

Réduire les pertes d'azote dans l'élevage

Expertise scientifique collective



Réduire les pertes d'azote dans l'élevage

Expertise scientifique collective

Éditions Quæ



Collection Matière à débattre et décider

Les variétés tolérantes aux herbicides
Un outil de désherbage durable ?
Ouvrage collectif
2014, 160 p.

La filière équine française à l'horizon 2030
Christine Jez (coord.)
2014, 158 p.

Fertilisation et environnement
Quelles pistes pour l'aide à la décision ?
S. Pellerin, F. Butler, C. Guiard-Van Laethem
2014, 288 p.

Cet ouvrage est adapté de l'expertise scientifique collective « Les flux d'azote liés aux élevages, réduire les pertes, rétablir les équilibres » (2012), réalisée par l'Inra à la demande des ministères en charge de l'Agriculture et de l'Écologie.

Le rapport d'expertise et la synthèse pour décideurs sont disponibles sur le site Internet de l'Inra : www.inra.fr/l_institut/expertise/expertises_realisees/expertise_elevage&azote.

Composition du collectif d'experts et de l'équipe projet de l'expertise détaillée p. 166. Responsables scientifiques de l'expertise : Jean-Louis Peyraud et Pierre Cellier.

Adaptation éditoriale coordonnée par Pierre Cellier, Catherine Donnars, Jean-Louis Peyraud et Françoise Vertès.

Pour citer cet ouvrage

J.-L. Peyraud, P. Cellier, C. Donnars, F. Vertès (coord.), F. Aarts, F. Béline, C. Bockstaller, M. Bourblanc, L. Delaby, J.Y. Dourmad, P. Dupraz, P. Durand, P. Faverdin, J.L. Fiorelli, C. Gaigné, A. Girard, F. Guillaume, P. Kuikman, A. Langlais, P. Le Goffe, S. Le Perchec, P. Lescoat, T. Morvan, C. Nicourt, V. Parnaudeau, O. Réchauchère, P. Rochette, P. Veysset., 2014. Réduire les pertes d'azote dans l'élevage. Éditions Quæ, 168 p.

Éditions Quæ
RD 10
78026 Versailles Cedex, France
www.quae.com

© Éditions Quæ, 2014

ISBN 978-2-7592-2246-9

ISSN 2115-1229

Le Code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction, même partielle, du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

Sommaire

Introduction 6

PARTIE I : CONTRIBUTION DE L'ÉLEVAGE À LA PRESSION AZOTÉE SUR LES TERRITOIRES

1. Les flux d'azote dans l'environnement et leurs impacts

Le développement des engrais de synthèse au xx ^e siècle	11
La cascade de l'azote	13
Place de l'élevage dans la cascade de l'azote	15
Les impacts environnementaux	18
Liens avec les cycles du carbone et du phosphore	21

2. Pression azotée sur les territoires

D'importants transferts d'azote réactif à l'échelle mondiale	23
Répartition des flux, des pressions azotées et des émissions entre bassins de production européens	25
Devenir de l'azote à des échelles plus restreintes : bassins versants, paysages ruraux	30
Des territoires d'élevage très contrastés en France	31
Différence de sensibilité entre milieux récepteurs	34

3. Les causes socio-économiques des déséquilibres territoriaux

Genèse d'un débat de société	35
Les effets de la logique économique de concentration spatiale des productions	37
Un empilement de politiques peu efficace	41

PARTIE 2 : DESCRIPTION ET QUANTIFICATION DES FLUX D'AZOTE DANS LES ÉLEVAGES

4. Devenir des flux d'azote dans les élevages

Cadre d'analyse des flux d'azote dans une exploitation	51
Faible efficacité azotée à l'échelle de l'animal	52
Devenir de l'azote contenu dans les déjections	58
Techniques de conservation et de traitement des déjections	65
Valorisation agronomique des effluents d'élevage	69
Gestion de l'azote dans les systèmes de culture	75

5. Les flux d'azote de l'exploitation au territoire

Intérêt d'une approche au niveau de l'exploitation	81
Diversité des systèmes de production animale	82
Importance du chargement animal dans les risques de fuites d'azote	84
Agriculture biologique et systèmes à bas niveau d'intrants	87
Comparaison entre systèmes d'élevage	89
Gestion des flux d'azote à l'échelle territoriale	93

PARTIE 3 : UTILISER MOINS ET MIEUX L'AZOTE

6. Les outils pour évaluer les pertes d'azote

Types d'indicateurs et fonctions	99
Cas particulier des bilans azotés	106
Choix d'indicateurs et limites à leur utilisation	112

7. Analyse des instruments de régulation des pollutions azotées

Incidations financières	116
Instruments quantitatifs ou normatifs	117
L'association quota-pénalités	118
Comparaison avec les pays d'Europe du Nord	119
Régime de responsabilité	121

8. Leviers d'action identifiés

Objectifs visés	123
Indicateurs de progrès permettant d'appréhender la sensibilité des territoires	125
Accroître l'efficacité de l'azote au sein des systèmes de production animale	127
Gérer l'azote à l'échelle des territoires sensibles	132
Effets indirects des mesures prises	133
Pistes pour l'action publique	135
Éléments pouvant affecter la gestion de l'azote	139

Conclusion 141

Annexe 1. Tableau chronologique 148

Annexe 2. Analyse de la bibliographie 152

Remerciements 154

Glossaire, sigles et acronymes 155

Références bibliographiques 157

Auteurs de l'expertise scientifique collective 166

Introduction

LE DÉVELOPPEMENT DE L'ÉLEVAGE DANS LE MONDE fait actuellement l'objet de débats. Si ses apports bénéfiques en termes de valorisation des territoires ruraux et de maintien de l'emploi sont reconnus, plusieurs travaux scientifiques et rapports internationaux pointent son rôle dans les déséquilibres environnementaux. Sa contribution aux émissions de gaz à effet de serre a ainsi été soulignée par la FAO (*Livestock's Long Shadow*, 2006 ; *Tackling climate change through livestock, a global assessment of emissions and mitigation opportunities*, 2013)¹. Fortement consommateur de ressources et de terres, il est aussi questionné par rapport aux enjeux de sécurité alimentaire mondiale. L'accroissement de la demande en produits animaux accompagne l'évolution des régimes alimentaires vers davantage de protéines d'origine animale, en Asie notamment. Dans les zones historiquement les plus productrices, dont l'Europe et la France, la production animale et la consommation de produits animaux par habitant ont, à l'inverse, tendance à baisser.

Les flux d'azote associés à l'élevage constituent une des portes d'entrée de ce débat. Ils permettent en effet d'aborder l'utilisation des ressources et la perturbation des cycles biogéochimiques. Le cycle agronomique de l'azote s'établit ainsi : les cultures fournissent la matière azotée que les animaux ingèrent et transforment pour une partie en protéines (lait, œufs, viande) tandis que leurs déjections, riches en azote, fertilisent en retour les cultures. Mais ce recyclage a été modifié au ^{xx}e siècle du fait de l'essor des engrais chimiques d'origine industrielle. Ils ont rendu moins nécessaires les engrais d'origine animale. En Europe, la fertilisation azotée chimique représente presque les deux tiers des apports d'azote sur les terres agricoles, les effluents d'élevage un peu plus du quart et le solde provient de la fixation symbiotique des légumineuses. L'essentiel (85 %) de l'azote mobilisé par l'agriculture européenne sert à produire des aliments pour l'élevage. Parallèlement, les modes d'élevage se sont intensifiés, spécialisés et concentrés sur certains territoires. L'épandage des effluents et les pertes gazeuses d'azote y dépassent souvent les capacités locales de recyclage par les plantes. Alors, de facteur limitant de la production, l'azote utilisable, dit réactif (essentiellement azote nitrique et ammoniacal) devient abondant et émis en excès dans l'environnement. Cet excès génère des pollutions et correspond, de plus, à un gaspillage énergétique et financier de la ressource azotée qui a été produite et a donc nécessité de l'énergie fossile et du travail depuis la fabrication de l'engrais et des aliments manufacturés pour le bétail.

La communauté scientifique internationale spécialiste de l'azote alerte depuis peu sur l'amplitude de la perturbation du cycle biogéochimique de l'azote et ses conséquences

1. <www.fao.org/docrep/018/i3437e/i3437e.pdf> ; <[ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/a0701e/a0701e.pdf](http://ftp.fao.org/docrep/fao/010/a0701e/a0701e.pdf)> (consulté le 03 juil. 2014).

multiplés sur les différents compartiments de l'environnement (eaux, air, sols, écosystèmes) et sur le climat. En 2011, une expertise scientifique européenne (*European Nitrogen Assessment*, 2011) associe à l'azote réactif toute une série d'impacts en cascade : dégradation de la qualité de l'air, acidification, eutrophisation, perte de biodiversité des milieux naturels, destruction de la couche d'ozone stratosphérique ou encore réchauffement climatique. Elle met au premier rang des coûts pour la société, les conséquences de l'azote réactif atmosphérique sur la santé humaine, et seulement en second les impacts liés à la pollution des eaux. Néanmoins en France, c'est surtout le nitrate, pollution diffuse d'origine essentiellement agricole, qui a focalisé l'attention, dégradant la qualité de l'eau potable et menaçant les écosystèmes aquatiques (eutrophisation).

Des politiques ont été mises en place en Europe comme en Amérique du Nord, depuis 20 ans, pour lutter contre la pollution des eaux. Elles ciblent explicitement la gestion de l'azote en agriculture en établissant des normes d'épandage des effluents et en préconisant en particulier l'équilibre de la fertilisation azotée et l'instauration de cultures intermédiaires dites « pièges à nitrate » (directive européenne « Nitrates » en 1991, puis directive-cadre sur l'eau en 2000). L'application de la réglementation européenne fait cependant régulièrement l'objet de tensions entre les parties prenantes : États, organisations agricoles, associations de protection de l'environnement et communautés locales. La Commission européenne reproche également régulièrement la mauvaise transposition en droit national de ses directives : ses griefs portent notamment sur la quantification des flux, la délimitation des zones vulnérables, les périodes d'interdiction d'épandage... Un contentieux est en cours depuis 2009 avec la France. La réglementation sur la qualité de l'atmosphère connaît aussi une forte dynamique depuis la convention de Genève sur les pollutions atmosphériques transfrontières (1979)². En 2001, la directive européenne « NEC » (*National Emission Ceilings*) a fixé des plafonds d'émission nationaux pour un certain nombre de polluants atmosphériques, dont l'ammoniac, les oxydes d'azote et le protoxyde d'azote. La Commission a assigné la France, en 2012, pour manquement dans la protection de la qualité de l'air, citant en particulier les émissions d'ammoniac qui contribuent à la formation de petites particules en suspension dans l'air, nuisibles à la santé humaine.

Périmètre de l'expertise

C'EST DANS CE CONTEXTE QUE LES MINISTÈRES en charge de l'Écologie et de l'Agriculture ont sollicité l'Inra en 2010 pour coordonner une expertise scientifique collective sur les bilans et flux d'azote liés aux élevages. L'objectif était de mettre à disposition des décideurs et des acteurs publics et privés les connaissances scientifiques actualisées sur ces flux, leur devenir, et d'identifier des options d'ordres technologiques, organisationnels,

2. <www.unece.org/env/lrtap/welcome.html> (consulté le 03 juil. 2014).

structurels ou territoriaux permettant de réduire les pressions des émissions azotées issues des élevages sur l'environnement.

L'échelle de l'exploitation agricole a été au cœur de l'analyse car c'est l'unité de référence des politiques agricoles et environnementales. Cependant les informations scientifiques portent souvent sur un niveau plus fin : l'animal, l'atelier d'élevage, la parcelle, le bâtiment, les effluents, la zone de stockage ; ou sur un niveau plus large : le bassin versant, le paysage. Les statistiques et modélisations appréhendent aussi les échelles nationales et internationales. La variabilité entre systèmes d'élevage et pratiques agricoles a été approchée pour les élevages bovins, avicoles, porcins et en considérant différents modes de production : intensifs, extensifs, à bas niveaux d'intrants, en agriculture biologique.

Les experts se sont intéressés aux causes et aux trajectoires ayant conduit à la situation actuelle ainsi qu'aux outils d'évaluation (indicateurs, bilans, analyse de cycles de vie, coût/bénéfice, etc.) et de régulation de la pression azotée (réglementation, taxe, subvention, quota, norme, zonage, etc.). À partir du diagnostic, ils ont identifié des leviers — structurels, organisationnels, technologiques, territoriaux — permettant de réduire la pression des émissions azotées. Dans la limite des connaissances actuelles, leurs déterminants ont été soulignés ainsi que leurs effets indirects.

L'examen des impacts de l'excès d'azote sur la santé humaine et sur l'environnement ne faisait pas partie du périmètre de l'expertise. Toutefois, ils sont brièvement rappelés dans le premier chapitre. Enfin, en se focalisant sur les relations entre azote et élevage, l'expertise ne reflète pas l'ensemble des relations entre l'élevage et l'environnement. Elle ne traite pas non plus de la contribution de l'élevage aux dynamiques sociales et économiques des territoires.

Méthode de l'expertise scientifique collective

LA CONDUITE DU TRAVAIL S'APPUIE sur une charte de l'expertise scientifique³ dont les principes généraux sont la compétence, l'impartialité, la pluralité et la transparence (en lien avec la norme Afnor NF X 50-110). Dans le cas présent, la problématique de l'expertise entre complètement dans le champ de compétence de l'Inra, lequel dispose de nombreuses équipes travaillant sur l'azote et sur l'élevage.

La constitution du collectif d'experts repose sur la reconnaissance des chercheurs par leurs pairs (auteurs largement cités dans la bibliographie scientifique) et répond à un souci de pluralité institutionnelle et d'approches scientifiques. Un tiers des experts appartient à d'autres organismes de recherche que l'Inra : Irstea, CNRS, deux experts sont néerlandais (WUR-PRI et WUR Alterra) et un canadien (Agriculture & Agroalimentaire Canada). Quant à la répartition entre domaines scientifiques, la zootechnie et l'approche systémique des

3. <<http://www.inra.fr/expertise>>.

systèmes d'élevage représentent 40 % de l'effectif d'experts, les sciences humaines et sociales un quart et le dernier tiers regroupe des spécialistes des cycles biogéochimiques et de l'agronomie. La pluralité du collectif d'experts favorise la diversité des points de vue, donc l'absence d'un parti pris. Les experts remplissent une déclaration où ils précisent leurs éventuels liens avec des intérêts privés. La séparation entre maîtrise d'ouvrage (commanditaires publics) et maîtrise d'œuvre (Inra) renforce l'autonomie de travail du collectif d'experts. Enfin et surtout, la méthode d'investigation se fonde sur l'analyse de la littérature scientifique internationale et non pas sur les dires des experts.

La méthode consiste en effet à dresser un état des lieux critique des connaissances scientifiques publiées. L'exploration bibliographique a été faite dans les bases de données telles que le *Web of Sciences*, les *CAB Abstracts* et pour la partie sciences humaines et sociales : Econlit, Francis, Cairn, Repec et des catalogues de bibliothèques. Le travail d'itération entre documentalistes et experts a permis de sélectionner 1 360 références bibliographiques (2 900 auteurs). Ont été privilégiées les informations relatives ou transposables au cadre géographique de la France. Les articles scientifiques représentent les trois quarts des documents cités, le dernier quart étant des ouvrages, rapports publics, thèses et très marginalement quelques articles de presse et pages web. Les aspects « biotechniques » constituent plus de la moitié des références totales et la majorité d'entre elles décrivent et quantifient les flux d'azote dans les systèmes d'élevage. Les sciences sociales (droit, économie, sociologie, science politique) représentent un quart des sources et portent essentiellement sur les pollutions par le nitrate, en France. La littérature sur les indicateurs et sur les méthodes d'évaluation environnementale est abondante : un cinquième du total. 80 % des sources sont postérieures à 1998. L'analyse bibliographique est détaillée dans l'annexe 2.

Les experts rédigent chacun une contribution faisant état des références bibliographiques utilisées. L'ensemble des contributions forme le rapport d'expertise qui est mis en ligne sur le site Inra. Les experts sont responsables du rapport. Enfin, un exercice d'expertise scientifique ne comporte ni avis ni recommandations mais les experts s'attachent à éclairer différentes options pour l'action.

Partie I

Contribution de l'élevage à la pression azotée sur les territoires



Cette première partie décrit les phénomènes généraux de la circulation de l'azote dans l'environnement en pointant les spécificités liées aux activités d'élevage. L'essor de la production industrielle de fertilisants azotés au xx^e siècle a mis à disposition des cultivateurs une ressource bon marché et leur permettant de s'affranchir de l'association avec l'élevage qui fournissait la matière organique nécessaire aux cultures. Devenue abondante, la ressource azotée n'a plus été économisée, entraînant d'importantes « fuites » dans l'environnement. Les pollutions issues de trois composés sont particulièrement visées par les politiques environnementales : l'ammoniac qui nuit à la qualité de l'air et acidifie les milieux, le nitrate qui dégrade la qualité des eaux et le protoxyde d'azote qui est un puissant gaz à effet de serre.

Des cartographies permettent d'appréhender la variabilité spatiale de la pression azotée entre territoires. Les régions denses en nombre d'animaux se distinguent nettement par les excédents d'émissions azotées. C'est pourquoi, en France, l'Ouest et particulièrement la Bretagne se démarquent des autres régions d'élevage.

L'histoire socio-économique récente explique clairement ces déséquilibres territoriaux. Au lendemain de la seconde guerre mondiale, la croissance de la production agricole s'est appuyée sur un double mouvement de concentration industrielle et d'agglomération (suivant le principe des économies d'échelles), concentrant dans l'Ouest près de la moitié du cheptel français. Les quantités d'effluents d'élevage ont alors dépassé la capacité d'utilisation locale.

Face à ces déséquilibres, les politiques de lutte contre les pollutions azotées ont eu jusqu'à présent une efficacité limitée. Le dispositif se caractérise par un enchevêtrement complexe de zonages, normes, incitations... et reste cependant incomplet et peu cohérent. L'analyse souligne la difficulté à sortir des logiques technico-économiques actuelles. Pourtant, les éleveurs confrontés par ailleurs à une forte compétition économique ressentent les critiques environnementales et de leur voisinage comme une ré-interrogation de la définition même de leur métier.

1. Les flux d'azote dans l'environnement et leurs impacts

L'azote est un élément constitutif de tout être vivant. Il est indispensable à la vie, comme l'hydrogène, l'oxygène et le carbone. Il se singularise par son abondance et par la multiplicité de ses formes : la molécule de diazote (N_2) qui constitue 78 % de l'atmosphère terrestre et 99 % de l'azote présent à l'échelle du globe ; l'atome d'azote (N) qui entre dans la composition des protéines et de l'ADN ; ou l'azote dit réactif car il réagit en présence d'éléments environnants et qui se présente sous des formes oxydées (NO_x , N_2O , nitrate) ou réduites (NH_3 , NH_4^+) ou encore sous des formes organiques comme l'urée. Les formes réactives apparaissent lors de transformations dans l'air, l'eau et le sol ainsi qu'au sein des êtres vivants. Elles peuvent évoluer jusqu'à un retour à la forme diazote par dénitrification (bouclage du cycle de l'azote).

Les êtres vivants ne sont pas capables d'utiliser le diazote de l'air sauf certains micro-organismes, dont les *Rhizobium* qui fixent l'azote en symbiose avec des plantes de la famille des légumineuses (fixation symbiotique). Hormis les légumineuses, les plantes ne peuvent utiliser l'azote que sous ses formes réactives.

Le développement des engrais de synthèse au xx^e siècle

JUSQU'AU DÉBUT DU xx^e SIÈCLE, la fixation symbiotique était la principale source primaire d'azote pour l'agriculture, l'autre voie reposait sur le recyclage de l'azote grâce à l'association étroite entre cultures et élevage : les déjections animales fournissaient un amendement organique riche en azote, nécessaire au maintien de la fertilité des sols. Cette fonction a d'ailleurs longtemps servi — et sert toujours dans de nombreux pays — à convertir l'azote d'origine symbiotique des prairies en azote facilement disponible pour les cultures.

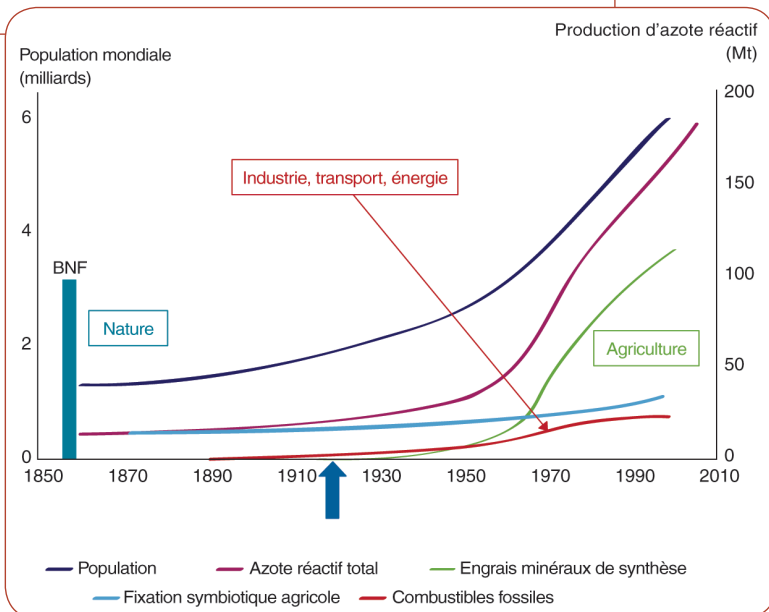
La mise au point du procédé Haber-Bosch (chimistes allemands) au début du xx^e siècle a changé la donne. Il a permis la synthèse industrielle d'ammoniac à partir de diazote et de gaz naturel (méthane). Ce procédé a rendu possible la production d'engrais azotés de synthèse sous forme d'ammonium ou d'urée. L'emploi des fertilisants chimiques s'est généralisé à partir des années cinquante (fig. 1.1) et explique la croissance très rapide de la production agricole mondiale. D'ailleurs, certains scientifiques en déduisent que la fertilisation chimique azotée est devenue l'un des moteurs majeurs de la croissance démographique mondiale. L'azote représente actuellement 60 % de la consommation

d'engrais dans le monde, suivi par le phosphate (25 %) et le potassium (15 %). La fixation industrielle d'azote équivaut dorénavant à environ 100 Mt/an dans le monde, soit plus du triple de la fixation par les légumineuses cultivées. La France utilise environ 2 % de l'azote chimique mondial, soit 2 Mt d'azote. Les superficies consacrées à la culture des légumineuses fourragères ont diminué de 3,5 millions à 632 000 ha entre 1960 et 2007 dans notre pays. Mais à l'échelle mondiale, les quantités de diazote fixées annuellement par les légumineuses agricoles ont au contraire augmenté de 17 à 40 Mt au cours du xx^e siècle, du fait surtout de l'essor de la production de soja.

Hors agriculture, la combustion de la biomasse et des combustibles fossiles produit des oxydes d'azote à partir de l'azote contenu dans le combustible lui-même ou de l'azote atmosphérique : cette source représente 21 % de l'azote réactif présent à l'échelle européenne.

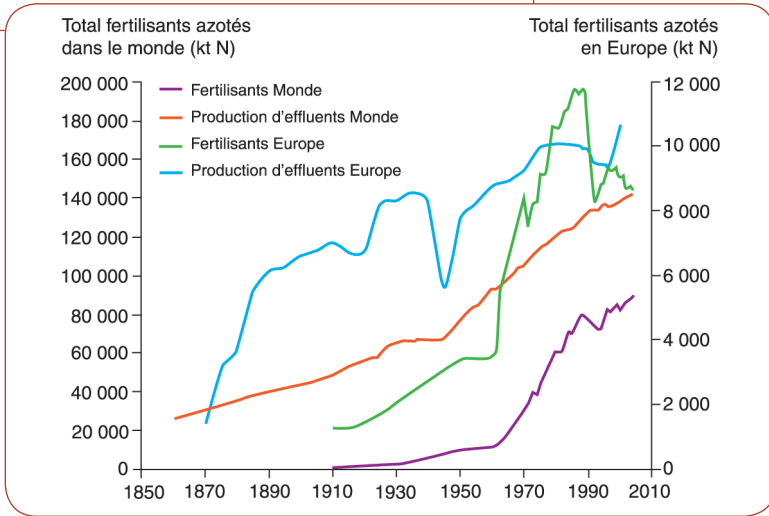
Les figures 1.1 et 1.2 montrent que les productions d'engrais minéraux et d'effluents d'élevage se sont additionnées sur la période récente, soulignant combien d'une situation où l'azote réactif était limitant par rapport aux besoins alimentaires de la population (avant 1950), on est passé à une situation où l'azote est devenu facilement disponible pour la production agricole, à l'échelle mondiale et particulièrement en Europe.

Figure 1.1. Évolution de la production d'azote réactif et de la population mondiale depuis le milieu du xix^e siècle.



La courbe BNF (*Biological Nitrogen Fixation*) correspond à la fixation symbiotique de l'azote par les écosystèmes naturels. La flèche bleue indique le début de la mise en œuvre du procédé Haber-Bosch. Source : d'après Galloway *et al.*, 2003.

Figure 1.2. Consommations globale et européenne d'effluents d'élevage et d'engrais azotés.



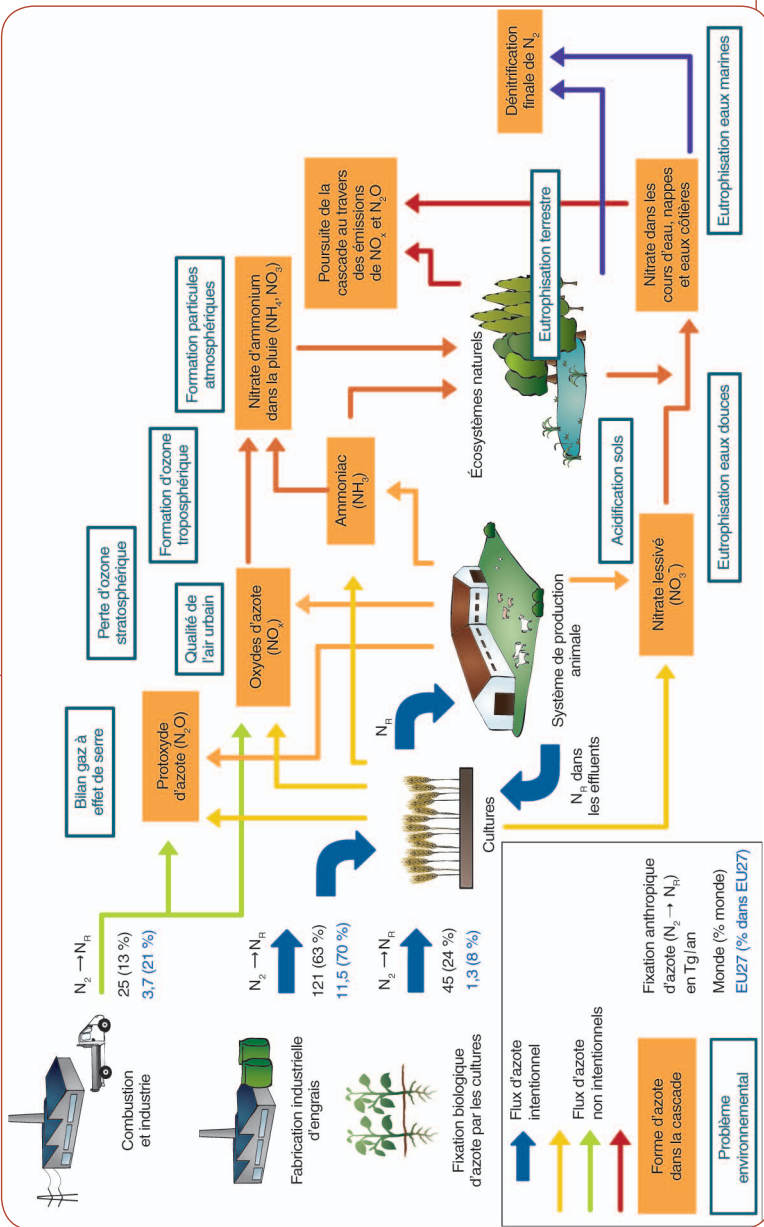
Source : d'après une communication personnelle de J.W. Erisman, à partir de données globales (Davidson, 2009), européennes (cheptel et des facteurs d'excrétion – Buijsman, 1986) et du modèle Integrator (De Vries & Leip, 2011).

La cascade de l'azote

LE « TROP PLEIN » D'AZOTE SE PERD DANS L'ENVIRONNEMENT, soit dans les eaux de surfaces ou souterraines sous la forme de nitrate ou d'azote organique dissous, soit sous forme d'émissions d'ammoniac, de protoxyde d'azote, d'oxydes d'azote et de diazote dans l'atmosphère. La figure 1.3 met en évidence la multiplicité de transferts, transformations et impacts de l'azote réactif dans les différents milieux (écosystèmes, atmosphère, hydrosphère) et sur l'homme. L'ensemble des flux d'azote réactif constitue la cascade de l'azote. Cette notion apporte une vision dynamique permettant de suivre l'azote et de traduire la complexité de son devenir et des impacts séquentiels en cascade qu'il occasionne suite à son transfert et à ses transformations dans les différents compartiments de l'environnement.

Suivons par exemple une molécule de diazote atmosphérique convertie grâce au processus Haber-Bosch en ammoniac pour produire de l'engrais industriel : la moitié de cet azote se retrouve dans les récoltes utilisées comme aliment pour l'homme ou le bétail ; l'autre moitié s'échappe vers l'atmosphère ou vers l'eau, ou bien est stockée dans le sol sous forme de matières organiques plus ou moins labiles. Cela montre bien que l'agriculture

Figure 1.3. Schéma simplifié de la cascade de l'azote.



Ce schéma simplifié met en évidence la fabrication d'azote réactif (N_r), les principales formes d'azote réactif utilisées ou produites dans l'environnement et les impacts environnementaux. Les flèches bleues représentent les flux intentionnels, celles d'autres couleurs les flux non intentionnels ; les rectangles orange sont les principales formes polluantes et les bleus les neuf principaux enjeux environnementaux. Les estimations de N fixé sont en Tg/an pour le monde (données 2005, Galloway *et al.*, 2008) et pour l'Europe (données 2000, Leip *et al.*, 2011). Source : Sutton *et al.*, 2011, ENA.

est un contributeur majeur de l'enrichissement de l'environnement par des composés azotés. L'ammoniac émis va participer à la pollution atmosphérique en intervenant dans la formation de particules fines dommageables pour la santé, ou sera déposé par la pluie sur un écosystème naturel qu'il va contribuer à acidifier et/ou à eutrophiser. Le sol de l'écosystème enrichi en azote, tout comme celui de la parcelle agricole initiale, pourra aussi émettre de l'oxyde d'azote vers l'atmosphère où celui-ci contribuera à la formation d'ozone troposphérique, perturbant la santé humaine et l'équilibre des écosystèmes. Les micro-organismes présents dans le sol pourront transformer l'azote déposé en nitrate, lequel pourra migrer vers les eaux et les écosystèmes aquatiques, produisant là encore des désordres trophiques ou des toxicités. Ce nitrate pourra aussi être dénitrifié en protoxyde d'azote contribuant alors au réchauffement global et à la dégradation de la couche d'ozone stratosphérique, ou en diazote (dénitrification complète), bouclant ainsi le cycle.

Enfin, le schéma de la cascade montre que les transferts anthropiques tendent à concentrer les processus de transferts atmosphériques et hydrologiques dans les zones où ils vont être utilisés et à alimenter la cascade de l'azote de manière intentionnelle (par exemple, utilisation agricole) ou non intentionnelle (combustion).

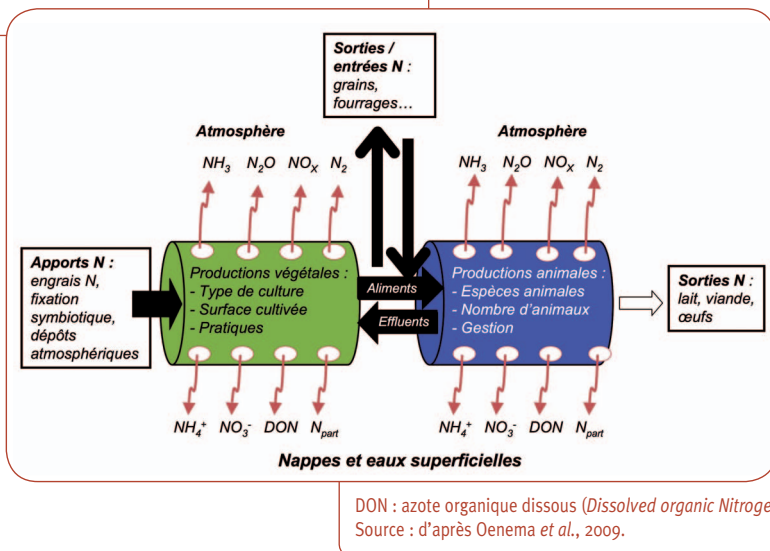
Place de l'élevage dans la cascade de l'azote

AUJOURD'HUI, QUELQUE 80 MILLIONS DE TONNES D'AZOTE sont consommées par an par l'agriculture mondiale (culture et élevage), mais à peine la moitié se retrouve dans les parties récoltées des cultures, le solde restant sur le sol ou se dispersant dans l'environnement. De même, moins de la moitié de la quantité d'azote excrétée par le bétail est réutilisée par les cultures, le reste se retrouvant également dans l'environnement (fig. 1.4).

Que cela soit à l'échelle de l'Europe ou de la France, les animaux consomment la plus grande partie des matières premières végétales produites. Toutes filières confondues, la consommation d'aliments par les filières animales en France était de 100 Mt/an sur la période 2007-2009 (Agreste, 2013). L'herbe et les autres plantes fourragères (maïs, choux, betteraves fourragères...) constituent l'essentiel de la ration des animaux (environ 70 % de la matière sèche disponible) du fait du poids des herbivores dans le cheptel. Les aliments concentrés, comme les grains, graines (céréales, oléagineux) et leurs sous-produits (tourteaux, drêches...) sont utilisés tels quels ou sous forme d'aliments composés élaborés par l'industrie. Ils complètent l'alimentation des herbivores et forment l'ensemble de celle des monogastriques soit 13,9 millions de porcs et 250 millions de volailles en France en 2010. Suivant les types de production animale, les rations pour le bétail oscillent entre 2 et 3 % d'azote dans la matière sèche.

Les animaux rejettent au sol environ 1 820 kt/an d'azote sous forme d'effluents, estimation que l'on peut comparer aux 2 110 kt d'engrais de synthèse appliqués, aux 21 kt sous forme de boues de stations d'épuration et de composts et aux 500 kt environ fixées par les légumineuses, essentiellement prairiales.

Figure 1.4. Circulation de l'azote dans le système de production agricole.



La figure 1.4 montre la circulation de l'azote dans le système de production agricole. Selon les procédures d'évaluation proposées dans le cadre du protocole de Göteborg, l'agriculture européenne (*idem* à l'échelle française) serait responsable de plus de 95 % des émissions d'ammoniac, de plus de 80 % des émissions de protoxyde d'azote et de 5-10 % des émissions d'oxydes d'azote. À cela s'ajoutent plus de 60 % des pertes d'azote vers les eaux, selon l'Agence européenne de l'environnement et l'*European Nitrogen Assessment* (ENA). Le tableau 1.1 synthétise les données et estimations pour l'agriculture française. Il met en relief la part importante de l'élevage dans les émissions d'azote : celui-ci est à l'origine de plus de la moitié des émissions de nitrate et de la grande majorité des émissions vers l'atmosphère (NH_3 et N_2O). On estime que l'élevage est responsable de plus de 80 % des émissions d'ammoniac d'origine agricole dans l'Union européenne, voire sans doute plus de 90 % si on considère les émissions des cultures servant à l'alimentation du bétail. Si les modèles actuels présentent encore des écarts significatifs dans les différents postes d'émission provenant des systèmes d'élevage, les prévisions d'émission totale d'ammoniac sont, elles, convergentes. Suivant le même mode d'estimation, l'élevage est à l'origine de presque les trois quarts des émissions de protoxyde d'azote. Bien que très globales, ces valeurs soulignent l'importance de réduire les pertes d'azote issues de l'élevage.

En Europe, le secteur bovin représente presque la moitié du total des émissions d'ammoniac, les porcins en représentant un quart. En France, les chiffres sont respectivement de 46 %, 12 % et 15 % pour les bovins, porcins et volailles selon le Citepa. Nous ver-

Tableau 1.1. Contribution des cultures et de l'élevage aux émissions d'azote réactif.

Composé	Activité	Total émis par an (kt N)	Contributions de l'agriculture (incluant l'élevage) aux émissions nationales (en %)		Contribution de l'élevage aux émissions nationales (en %)
			Total	Par poste	
NH ₃	Engrais minéraux	598	97,5	16	12
	Effluents d'élevage au champ			37	37
	Pâturage			9	9
	Bâtiments d'élevage			38	
	Stockage d'effluents				37
N ₂ O	Fertilisation des cultures	108	85	35	25
	Pâturage, paddock			12	12
	Bâtiment / Stockage lisier			< 1	< 1
	Bâtiment / Stockage lisier			10	10
	Émissions indirectes			28	24
NO ₃ ⁻	Fertilisation minérale et organique	1 178	> 60		> 50
NO _x	Fertilisation minérale et organique	49	14	5	> 5
	Combustion (engins, feux)			9	?

Les trois premières colonnes correspondent au total cultures + élevage, la dernière uniquement à l'élevage. Dans cette dernière, les chiffres prennent en compte la part de l'azote utilisé pour l'élevage (production de fourrages et autres aliments). L'élevage est ainsi responsable de plus de 90 % des émissions de NH₃, de 70-75 % de N₂O et de plus de la moitié du NO₃⁻. Le point d'interrogation couvre une absence d'estimations connues.

Source : synthèse des données publiées dans la littérature.

rons plus précisément dans le chapitre 4 que les émissions d'ammoniac sont très liées aux excréments d'urée ou d'acide urique (volaille) par les animaux, au type de logement et au mode de stockage des effluents. Environ la moitié de l'azote excrété est perdue dans les bâtiments et lors des phases de stockage, cette valeur étant évidemment très variable en fonction des conditions de logement et de stockage. Sur les 30 % de pertes

qui se produisent à l'intérieur des bâtiments, deux tiers sont dus à la volatilisation de l'ammoniac. Celle-ci sera de nouveau responsable d'une perte importante d'azote (environ 20 % en moyenne) au moment de l'épandage. Les risques de fuites au champ sont ensuite liés aux quantités d'azote apportées au sol (par fertilisation, déjections émises lors du pâturage), au potentiel d'utilisation de l'azote par les plantes, aux propriétés du sol et aux conditions météorologiques.

Les impacts environnementaux

LES TRAVAUX PIONNIERS COORDONNÉS par le chercheur américain James Galloway (2003) puis l'expertise européenne ENA ont dressé un panorama exhaustif des nuisances potentiellement causées par la présence en quantités excessives d'azote réactif dans l'environnement, qu'il soit d'origine agricole ou non, par rapport à ce que les milieux peuvent capter, valoriser ou épurer sans être significativement impactés. Ces impacts concernent une grande diversité d'échelles spatiales, du très local au global, et temporelles. Un même atome d'azote peut, par le biais de ses transformations et transferts, contribuer à plusieurs impacts (tab. 1.2). C'est ainsi que l'ammoniac a tout d'abord été étudié pour son rôle dans l'acidification et l'eutrophisation des milieux, dans le cadre de la pollution de l'air par des transferts à longue distance, et l'attention se focalise maintenant fortement sur son rôle dans la formation de particules atmosphériques fines.

La cascade de l'azote met en relief la complexité et les interactions entre les flux. L'azote est ainsi impliqué dans le changement climatique *via* les émissions de protoxyde d'azote par les sols. Le protoxyde d'azote contribue pour 4 % aux émissions totales de gaz à effet de serre à l'échelle globale (soit 15-19 mW/m²) et pour 9 % à l'échelle française selon le Citepa (2009). Mais à l'inverse les dépôts atmosphériques d'azote (- 30 à + 8 mW/m²), le pouvoir diffusant des aérosols (- 27,5 à - 5,5 mW/m²), produits à partir des émissions d'ammoniac et d'oxydes d'azote, et l'impact de l'ozone sur le puits de CO₂ de la biosphère (2,3-6,6 mW/m²) atténuent l'effet de serre. Au final, et malgré les incertitudes, on considère que l'effet net de l'azote est légèrement refroidissant. L'azote est par ailleurs impliqué dans l'acidification des eaux et des sols *via* les transferts et dépôts atmosphériques d'ammoniac. Ceux-ci y contribuent par la nitrification qui libère des protons et par la présence d'ions nitrate dans les eaux de drainage, qui entraînent avec eux les cations alcalins du complexe d'échange des sols. L'azote est également fortement impliqué dans les problématiques de qualité de l'air. L'ammoniac est en cause car il forme des particules très fines par réaction avec les acides atmosphériques. Ces particules constituent une fraction importante, fréquemment supérieure à 25-30 %, des particules atmosphériques polluantes présentes dans les zones rurales (PM₁₀, PM_{2,5} et PM₁). Les oxydes d'azote contribuent aussi au processus principal de formation de l'ozone par réaction avec des composés organiques volatils. Enfin, l'accroissement des teneurs en azote réactif dans les bassins d'alimentation des eaux et dans les eaux elles-mêmes participe à leur eutrophisation. Pour les eaux douces, les études récentes montrent que, dans de nombreux