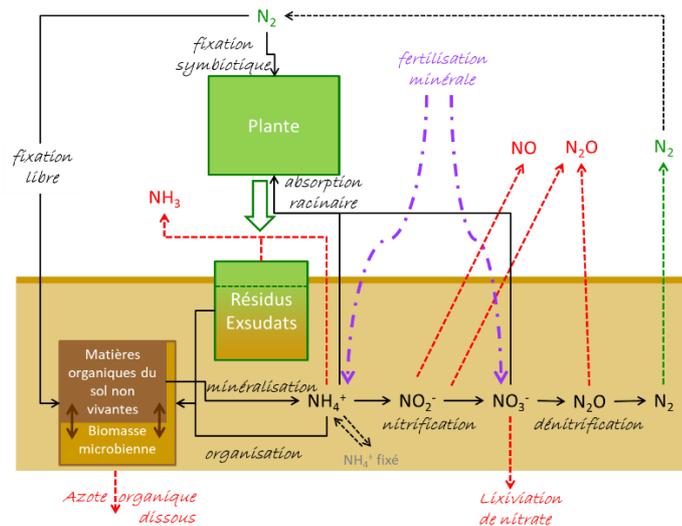


Figure 1 : Cycle de l'azote au sein d'une culture pouvant inclure des légumineuses (fixation symbiotique). Les flèches en trait plein représentent des processus biologiques et les flèches en tirets des processus physiques ou physico-chimiques. Les flèches rouges ou vertes indiquent les pertes vers les autres compartiments de l'environnement, air et eaux.

On voit dans ce cycle deux catégories de formes d'azote. D'une part l'azote diatomique (N₂) très abondant puisqu'il

¹ La nitrification est un processus biologique d'oxydation de l'ion ammonium en ion nitrate. Elle est effectuée par des microorganismes présents dans le sol et la plante.

² La dénitrification est un processus microbien de respiration anaérobie qui conduit en particulier à la réduction du nitrate en azote diatomique (N₂). La

constitue près de 80% de l'atmosphère, mais qui n'est utilisable comme source d'azote que par une infime minorité des êtres vivants et, d'autre part toutes les autres formes, qui constituent ce qu'on appelle l'« azote réactif (Nr) », à savoir tous les composés azotés biologiquement, photochimiquement ou radiativement actifs dans l'atmosphère et la biosphère terrestre et aquatique, et qui sont les formes utilisables par la grande majorité des espèces végétales et animales (Galloway et al., 2003). Nr inclut les formes de l'azote minéral réduites (en particulier ammoniac [NH₃] et ammonium [NH₄⁺]) ou oxydées (oxydes d'azote [NO_x = NO et NO₂], acide nitrique [HNO₃], protoxyde d'azote [N₂O] et nitrate [NO₃⁻]) mais aussi les formes organiques (notamment urée, amines, protéines et acides nucléiques). Lorsqu'on parlera d'« azote » dans la suite de ce texte, cela sous-entendra généralement « azote réactif ».

Jusqu'au début du XX^e siècle, le cycle de l'azote dans l'environnement, incluant les activités agricoles, était largement dominé par deux processus d'origine microbiologique : la fixation symbiotique, qui était de fait la principale voie de production primaire d'azote réactif, et la dénitrification. Le principal flux primaire d'origine anthropique était à cette époque la fixation symbiotique par les légumineuses cultivées (Galloway et al., 2003). L'association entre agriculture et élevage assurait une remobilisation de l'azote contenu dans les végétaux (grains, herbe, fourrages ...) par les animaux qui les consommaient et les déjections animales étaient une source essentielle d'azote utilisable par les cultures. A partir de la révolution industrielle, à la fin du XIX^e siècle, deux processus principaux sont venus modifier drastiquement ce « paysage de l'azote ». Tout d'abord, l'utilisation de plus en plus massive de combustibles fossiles pour la production d'énergie, les transports, l'industrie et les activités domestiques, est venue augmenter fortement les quantités d'azote oxydé (NO_x, HNO₃, ...) présentes dans l'atmosphère et dans l'environnement. Le deuxième processus a été le plus déterminant : il s'agit du procédé Haber-Bosch faisant la synthèse d'ammoniac à partir de diazote (N₂) et de dihydrogène (H₂) à l'échelle industrielle (Erisman et al., 2008). Ce procédé a été à la source de la production massive d'engrais industriels qui a été l'un des principaux éléments de l'intensification de la production végétale pour répondre à l'augmentation de la demande alimentaire après la 2^e guerre mondiale. A l'échelle globale, la production anthropique d'azote réactif dépasse quantitativement la fixation symbiotique depuis la fin du XX^e siècle. Le cycle de l'azote a donc été profondément modifié par les interventions humaines de l'échelle de la parcelle agricole à l'échelle mondiale : plus de la moitié de l'azote réactif est en effet aujourd'hui d'origine anthropique (Vitousek et al., 1997). Comme élément de comparaison, le cycle du carbone est modifié de moins de 10 % par les activités humaines.

La contrepartie de la forte augmentation de l'utilisation d'engrais azotés est que nous sommes passés, en un siècle, d'une situation de limitation de la production agricole par cet élément majeur qu'est l'azote, à une situation d'apports dépassant souvent, et parfois largement, les besoins des cultures. Ces excédents sont particulièrement élevés dans les régions d'élevage où des importations d'aliments, riches en azote sous forme de protéines (soja, par exemple), s'ajoutent aux achats d'engrais dans le bilan d'azote de l'exploitation et de la région. Ceci a eu pour conséquences des pertes croissantes

d'azote depuis les agroécosystèmes, soit vers les eaux pour des formes solubles et/ou mobiles (nitrate, formes organiques dissoutes ou particulaires), soit vers l'atmosphère pour les formes gazeuses (ammoniac, oxydes d'azote, protoxyde d'azote). Ces fuites et leur ampleur sont à l'origine de tout un ensemble de questions sur l'impact des activités humaines, et plus particulièrement agricoles, sur l'environnement (eaux, air, sols, écosystèmes et climat) et la santé (Sutton et al., 2011).

Des impacts liés à la mobilité et à la réactivité des composés azotés

D'après Giles (2005), l'azote est la troisième menace pour notre planète, après la perte de biodiversité et le changement climatique. Les impacts de l'azote sont en effet multiples et touchent à de nombreuses problématiques environnementales. En développant le concept de limites planétaires, Rockström et al. (2009) soulignent la criticité des impacts de l'excès d'azote réactif injecté dans l'environnement par les activités humaines. Ils écrivent : *“Les processus anthropiques – au premier lieu desquels la fabrication d'engrais pour la production alimentaire et la culture des légumineuses – convertit environ 120 millions de tonnes de N₂ en différentes formes d'azote réactif tous les ans – ce qui est supérieur à la somme de tous les processus terrestres. Une grande partie de ce nouvel azote réactif se retrouve dans l'environnement, polluant les cours d'eau et les zones côtières, s'accumulant dans les écosystèmes et ajoutant un certain nombre de composés gazeux dans l'atmosphère. Il dégrade lentement la résilience d'importants systèmes terrestres.”*

Partant d'une liste principale d'une vingtaine d'enjeux, la synthèse faite par l'European Nitrogen Assessment (Sutton et al., 2011) a identifié cinq menaces majeures associées aux excès d'azote dans l'environnement : qualité des eaux, qualité de l'air, effet de serre, écosystèmes et biodiversité, qualité des sols.

La pollution des eaux par l'azote est à l'origine de phénomènes d'eutrophisation et d'acidification de l'eau douce, et a un fort impact sur la faune et la flore aquatiques. Les concentrations élevées en nitrate dans les eaux destinées à la consommation sont considérées comme à risque pour la santé.

La pollution de l'air (Bedos et al., 2019) par les NO_x et l'ammoniac provoque la formation de particules secondaires (Ademe, 2012). En outre, les émissions de NO_x augmentent aussi les niveaux de dioxyde d'azote et d'ozone troposphérique. Toutes ces molécules oxydantes sont à l'origine de problèmes respiratoires et de cancers. L'ozone cause aussi des dommages aux cultures et à la végétation en général (Mills et al., 2011), ainsi qu'au bâti.

Concernant le climat, ce sont surtout les émissions de protoxyde d'azote (N₂O) qui sont pointées du doigt, trouvant leur origine dans la fertilisation des cultures et la gestion des effluents d'élevage. En revanche, les apports d'azote favorisent le stockage de carbone par la végétation et les sols (Erisman et al., 2011) car les plantes et la biomasse microbienne des sols ont besoin d'azote pour constituer leur matière organique.

Les impacts sur les écosystèmes et la biodiversité résultent dans un premier temps de transferts par l'atmosphère ou par le réseau hydrologique depuis les zones agricoles (sources de

Nr) vers les écosystèmes-cibles qui vont utiliser cet azote pour leur métabolisme, puis de réponses différenciées des organismes vivants aux excès d'azote, qui vont favoriser certaines espèces par rapport à d'autres voire, dans des cas extrêmes, provoquer des déséquilibres pouvant conduire à des phénomènes d'écotoxicité (Dise et al. dans Sutton et al., 2011).

La qualité des sols des écosystèmes faiblement anthropisés est affectée par les apports excédentaires d'azote et les dépôts atmosphériques qui augmentent leur acidité, modifiant les équilibres physico-chimiques et favorisant par là-même la perte de certains éléments-traces et qui affectent directement, ou par le biais de cette acidification, la biodiversité de leur microflore et microfaune.

La cascade de l'azote

L'azote, un composé qui circule dans l'environnement, et s'y transforme en créant divers impacts

Comme on vient de le voir, les fuites d'azote réactif depuis les systèmes agricoles circulent dans différents milieux (air, eaux, sols, écosystèmes) où ils peuvent être stockés, mais surtout s'y transformer par le biais de processus physiques, chimiques et microbiologiques en diverses formes, qui peuvent chacune successivement créer des impacts sur la santé, les écosystèmes et le climat. Cette analyse montre la nécessité d'adopter des approches englobantes permettant de faire le lien entre les sources d'azote utilisé en agriculture et en élevage et les impacts, en prenant en compte la diversité des déterminants des émissions (pratiques agricoles, facteurs du climat et de l'environnement), des transferts (hydrologiques et atmosphériques, anthropiques) d'un milieu à un autre et des impacts (sensibilité des écosystèmes et santé humaine). Ceci a amené Galloway et al. (2003) à introduire le concept de cascade de l'azote qu'il définit 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. Le schéma suivant (Sutton et al., 2011) met en évidence cette chaîne de transferts, transformations et impacts dans l'environnement avec un focus sur les zones agricoles (Figure 2). L'exemple que nous détaillons ci-après illustre cette chaîne de processus et d'impacts.

Au départ, une molécule d'azote atmosphérique (N_2) est convertie en ammoniac (NH_3) par le processus Haber-Bosch pour produire de l'engrais. De nombreuses expérimentations agronomiques ont montré qu'environ seule la moitié de l'engrais azoté apporté aux cultures se retrouve dans les parties récoltées. L'autre moitié s'échappe sous différentes formes vers l'atmosphère (NH_3 , NO_x , N_2O , N_2) ou vers l'eau (NO_3^- , azote organique dissous) ou encore reste sur la parcelle sous forme de résidus (parties racinaires et aériennes non récoltées, rhizodépôts) qui vont se décomposer et libérer à plus ou moins brève échéance de l'azote réactif.

L'ammoniac émis peut participer à la pollution atmosphérique en intervenant dans la formation de particules fines dommageables pour la santé, ou être déposé sur un écosystème (pluie ou absorption par les stomates) naturel qu'elle va fertiliser mais aussi contribuer à acidifier et/ou à eutrophiser si les quantités déposées sont trop élevées.

Le sol de cet écosystème, tout comme celui de la parcelle agricole initiale, produit aussi du NO et du nitrate par nitrification de cet azote ammoniacal déposé (voir figure 1).

Ce NO émis vers l'atmosphère contribuera à la formation d'ozone troposphérique, qui impacte la santé humaine et celle des écosystèmes.

Le nitrate, quant à lui, pourra migrer vers les eaux et les écosystèmes aquatiques, produisant là encore des désordres trophiques. Il peut aussi être dénitrifié en N_2O (qui contribue alors au réchauffement global et à la dégradation de la couche d'ozone stratosphérique) ou en N_2 (dénitrification complète), retournant alors à une forme non réactive de l'azote qui arrête la chaîne des impacts.

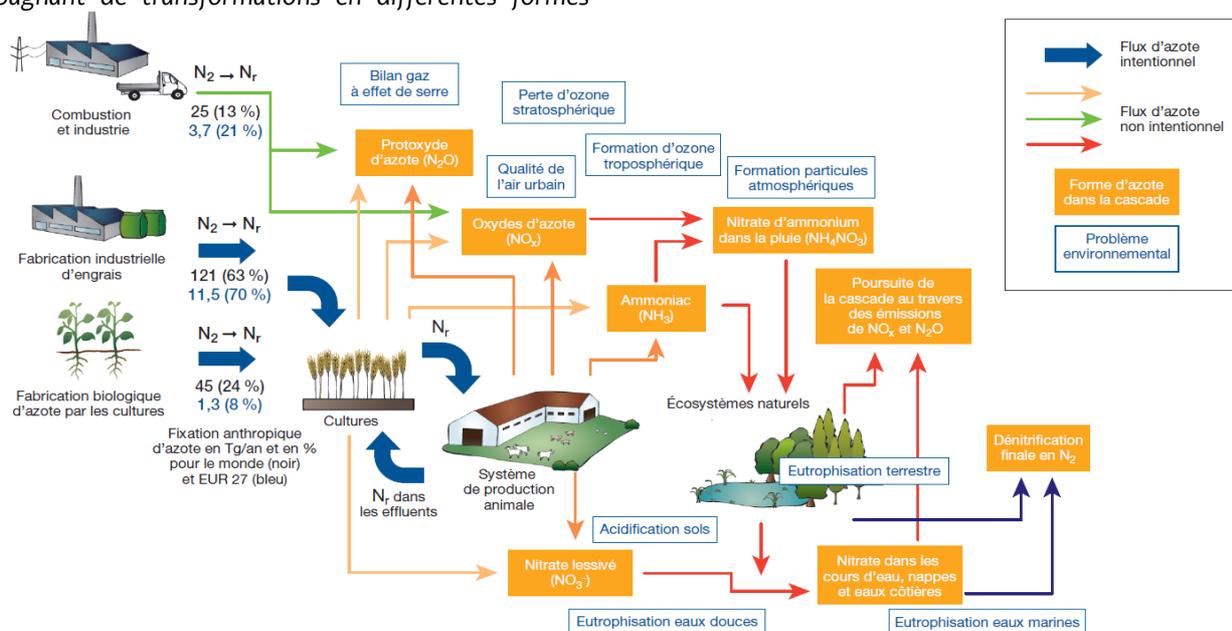


Figure 2 : Schéma simplifié de la cascade de l'azote, mettant en évidence la fabrication industrielle d'azote réactif (procédé Haber-Bosch), les principales formes d'azote réactif utilisées ou produites dans l'environnement et les impacts environnement

Les chaînes de transformations et d'impacts illustrées précédemment peuvent avoir pour origine aussi bien les engrais minéraux synthétiques que les effluents d'élevage, ainsi que l'azote contenu dans les résidus de culture ou dans les déchets produits par l'homme (ordures ménagères, boues de stations d'épuration), de même que des apports d'azote réactif par dépôt atmosphérique ou la fixation symbiotique. Elles illustrent le fait qu'un même atome d'azote, en circulant dans l'environnement et en s'y transformant par différents processus biologiques et chimiques peut provoquer une succession d'impacts sanitaires ou environnementaux en différents lieux, selon son trajet et les milieux traversés. Cette succession d'impact ne s'arrêtera qu'après retour à la forme N_2 ou, de manière temporaire mais avec une certaine durée, lorsque l'azote est incorporé à la matière organique des plantes ou du sol.

Si la figure 2 présente un cadre qui pourrait correspondre à celui d'un paysage rural de quelques km^2 , il faut bien avoir conscience que cette notion de cascade peut se décliner à différentes échelles. Elle peut par exemple s'appliquer à l'environnement proche d'un bâtiment d'élevage (Loubet et al., 2009 ; Hicks et al., 2011), à celui d'un paysage agricole (Cellier et al., 2011), à de petits et grands bassins versants (Billen et al., dans Sutton et al., 2011) ou à l'échelle continentale voire globale (Galloway et al., 2004). Selon les cas, les voies majoritaires de transfert et les impacts peuvent être différents.

La notion de cascade de l'azote invite à resituer l'utilisation de l'azote en agriculture dans une approche globale du cycle de l'azote et de ses impacts

La cascade de l'azote offre donc une vision dynamique qui suit cet élément dans les compartiments de l'environnement et permet de comprendre la complexité de son devenir et de ses impacts. Elle procure un cadre conceptuel dans lequel le rôle essentiel de l'azote dans la production végétale et animale est relié à ses impacts environnementaux et sanitaires qui peuvent devenir la motivation principale de son étude. En conséquence, elle amène à dépasser l'échelle du lieu où est utilisé l'azote minéral ou organique (parcelle cultivée, prairie, bâtiment d'élevage) afin de resituer le devenir de l'azote non utilisé (pertes) dans le contexte plus général de l'environnement, à des échelles pouvant aller du niveau très local (écosystème voisin) à un niveau régional (transferts de nitrate ou d'ammoniac) voire national ou global (transferts à longue distance ; effet de serre et émission de N_2O). Cela pose, dans nombre de cas (nitrate, ammoniac), la question de la localisation des activités agricoles vis-à-vis des lieux proches qui pourront être affectés.

La cascade de l'azote met aussi en évidence le risque de transfert d'impact, lié aux transformations des différentes formes de l'azote réactif, avec des effets à des échelles de temps et d'espace très différentes (Oenema et al., 2009). Par exemple, la dénitrification de l'azote dans des stations d'épuration, en cherchant à régler la question de la pollution nitrique, risque d'augmenter les émissions de N_2O . De même, les méthodes de réduction des émissions d'ammoniac (enfouissement des lisiers, par exemple) risquent d'augmenter les fuites de nitrate ou de N_2O .

Enfin, par les liens multiples et complexes entre les différentes formes d'azote réactif, d'impacts et d'échelles spatiales, la cascade de l'azote montre aussi la nécessité de traiter les différentes questions sous-jacentes de manière intégrée à partir de connaissances sur différents climats, sols et écosystèmes et sur différents échelles et niveaux de décision et multidisciplinaire (agronomie, écologie, sciences de l'eau et de l'atmosphère, sciences sociales). Cela doit concerner à la fois les approches expérimentales et celles de modélisation, ces dernières paraissant incontournables dès que des évaluations intégrées dans l'espace et le temps sont nécessaires.

Conclusions

En lien avec la fertilisation azotée et ses conséquences environnementales et sanitaires, la cascade de l'azote représente donc un schéma cohérent faisant ressortir la multiplicité des formes d'azote réactif et des processus de transport et de transformation conduisant à des impacts. Par rapport à cette ambivalence entre utilisation de l'azote pour la production végétale et remédiation des milieux, la cascade de l'azote fait ressortir implicitement deux pistes de réflexion pour la gestion de la fertilisation azotée :

- « Garder le contrôle » de l'azote réactif et l'utiliser autant que possible plutôt que l'éliminer. En effet puisque toute molécule qui s'échappe dans l'atmosphère ou les eaux se soustrait à tout contrôle, elle peut produire toute une chaîne d'impacts. Ce constat se rajoute à la nécessité d'optimiser l'utilisation de l'azote qui est de plus en plus prégnante dans un contexte de raréfaction et de renchérissement des ressources minérales et énergétiques. Les méthodes visant à éliminer l'azote réactif en le dénitrifiant, si elles permettent d'interrompre la cascade de l'azote et par là même d'éviter des transferts de pollution et de nouveaux impacts si la transformation va jusqu'à la forme N_2 , ont un coût énergétique élevé car elles gaspillent une ressource dont la production a nécessité des quantités importantes d'énergie (procédé Haber-Bosch) et qui aurait pu, dans certains cas au moins, être valorisée.
- Améliorer l'efficacité d'utilisation de l'azote³ en agriculture. La forte augmentation des quantités d'azote utilisées s'est accompagnée d'une diminution de l'efficacité d'utilisation de l'azote à l'échelle considérée (parcelle, exploitation). Celle-ci est en général faible au niveau des échelons élémentaires : en moyenne autour de 50 % pour les cultures, elle est encore inférieure à l'échelle de l'animal (typiquement entre 10 % et 40 %, les valeurs les plus élevées étant observées pour les volailles). Mais cette efficacité peut être largement améliorée à des échelles intégratrices par recyclage de l'azote contenu dans les sous-produits des activités agricoles, résidus de cultures ou déjections animales. Elle peut être aussi améliorée en ajustant mieux les apports d'azote aux besoins (plantes, animaux). L'efficacité est généralement plus élevée pour les systèmes à faible niveau d'intrants azotés.

³ Rapport entre les quantités d'azote exportées dans les produits agricoles, végétaux ou animaux et celles qui sont apportées (engrais, aliments, ...)

Ces pistes devraient permettre de faire évoluer les approches conduites dans le domaine de la fertilisation des cultures et des prairies, voire d'améliorer leur bilan économique et énergétique en optimisant les apports et favorisant le recyclage.

Références

Ademe, 2012. Les émissions agricoles de particules dans l'air : état des lieux et leviers d'action. Disponible à https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/82370_7416_emissions_agricoles_particules-2.pdf

Bedos C., Générumont S., Castell J.-F., Cellier P., coord., 2019. Agriculture et qualité de l'air. Comprendre, évaluer, agir. Versailles, Editions Quae, 324 p.

Cellier P., Durand P., Hutchings N., Dragosits U., Theobald M., Drouet J.-L., et al., 2011. Nitrogen flows and fate in rural landscapes. In: Sutton M.A., Howard C.M., Erisman J.W., Billen G., Bleeker A., Grennfelt P., et al., eds. The European Nitrogen Assessment. Sources, Effects and Policy Perspectives. Cambridge: Cambridge University Press, 229-248.

Erisman J.W., Sutton M.A., Galloway J., Klimont Z., Winiwater W., 2008. How a Century of Ammonia Synthesis Changed the World. *Nature Geoscience*, 1, 636-639.

Erisman J.W. Galloway J. Seitzinger S., Bleeker A., Butterbach-Bahl K., 2011. Reactive nitrogen in the environment and its effect on climate change. *Curr Op Environ Sustain* 3:281-290.

Galloway J.N. Aber J.D. Erisman J.W. et al. 2003. The Nitrogen Cascade. *BioScience* 53:341-356.

Galloway J.N., Dentener F.J., Capone D.G., Boyer E.W., Howarth R.W., Seitzinger S.P., et al., 2004. Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry* 70: 153-226.

Giles J., 2005. Nitrogen study fertilizes fears of pollution. *Nature* 433: 791, doi:10.1038/433791a.

Hicks W.K., Whitfield C.P., Bealey W.J., Sutton M.A. (eds.), 2011. Nitrogen Deposition and Natura 2000: Science & practice in determining environmental impacts. COST729/Nine/ESF/CCW/JNCC/SEI Workshop Proceedings, publié par COST. Disponible à : <http://cost729.ceh.ac.uk/n2kworkshop>

Loubet B. Asman W.A.H. Theobald M.R. Hertel O., Tang Y.S., Robin P., Hassouna M., Dämmgen U., Générumont S., Cellier P., Sutton M.A., 2009. Ammonia Deposition Near Hot Spots: Processes Models and Monitoring Methods in: Sutton M.A. Reis S. Baker S.M.H. (eds.) Atmospheric Ammonia. Springer Netherlands Dordrecht pp. 205-267.

Mills G., Harmens H., 2011. Ozone pollution: A hidden threat to food security, CEH, ICP Vegetation; <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/15071/1/No15071CR.pdf>

Oenema O., Witzke H.P., Klimont Z., Lesschen J.P., Velthof G.L., 2009. Integrated assessment of promising measures to decrease nitrogen losses from agriculture in EU-27. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 133: 280-288.

Rockström J., Steffen W., Noone K., Persson A., Stuart F., 2009. Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. *Ecol. Soc.* 14, 32.

Sutton M.A., Howard C.M., Erisman J.W., Billen G., Bleeker A., Grennfelt P., van Grinsven H., Grizzetti B., 2011. The European Nitrogen Assessment. Sources, effects and policy perspectives. Cambridge University Press, 664 pages. Accessible en ligne à <http://www.nine-esf.org/node/360/ENA-Book.html>

Vitousek P.M., Aber J.D., Howarth R.W., Likens G.E., Matson P.A., Schindler D.W., Schlesinger W.H., Tilman D.G., 1997. Human Alteration of the Global Nitrogen Cycle: Sources and Consequences. *Ecol. Applic.*, 7, 737-750.