



Les flux d'azote liés aux élevages

Réduire les pertes, rétablir les équilibres

Rapport d'expertise réalisé à la
demande des ministères en charge
de l'Agriculture et de l'Ecologie

Responsables scientifiques de l'expertise

Jean-Louis Peyraud – Inra, Directeur de recherche, unité mixte de recherche 1348 PEGASE, Physiologie, Environnement et Génétique pour l'Animal et les Systèmes d'Elevage

Pierre Cellier - Inra, Directeur de recherche, unité mixte de recherche 1091 EGC, Environnement et Grandes Cultures

Le rapport d'expertise a été élaboré par les experts scientifiques sans condition d'approbation préalable par les commanditaires ou l'Inra. Les experts sont auteurs des chapitres. La liste des experts figure en fin de document. Une synthèse de ce rapport a été validée par les auteurs du rapport. Ces documents sont disponibles sur le site web de l'Inra (www.inra.fr).

Secrétariat de rédaction du rapport

Catherine Donnars et Olivier Réchauchère – Inra, DEPE

Directeur de la publication

Philippe Chemineau – Inra, Directeur de la délégation à l'Expertise scientifique, à la Prospective et aux Etudes (DEPE)

Contacts

Pierre Cellier : pierre.cellier@grignon.inra.fr

Jean-Louis Peyraud : jean-louis.peyraud@rennes.inra.fr

Catherine Donnars : catherine.donnars@paris.inra.fr

Pour citer ce document

J.-L. Peyraud, P. Cellier, (coord.), F. Aarts, F. Béline, C. Bockstaller, M. Bourblanc, L. Delaby, C. Donnars, J.Y. Dourmad, P. Dupraz, P. Durand, P. Faverdin, J.L. Fiorelli, C. Gagné, A. Girard, F. Guillaume, P. Kuikman, A. Langlais, P. Le Goffe, S. Le Perchec, P. Lescoat, T. Morvan, C. Nicourt, V. Parnaudeau, J.L. Peyraud, O. Réchauchère, P. Rochette, F. Vertes, P. Veysset, 2012. *Les flux d'azote liés aux élevages, réduire les pertes, rétablir les équilibres*. Expertise scientifique collective, rapport, Inra (France), 527 pages.

Le présent document constitue le rapport d'expertise scientifique sollicitée conjointement par le ministère de l'alimentation, de l'agriculture et de la pêche, et par le ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable, des transports et du logement et financé par le ministère de l'alimentation, de l'agriculture et de la pêche sur le programme 215 fonctionnel 0215-02-03 (étude 10.06 ; signée en 08/2010 pour un montant de 80 000€). Son contenu n'engage que la responsabilité de ses auteurs.

Sommaire

INTRODUCTION

Contexte et méthode de l'expertise	15
Contexte de la demande d'expertise	15
Les questions posées aux experts scientifiques	16
Principes et méthode d'expertise	19
Les principes	19
La conduite du projet	19
Analyse du corpus bibliographique	21
Qualification des experts	21
Constitution du corpus documentaire	22
Analyse du corpus final	24
Sources du corpus	26

PARTIE I : ORIGINES ET ETAT DES LIEUX DES FLUX D'AZOTE LIES AUX ELEVAGES 27

Chapitre 1. La cascade de l'azote et l'élevage, et ses conséquences

1.1. Des évolutions majeures dans le cycle de l'azote depuis le 19ème siècle	30
1.2. L'azote réactif dans l'environnement : formes, production et transformation	32
1.2.1. Les formes de l'azote dans la biosphère	32
1.2.2. Les processus de formation primaire d'azote réactif	33
1.3. La cascade de l'azote : processus de transformation et de transfert au sein des écosystèmes et de la biosphère	35
1.3.1. Une chaîne de processus et d'impacts entre et au sein des différents compartiments de l'environnement	35
1.3.2. Les processus de transformation de l'azote en agriculture	37
1.3.3. Les processus de transformation de l'azote alimentaire par les animaux	41
1.3.4. Les processus de transfert de l'azote dans l'environnement naturel et agricole	44
1.3.5. Une redistribution continue de l'azote au sein des agro écosystèmes	47
1.4. Couplage entre cycle de l'azote, du carbone et du phosphore	48
1.5. Impacts environnementaux de l'azote et coûts induits	50
1.5.1. Changement climatique	50
1.5.2. Transferts et dépôts atmosphériques à longue distance	51
1.5.3. Qualité de l'air	53
1.5.4. Contamination des eaux et conséquences	54
1.5.5. L'évaluation économique des impacts environnementaux de l'azote est délicate	55
1.5.6. Interpellation sur les modes de consommation et changements globaux	56
1.6. L'azote dans les systèmes d'élevage	56
1.6.1. Circulation de l'azote au sein de l'exploitation d'élevage	56

1.6.2. Les spécificités de l'élevage dans la cascade de l'azote	59
1.6.3. Les flux d'azote dans différents systèmes de productions animales	61
Références bibliographiques du chapitre 1	65
Analyse du corpus bibliographique du chapitre 1	78

Chapitre 2. Les flux d'azote au sein des territoires et le rôle de l'élevage

2.1. Historique des questions posées par l'azote	81
2.2. Redistribution de l'azote réactif à différentes échelles	83
2.2.1. Le bilan atmosphérique de l'azote à l'échelle globale	83
2.2.2. Echanges internationaux d'azote réactif	84
2.2.1. Agrégation à l'échelle de grands territoires : facteurs d'influence, intérêt et limites.	84
2.2.2. Flux à l'échelle de grands bassins versants (Seine, Moselle, Escaut, Danube ...)	86
2.2.3. Flux à l'échelle de paysages et bassins versants (<1000 km ²)	87
2.2.1. Synthèse sur la redistribution de l'azote à l'échelle des territoires	88
2.3. Les effets des excès d'azote sur les milieux dépendent des caractéristiques des territoires	89
2.4. Les flux d'azote à différents niveaux d'intégration	92
2.4.1. Variabilité des estimations	92
2.4.2. Variations géographiques des flux à l'échelle de l'UE-27	94
2.4.3. La France : de forts contrastes entre les régions et entre systèmes	99
2.4.4. Une région française particulièrement concernée par les excédents d'azote : la Bretagne	102
Références bibliographiques du chapitre 2	108
Analyse du corpus bibliographique du chapitre 2	120

Chapitre 3. Mise en société du problème du nitrate

3.1. Un cadre historique qui marque encore aujourd'hui les processus sociaux à l'œuvre, en France	123
3.1.1. Les nuisances à l'origine de l'encadrement juridique de la pollution des élevages	123
3.1.2. La consommation d'azote, facteur de modernisation de l'agriculture, augmente lentement jusqu'aux années 1950	125
3.1.3. Une évolution forte du travail d'éleveur et une distanciation de la relation à la terre permises par la généralisation de la fertilisation azotée	126
3.1.4. Une lente traduction environnementale de la spécialisation des éleveurs	128
3.2. L'ambiguïté d'approches volontaires et cogérées pour appliquer la directive « Nitrates »	129
3.2.1. Ferti-Mieux : une vitrine professionnelle	130
3.2.2. Le Programme de maîtrise des pollutions d'origine agricole : les limites environnementales de la modernisation des élevages	131
3.3. L'usage de l'azote dans une nouvelle configuration sociale	133
3.3.1. Recomposition des territoires et changements des conceptions de l'usage de l'azote	133
3.3.2. Les expertises administratives sources de critiques internes des politiques publiques	135
3.3.3. Interrogations associatives et publiques sur la pollution des eaux par le nitrate	136
3.3.4. Interprétation du cas breton d'un point de vue de la science politique	138

3.3.5. La gestion du nitrate comme travail problématique pour les éleveurs	140
3.3.5.1. Les critiques du travail d'élevage	140
3.3.5.2. Critiques et isolement des éleveurs	141
3.3.5.3. L'astreinte des critiques	141
3.3.5.4. Des critiques insérées dans des territoires	142
3.3.5.5. Des critiques à la co-construction et à la démonstration du travail	143
3.4. Conclusion	144
Références bibliographiques citées	145
Analyse du corpus bibliographique du chapitre 3	157

Chapitre 4. Les dynamiques de concentration, origines économiques des excès d'azote au niveau des territoires

4.1. Origines économiques des excès d'azote au niveau des territoires	161
4.1.1. Economies de coût liées à la taille des élevages	162
4.1.2. Economies liées à la concentration spatiale de la production	164
4.1.3. Le rôle de la restructuration industrielle dans les filières animales dans le processus d'agglomération	166
4.1.4. Des économies d'échelle permises par la concentration spatiale dans les industries amont et aval	166
4.1.5. Rôle de la proximité géographique des éleveurs et des industriels	167
4.1.6. Rôle de l'intégration verticale	169
4.2. Régulation environnementale et relocalisation des productions animales	170
4.2.1. Décalage persistant entre les besoins d'azote et l'azote organique issu des productions animales	170
4.2.2. La localisation des productions animales est-elle sensible aux différentiels de coûts dus à la réglementation ?	172
4.2.3. La disponibilité foncière limite-t-elle la concentration spatiale des productions animales ?	173
4.3. Quel avenir ?	174
4.3.1. Le prix de l'énergie : vers une meilleure valorisation des déchets ?	174
4.3.2. Déréglementation des marchés agricoles : vers une plus grande concentration la production ou une plus grande autonomie alimentaire des territoires ?	175
4.3.3. Faut-il réguler les industriels des filières animales ?	176
4.4. Conclusion	177
Références bibliographiques du chapitre 4	179
Analyse du corpus bibliographique du chapitre 4	184

**Chapitre 5. Quantification des flux d'azote à l'échelle de l'animal et des ateliers
d'élevage**

5.1. Description et quantification des flux d'azote en élevage porcin	190
5.1.1. Bilan d'azote des porcs	190
5.1.2. Influence de l'alimentation sur l'excrétion d'azote des porcs	193
5.1.3. Devenir de l'azote excrété par les porcs	194
5.1.4. Estimation des bilans d'azote des élevages de porcs	199
5.2. Les flux d'azote en élevage avicole	201
5.2.1. Les flux d'azote au sein d'ateliers avicoles	201
5.2.1. Facteurs de variation de l'excrétion d'azote	202
5.3. Les flux d'azote en élevage bovin	208
5.3.1. Bilan azoté chez les ruminants	208
5.3.2. Facteurs de variation de l'excrétion d'azote	209
5.3.3. Réduire les rejets à productivité égale des animaux.	211
5.3.4. Facteurs de variation des émissions d'ammoniac par les bovins en stabulation	213
5.3.5. Spécificité de l'azote excrété par les bovins au pâturage.	215
Références bibliographiques du chapitre 5.	216

**Chapitre 6. Transformation, devenir et valorisation de l'azote : des effluents
d'élevage aux systèmes de cultures**

6.1. Flux d'azote dans la gestion des déjections pour les différentes filières de production animale	231
6.2. Traitement des déjections	235
6.2.1. Séparation de phase	236
6.2.2. Epuration biologique	237
6.2.3. Compostage	237
6.2.4. Digestion anaérobie	238
6.2.5. Autres traitements	239
6.3. Techniques de réduction des pertes gazeuses d'azote au stockage et à l'épandage des effluents d'élevage	240
6.3.1. Volatilisation d'ammoniac	240
6.3.2. Emissions de N ₂ O suite à l'épandage des effluents d'élevage	244
6.4. Valorisation agronomique des effluents d'élevage	249
6.4.1. Variabilité de la composition des effluents d'élevage	249
6.4.2. Efficience N des effluents à court terme (cycle cultural, année)	249
6.4.3. Effets à moyen terme des effluents sur le stockage de C et la minéralisation de N	253
6.4.4. Gestion et utilisation des effluents d'élevage	255

6.5. Les flux d'azote à l'échelle des prairies et des systèmes de culture	257
6.5.1. Les flux d'azote en prairies : devenir de l'azote "non maîtrisable" des déjections au pâturage	257
6.5.2. Pertes d'azote à l'échelle de la prairie	260
6.6. La gestion des rotations culturales pour limiter les pertes d'azote	267
6.6.1. Valorisation de l'azote minéralisé lors de la destruction des prairies ou de légumineuses à graines	267
6.6.2. Mise en place de cultures et d'intercultures aptes à réduire les pertes de nitrate	269
Références bibliographiques du chapitre 6	272

Chapitre 7. Bilans des flux d'azote au niveau des systèmes de production animale

7.1. De l'animal au système : intégrer l'ensemble des paramètres pour évaluer les risques environnementaux	297
7.2. Une grande diversité de systèmes de production animale	299
7.2.1. Chez les monogastriques, une diversité plus grande à l'échelle de l'exploitation qu'à l'échelle de l'atelier	299
7.2.2. Forte variation du degré d'intensification au sein des systèmes de production de ruminants	300
7.3. Importance du chargement animal dans les risques de fuites d'azote	301
7.3.1 Effet du chargement en élevage porcin	301
7.3.2 Effet du chargement associé au niveau des intrants, en élevage laitier	303
7.4. Systèmes fourragers : atouts et limites de la prairie et des légumineuses	307
7.4.1. Atouts de la prairie dans la gestion de l'azote	307
7.4.2. Atouts des légumineuses pour renforcer l'autonomie protéique	309
7.5. L'agriculture biologique : mode de production qui limite les flux d'azote	312
7.5.1. Des pertes de nitrate maîtrisées à l'échelle des exploitations.	312
7.5.2. Des évaluations plus contrastées sur d'autres sorties environnementales.	313
7.6. Exemples de variation des bilans d'azote des exploitations en fonction des systèmes d'élevage	313
7.7. La gestion des flux d'azote à l'échelle supra exploitation et territoriale	317
7.7.1. Transfert d'azote entre exploitations	317
7.7.2. Opérations de reconquête de la qualité de l'eau dans des territoires à enjeux forts	319
7.7.3. Favoriser l'épuration par les milieux : zones humides, zones de recapture	321
Références bibliographiques citées dans le chapitre 7	323

Conclusion de la partie II	333
Analyse de la bibliographie de la partie II	334

Chapitre 8. Méthodes d'évaluation environnementale et choix des indicateurs

8.1. Les grands types d'indicateurs et leurs fonctions	339
8.1.1. De l'évaluation aux impacts, des impacts aux indicateurs	339
8.1.2. Différents types d'indicateurs et typologie associée	340
8.1.3. Choix préalables à la sélection d'indicateurs	343
8.1.4. Spécificités liées à l'évaluation des flux d'azote en élevage	343
8.2. Indicateurs simples de pratiques et de sensibilité du milieu	345
8.2.1. Les principaux indicateurs relevant de cette catégorie	345
8.2.2. Les principales limites de ces indicateurs	346
8.3. Indicateurs fondés sur le calcul d'un bilan ou d'un solde	347
8.3.1. Principaux types de bilans	348
8.3.2. Les échelles de calculs de bilans	353
8.3.1. Intérêts et limites des différents bilans	353
8.3.2. Utilisation et interprétation des bilans	357
8.3.3. Utilisation des bilans comme outil pour améliorer les pratiques d'élevage	365
8.4. Indicateurs de pertes d'azote par émissions gazeuses et lixiviation du nitrate	367
8.4.1. Facteurs d'émission de l'ammoniac et de N ₂ O au niveau des bâtiments et de la gestion des effluents	367
8.4.2. Indicateurs prédictifs au champ	369
8.4.1. Indicateurs prédictifs issus de modèles	370
8.4.2. Indicateurs de mesures de terrain	373
8.5. Indicateurs d'état et d'impacts	374
8.6. Les méthodes intégrées d'évaluation des impacts	376
8.6.1. L'analyse de cycle de vie	376
8.6.2. L'empreinte écologique et méthodes dérivées	379
8.7. Les questions et les incertitudes liées à l'utilisation des indicateurs	379
8.7.1. Les problèmes liés au changement d'échelle	379
8.7.2. Valeurs de référence et unités de l'indicateur	380
8.7.3. Évaluation de l'incertitude liée aux indicateurs produits	381
8.7.4. Qualité prédictive de l'indicateur	383
8.7.5. Intégration d'autres impacts : quels indicateurs pour le phosphore ?	384
8.7.6. La question de l'agrégation des indicateurs	385
8.8. Conclusion : quels indicateurs choisir ?	388
Références bibliographiques	389
Analyse du corpus bibliographique du chapitre 8	412

Chapitre 9. Le droit face à la gestion des effluents et des émissions d'azote

9.1. Un dispositif juridique maintenant le potentiel agronomique des effluents d'élevage.	415
9.1.1. La mise en place de zonages écologiques spécifiques	416
9.1.2. La gestion des effluents par la législation sur les milieux aquatiques	418
9.1.3. La gestion des effluents par la législation sur les installations classées	424

9.1.4. Les élevages non classés : quel régime applicable ?	429
9.1.5. La qualification de déchet écartée	429
9.2. La fragilité du système juridique existant : entre insuffisances du droit réglementaire et mise en œuvre lacunaire de la responsabilité	432
9.2.1. -Une multiplication des instruments au secours des insuffisances du droit réglementaire de l'environnement	432
9.2.2. Les lacunes de la mise en œuvre de la responsabilité	437
9.3. Quelle prise en compte juridique des autres émissions des effluents ?	440
9.3.1. La gestion des effluents d'élevage dans leur rapport à la proximité ou la problématique de l'ammoniac	441
9.3.2. La gestion des effluents d'élevage à la lumière des changements globaux (changement climatique et biodiversité)	445
Annexe : focus sur le contentieux communautaire lié à la directive « Nitrates » du 12/12/1991	450
Références bibliographiques du chapitre 9	454
Analyse du corpus bibliographique du chapitre 9	460

Chapitre 10. : Les instruments de régulation des pollutions des élevages : une analyse économique

10.1. Cadre économique de la régulation	464
10.2. Incitations économiques versus quotas	467
10.3. Taxation, subvention et principe pollueur-payeur	468
10.4. Régime de responsabilité	470
10.5. Choix de l'indicateur adapté à la pollution des élevages	471
10.5.1. Le contenu en azote des inputs	471
10.5.2. Les Outputs	474
10.5.3. Les indicateurs de fuites d'azote	474
10.5.4. Les pratiques agricoles	475
10.5.5. La pollution ambiante	476
10.6. Application des marchés de droits à polluer à l'élevage	476
10.7. Démarches volontaires et coopération	481
10.7.1. La littérature économique sur les approches volontaires)	481
10.7.2. Volontariat et coopération	482
10.8. La France n'a pas fait les mêmes choix que les pays du nord de l'Europe	484
10.8.1. Le dispositif français	484
10.8.2. Le modèle danois suivi par les pays du nord	487
10.9. Synthèse et conclusions	489
Références bibliographiques du chapitre 10	494
Analyse du corpus bibliographique du chapitre 10	500

PARTIE IV : OPTIONS POUR L'ACTION	501
Chapitre 11. Options pour utiliser moins et mieux l'azote	
11.1. Objectifs visés	505
11.2. Cadre de réflexion et outils d'analyse adaptés aux objectifs	506
11.3. Accroître l'efficacité de l'azote au sein des systèmes de production animale	508
11.3.1. Au niveau de l'atelier « gestion des effluents »	509
11.3.2. Au niveau de l'atelier « sol-cultures »	510
11.3.3. Au niveau de l'atelier « troupeau »	511
11.4. Gérer l'azote à l'échelle des territoires sensibles	511
11.4.1. Options dans les territoires avec de fortes charges animales	511
11.4.2. Une transformation plus radicale vers des systèmes à bas intrants et à très basses fuites d'azote	512
11.5. Effets indirects des mesures prises pour améliorer l'efficacité de l'azote sur les autres performances de l'exploitation	512
11.6. Pistes pour l'action publique	513
11.6.1. Des moyens d'action différents selon la relation entre les dommages et la localisation des émissions polluantes	513
11.6.2. Des pistes encore peu explorées	516
11.6.3. Des outils novateurs encore en débat	517
11.7. Des éléments qui peuvent affecter la gestion de l'azote au sein des systèmes de production	518
CONCLUSIONS	519
Conclusions du rapport d'expertise	
L'état des connaissances sur l'azote en élevage	521
Des pistes de progrès identifiées à l'échelle de l'exploitation	522
...et à l'échelle des territoires	523
Des besoins de recherches identifiés	525
Sigles et acronymes	526
Liste des experts	527

Introduction

Auteurs

Catherine Donnars

Agnès Girard

Françoise Guillaume

Sophie le Perchec

Olivier Réchauchère

Avec la contribution de l'ensemble des experts

Contexte et méthode de l'expertise

Les ministères en charge de l'Agriculture et de l'Ecologie ont sollicité l'Inra, au printemps 2010, pour réaliser une expertise scientifique collective sur les bilans et flux d'azote liés aux élevages. L'introduction précise son objet, le contexte, la conduite de l'expertise et ses sources d'information. Les experts mobilisés sont cités en dernière page du document.

Contexte de la demande d'expertise

L'azote, un fertilisant indispensable à la production agricole. L'azote est un des quatre éléments chimiques principaux constitutifs de la matière vivante, avec l'hydrogène, l'oxygène et le carbone. Il se singularise par son abondance et par la multiplicité de ses formes : depuis la molécule de diazote (N_2) qui constitue 78% de l'atmosphère terrestre et 99% de l'azote présent à l'échelle du globe, jusqu'à l'atome d'azote (N) qui entre dans la composition des protéines et de l'ADN, en passant par des formes dites réactives (réagissant en présence d'éléments environnants) qui peuvent être sous formes oxydées (NO_x , N_2O , nitrate) ou réduites (NH_3 , NH_4^+) et encore d'autres formes organiques comme l'urée. Ce sont ces formes réactives qui sont au cœur de l'expertise car d'une part les plantes ne peuvent utiliser l'azote que sous ses formes réactives (mises à part les légumineuses qui fixent le diazote par le biais d'une symbiose microbienne) et d'autre part, l'augmentation de fertilisants azotés industriels pour la production agricole s'est accompagnée de fuites depuis les agrosystèmes, qui sont à l'origine d'impacts multiples sur l'environnement et la santé. Ces nombreuses transformations et transferts ont incité à représenter les cycles, pertes dans l'environnement et impacts sous la forme d'une « cascade de l'azote » qui rend davantage visible les pertes, les transferts entre milieux et les impacts que ne le faisait la notion de cycle de l'azote d'un point de vue essentiellement agronomique.

Si la problématique de l'azote en France s'est souvent réduite aux pollutions de l'eau potable et des écosystèmes aquatiques par le nitrate, ce n'est pas la seule forme d'azote à poser des problèmes environnementaux. Les émissions gazeuses de composés azotés participent, par différentes voies, à la dégradation de la qualité de l'air, à l'acidification, à l'eutrophisation et aux pertes de biodiversité des milieux naturels, à la destruction de la couche d'ozone stratosphérique et au changement climatique. Une récente expertise scientifique européenne (*European Nitrogen Assessment*, 2011) met ainsi au premier rang des coûts pour la société les impacts négatifs de l'azote réactif atmosphérique sur la santé humaine, et seulement en second les impacts sur les écosystèmes par le biais de la pollution des eaux, eux-mêmes bien avant les impacts de la qualité des eaux sur la santé.

L'élevage, grand consommateur et émetteur d'azote réactif. Plusieurs raisons invitent à regarder plus particulièrement le rôle de l'élevage dans la cascade de l'azote. En élevage, l'essentiel de l'azote provient des grains, de tourteaux et des fourrages, eux-mêmes produits en partie avec des engrais minéraux azotés. Cette part pourrait encore progresser en lien avec la demande mondiale croissante en produits alimentaires animaux, ce qui induit un besoin croissant de quantités d'azote disponibles. Ensuite, la transformation de l'azote des végétaux en produits animaux est un processus peu efficace : moins (voire beaucoup moins) de la moitié de l'azote apporté par les aliments se retrouve dans le lait, les œufs ou la viande sous forme de protéines. Le reste repart dans l'environnement pour y être recyclé, transformé, stocké ou bien transféré vers l'air, l'eau et le sol et peut alors être source de pollution. Cette faible efficacité biotechnique est associée à une faible efficacité financière et énergétique de la ressource azotée. Elle est aujourd'hui interrogée quant à sa durabilité.

Enfin, l'expertise intervient alors que plusieurs rapports internationaux, dont ceux publiés par la FAO (2006) et par l'*European Nitrogen Assessment* (ENA, 2011), ont dressé un bilan critique du rôle de l'élevage dans les déséquilibres environnementaux et les risques sanitaires, tout en notant ses externalités positives dans le domaine de la biodiversité et de la valorisation de territoires. Ces rapports posent des questions sur le développement de l'élevage et suscitent un débat d'autant plus tendu que la majorité des secteurs d'élevage traversent une situation économique difficile, voire de crise.

Le cadre réglementaire. Les pollutions azotées font l'objet de politiques en Europe et en Amérique du Nord, tant pour ce qui concerne la pollution des eaux que celles de l'atmosphère et de la protection des écosystèmes. La directive « Nitrates » du 12 décembre 1991 vise à protéger la qualité des eaux et de nombreuses mesures ciblent la gestion de l'azote dans les élevages et les cultures (effluents, épandage, fertilisation, culture piège à nitrate). La transposition française de la directive a nourri de nombreux débats largement analysés par la littérature scientifique et fait l'objet de tensions avec la Commission européenne. Celle-ci a engagé en 2009 à l'encontre de la France un pré-contentieux portant sur la transposition de la directive « Nitrates » au niveau national. Les griefs concernent en particulier les valeurs de référence de rejets d'azote excrété par les animaux, la prise en compte de la volatilisation d'ammoniac et les périodes d'interdiction d'épandages. La Commission avait auparavant contesté l'application de la directive 75/440 sur la qualité des eaux superficielles destinées à l'eau potable : ce contentieux concernant la Bretagne s'est éteint en 2010. La Commission vient par ailleurs de faire une demande d'information sur la mise en œuvre du Plan Algues vertes (2011). Les réglementations sur l'atmosphère s'inscrivent dans le cadre de la convention de Genève et du protocole de Göteborg, au travers, en particulier, de la directive européenne « NEC » (*National Emission Ceilings*, directive fixant des plafonds d'émission nationaux pour certains polluants atmosphériques, dont l'ammoniac, les NOx et les particules, 2001). Des plafonds d'émissions et des pénalités pour dépassement des seuils autorisés devraient durcir l'encadrement juridique dans un futur proche (révision de la Directive NEC en cours). En 2010, la France respectait son plafond d'émission de NH₃ mais, ce plafond pourrait baisser de 20 à 30%. Le plan national santé-environnement (<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Plan-National-Sante-Environnement.20693.html>) et le Plan « Particules » citent les émissions d'ammoniac auxquelles l'élevage contribue majoritairement.

Les questions posées aux experts scientifiques

C'est dans ce contexte que les ministères en charge de l'Ecologie et de l'Agriculture ont sollicité l'Inra pour coordonner une expertise scientifique collective sur les bilans et flux d'azote liés aux élevages. Celle-ci doit mettre à disposition des décideurs et des acteurs publics et privés les connaissances scientifiques disponibles sur ces flux et sur leur devenir, et identifier des options permettant de réduire les pressions de l'azote sur l'environnement. L'examen des impacts de l'azote ne fait pas partie du périmètre de l'expertise. Toutefois, il est apparu important de les rappeler (chapitre 1). Enfin, l'expertise doit privilégier, dans la littérature scientifique internationale, les résultats transposables au contexte français.

Il faut noter qu'en se focalisant sur les relations entre azote et élevage, l'expertise ne reflète pas l'impact global, positif ou négatif de l'élevage sur l'environnement, et ne traite pas non plus de la contribution de l'élevage aux dynamiques des territoires ruraux.

Les cinq objectifs assignés à l'expertise :

- 1) « Réaliser une synthèse actualisée des connaissances permettant de quantifier les flux et identifier les sources d'incertitude dans leur quantification au niveau de l'animal, de l'atelier et de l'exploitation d'élevage, incluant les cultures associées à l'élevage en tant que compartiments intermédiaires de stockage et de régulation des flux. Seront étudiés centralement les flux d'azote et également, lorsqu'ils sont associés à la problématique azote, ceux du phosphore et plus marginalement ceux du carbone, des métaux lourds, voire d'autres éléments chimiques. Les compartiments environnementaux cibles considérés sont l'eau, l'air et le sol en tant qu'écosystèmes récepteurs. L'analyse de la pression environnementale issue des flux d'azote liés à l'élevage (et autres éléments associés) n'inclut pas a priori l'évaluation des impacts.
- 2) Intégrer l'ensemble du cycle de l'azote et éventuellement d'autres éléments associés pour comprendre le rôle du système d'élevage à l'échelle de l'exploitation agricole qui est l'unité de référence pour les politiques agricoles et environnementales. Comme les ressources scientifiques portent souvent sur un niveau infra : l'atelier d'élevage, l'animal, la parcelle, le bâtiment, la zone de stockage, ou sur un niveau supra : le bassin versant, le paysage, il s'agira de rechercher les correspondances, combinaisons et interactions entre échelles pour approcher au mieux l'exploitation. Différents types d'élevage seront pris en considération : bovins, volailles, porcs et à la marge petits ruminants ; ainsi que différents types d'exploitations afin d'appréhender différents systèmes et modes de production (intensif, extensif, bio...) ainsi que la variabilité intra liée aux pratiques.
- 3) Réaliser une analyse comparée des flux d'azote pour différents types d'élevage dans le contexte français et de quelques pays pris à titre d'exemples dans et hors de l'Union européenne.
- 4) Faire ressortir de cette synthèse pluridisciplinaire une analyse critique des méthodes d'évaluation (bilans, cycles de vie, coût/bénéfice...) et des indicateurs de pression environnementale.
- 5) Identifier différents leviers (structurels, organisationnels, technologiques, territoriaux) disponibles pour réduire la pression des émissions azotées et autres rejets associés à l'élevage et aux différents systèmes d'exploitation. Cette analyse soulignera les déterminants des choix des exploitants, la vulnérabilité des options choisies et les conséquences notamment économiques de ces choix. »

Tableau 0.1 : Evénements scientifiques, politiques et sociétaux autour de l'azote. Ce tableau - non exhaustif - montre que la problématique « azote » a fait l'objet de politiques et protocoles internationaux qui ont progressivement pris en compte l'ensemble des compartiments environnementaux. Dans cette même logique, l'approche scientifique de la question devient, depuis peu, plus systémique.

F : France, I : international ; UE : Union européenne ; USA : Etats-Unis d'Amérique

Années	Conventions politiques et réglementations	Evénements scientifiques	Quelques événements marquants en France
17 ^e siècle		(1675) John Evelyn écrit dans le <i>Philosophical Discourse of the Earth</i> que l'eau de pluie est imprégnée de nitre (KNO ₃)	
18 ^e siècle		(1789) C.L. Berthollet, chimiste français, découvre l'ammoniac (1790) Le terme nitrogène est arrêté par le chimiste français Jean-Antoine-Claude Chaptal	
19 ^e siècle	(F 1810) 1 ^{er} décret relatif "aux manufactures et ateliers qui répandent une odeur insalubre et incommode"	(1895) L'ammoniac est produit en laboratoire.	
1900-1970		(1913) Réaction d'Haber-Bosch : Fritz Haber met au point un procédé chimique permettant d'extraire du diazote atmosphérique sous forme d'ammoniac liquide ; Carl Bosch permet son développement industriel pour produire des engrais azotés synthétiques (urée et nitrate d'ammonium) Aujourd'hui un tiers de la production agricole mondiale dépend d'engrais de synthèse	
1970- 1980	(USA) Premiers "Clean Air Act" (régulièrement actualisés) (UE 1975) 1 ^e Directive européenne sur les eaux superficielles fixant la norme de 50 mg NO ₃ -/L	Travaux au Royaume-Uni sur l'accroissement du nitrate dans les eaux superficielles et lien de cause à effet avec les problèmes environnementaux dans les régions d'agriculture intensives	(1980) Rapport "Henin" : premier rapport inter-Inspection critique envers les politiques de lutte contre les pollutions des eaux par le nitrate d'origine agricole (1984) Création du Comité d'orientation pour des pratiques agricoles respectueuses de l'Environnement (Corpen)
Années 1990	(UE 1991) Directive "Nitrates" portant sur le contrôle de la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole (UE 1996) Directive "Integrated Pollution Prevention and Control" (IPPC) visant à prévenir et réduire les pollutions chroniques émises par les installations estimées les plus polluantes : chimie, métallurgie, papeterie, verrerie, mais aussi les élevages industriels (UE 1996) Directive sur la qualité d'air dans l'Union afin de mieux protéger la santé humaine et l'environnement. Elle vise 12 polluants ou familles de polluants dont SO ₂ , les particules en suspension et NO ₂ (F- 1996) Loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (Laure), qui a lancé la surveillance de la qualité de l'air à l'échelle nationale et des actions concrètes pour réduire les niveaux de pollution. (I 1997) Protocole de Kyoto engageant 38 pays industrialisés à réduire les émissions de six gaz à effet de serre: CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFC, PFC, SF ₆	(1995) James Galloway publie un article fondateur sur la cascade de l'azote et ses conséquences environnementales à l'échelle mondiale. (1998) Lancement d'une initiative internationale sur l'azote (http://initrogen.org/) lors de la <i>First International Nitrogen Conference</i> aux Pays-Bas.	(1993) Eau et Rivières de Bretagne informe la Commission européenne (CE) "de l'absence de programme de reconquête de la qualité de l'eau sur 4 rivières bretonnes". (1993) : 1 ^{er} PMPOA (Programme de maîtrise des pollutions d'origine agricole)

	<p>(USA 1998) Première convention sur le péril des blooms d'algues portant sur la recherche et le contrôle</p> <p>(I 1999) Protocole de Göteborg engageant 26 pays européens à réduire les impacts de la pollution atmosphérique sur la santé et l'environnement. Sont concernées les émissions de SO₂, NO_x et NH₃, responsables de l'acidification et de l'eutrophisation, et les émissions de composés organiques volatiles, qui, avec les NO_x, donnent naissance à l'ozone</p>		
Années 2000	<p>(UE 2000) Directive-cadre sur l'eau (DCE) visant à prévenir et réduire la pollution des eaux et à promouvoir son utilisation durable</p> <p>(UE 2001) Directive "National Emission Ceilings" (NEC) qui fixe des plafonds nationaux d'émissions pour 4 polluants atmosphériques : NO_x, SO₂, COV et NH₃. Les États membres doivent respecter ces plafonds à partir de 2010</p> <p>(F 2006) Loi sur l'eau visant le bon état écologique des eaux transposant la DCE</p> <p>(UE 2008) Directive cadre sur les déchets qui introduit la possibilité de changer le statut d'un déchet s'il y a opération de valorisation.</p> <p>(UE 2008) Directive sur la qualité de l'air ambiant</p> <p>(F 2009 et 2010), Lois Grenelle I et Grenelle II incluant des "schémas régionaux du climat, de l'air et de l'énergie"</p>	<p>(UE 2006-2011) Projet ESF-Nine (Nitrogen in Europe de l'European Nitrogen Foundation).</p> <p>(UE 2005-2010) Action COST729 "Assessing and managing nitrogen fluxes in the atmosphere-biosphere system in Europe".</p> <p>(UE 2006-2011) Projet NitroEurope (FP6).</p> <p>(I 2008) Task Force on Reactive Nitrogen (http://www.clrtap-frn.org/) dans le cadre de la Convention de Genève sur le Transport de Polluants à longue Distance et groupe-miroir GT-FAR (groupe de travail français sur l'azote réactif) pour la France</p>	<p>(2001) La Cour de Justice Européenne condamne la France pour avoir enfreint la directive européenne de 1975 protégeant les eaux bretonnes vis-à-vis des nitrates (>50 mg/L)</p> <p>(2002) : 2^e PMPOA</p> <p>(2004-2008) 1^{er} Plan santé environnement (2^e plan 2009-2013)</p> <p>(2004-2011) Plan climat (intégrant une réduction des émissions liées à la gestion des effluents ; réduction des émissions azotées)</p> <p>(2009) Mise en demeure de la France par la CE pour application non conforme de la directive "Nitrates"</p>
Années 2010		<p>(I 2010) Déclaration de Delhi de scientifiques internationaux sur les impacts de la cascade de l'azote</p> <p>(UE 2011) Première expertise européenne sur les impacts de l'azote (European Nitrogen Assessment)</p> <p>(USA 2011) Première expertise nationale sur l'impact de l'azote</p> <p>(2011-2014) Projet européen Cantotogether (<i>Crops and animals together</i>) sur l'innovation dans les systèmes de polyculture élevage durables</p> <p>(F 2012) Expertise scientifique collective sur les flux d'azote en élevage commanditée par les ministères de l'Agriculture et de l'Ecologie</p>	<p>(2010) Plan Algues vertes (8 baies en Bretagne)</p> <p>(2011) Demande d'Information de la CE sur le Plan Algues vertes français</p> <p>(2011) Concertation sur un nouveau décret d'application de la directive "Nitrates"</p> <p>(2011) Rapport du Commissariat général au développement durable (CGDD) sur le coût des principales pollutions agricoles de l'eau</p> <p>(2011) La CE assigne la France pour manquement aux règles sur la qualité de l'air ambiant</p>

Principes et méthode d'expertise

Les principes

La réalisation d'une expertise scientifique consiste en un état des lieux critique des connaissances scientifiques disponibles et publiées. L'objectif est de dégager les acquis sur lesquels peut s'appuyer la décision publique, et aussi de pointer les controverses, incertitudes et lacunes du savoir scientifique. L'expertise ne comporte ni avis ni recommandations mais les experts s'attachent à éclairer les différentes options d'action. Le périmètre est strictement délimité pour assurer la faisabilité de l'exercice. La conduite du travail s'appuie sur une Charte de l'expertise scientifique dont les principes généraux sont la compétence, l'impartialité, la pluralité et la transparence. Ces principes reposent notamment sur la norme AFNOR NF X 50-110. (www.inra.fr/institut/expertise/eclairer_la_decision_publicue/charte_de_l_expertise_scientifique_collective).

La compétence des experts. L'expertise est conduite par un collectif d'experts dans les disciplines requises par les besoins de l'expertise. Dans le cas présent, la problématique de l'expertise entre complètement dans le champ de compétence de l'Inra qui dispose de beaucoup d'équipes travaillant sur le sujet. Les experts mobilisés sont reconnus dans leur communauté disciplinaire (qualification par analyse exploratoire de la bibliographie).

La pluralité des approches et domaines d'expertise. La pluralité des experts garantit que la diversité des arguments scientifiques sera bien prise en compte. Un tiers des experts vient d'autres institutions de recherche, dont trois étrangers (Pays-Bas et Canada). Par ailleurs, les pollutions azotées concernant essentiellement l'ouest de la France, une importante littérature porte sur les données régionales. Pour autant, près de la moitié des experts travaillent dans d'autres régions. Enfin, les sciences humaines et sociales représentent un quart de l'effectif d'experts, la zootechnie et l'approche systémique des systèmes d'élevage représentent 40%, les compétences sur les cycles biogéochimiques, l'environnement et l'agronomie au sens large représentent un tiers.

Le risque de partialité et de conflits d'intérêt. L'Inra s'engage à garantir l'impartialité de son expertise vis-à-vis de tous les intérêts publics et privés. D'une part, les missions respectives dévolues à la maîtrise d'ouvrage (commanditaires) et à la maîtrise d'œuvre (Inra) sont explicitées par une convention. D'autre part, les experts remplissent une déclaration d'intérêts. Aucun cas n'a été jugé source de conflit pour l'expertise. Mais surtout, l'expertise s'attache à reposer sur la littérature scientifique internationale et non sur des dires d'experts.

La transparence de la démarche. La Délégation à l'expertise scientifique, à la prospective et aux études (DEPE) s'est dotée de procédures qui sont disponibles à la demande. Durant l'expertise, jusqu'à la remise du rapport final, les experts travaillent en comité autonome. Les pilotes de l'expertise rendent cependant compte de l'avancée et des difficultés du travail aux commanditaires, lesquels se sont adjoints un comité de suivi (Apcv, Coop de France, Acta, Citepa, Cemagref et autres directions des ministères). Les résultats sont restitués lors d'un colloque public et font l'objet d'un rapport et d'une synthèse (en français et en anglais) diffusés sur le site de l'Inra.

La conduite du projet

Le déroulé du projet. L'exercice a duré un an et demi. Après une première phase de définition du périmètre de l'expertise discuté avec les commanditaires, l'expertise démarre par la constitution du comité d'experts et l'exploration bibliographique menant à des corpus bibliographiques par grandes thématiques, dont s'emparent les experts. Puis chaque expert étudie son pool de publications en lien avec les documentalistes. Parallèlement, la réflexion interdisciplinaire s'installe lors de regroupements consacrés aux échanges entre approches scientifiques : présentations mutuelles, discussion des éléments transversaux. La grille de questionnements qui a accompagné l'avancée de l'expertise a ainsi interrogé les principaux acquis scientifiques, les argumentaires, les informations quantitatives et variations territoriales, les aspects incertains, les lacunes du savoir, les synergies ou antagonismes entre approches ou disciplines scientifiques, les controverses et enfin les idées inattendues.

Les différents acteurs. Le collège de Direction de l'Inra a sollicité deux chercheurs, reconnus pour leurs compétences scientifiques et d'animation, pour piloter l'exercice : Pierre Cellier, directeur de recherche en agriculture et pollutions atmosphériques, Inra Versailles-Grignon, et Jean-Louis Peyraud, directeur de recherche en physiologie animale, Inra Rennes.

Trois documentalistes, Agnès Girard (Inra, unité de recherche Scribe, Rennes), Françoise Guillaume (IST Inra Rennes) et Sophie Le Perchec (IST Inra Rennes et DEPE) ont établi les équations de recherche bibliographique, qualifié les experts, fourni le corpus bibliographique et établi les listes de références bibliographiques des différents chapitres. Le corpus final comprend 1370 références (voir annexe en fin de rapport). Une équipe-projet (Catherine Donnars, Fabienne Girard, Mériem Kattir, Olivier Réchauchère) relevant de la DEPE de l'Inra anime l'expertise, facilite le travail des experts et des documentalistes, rédige la synthèse pour décideurs et organise le colloque de restitution.

Le comité d'experts est responsable des résultats. Il rédige le rapport. Le Tableau 0.2 liste les experts.

Tableau 0.2 - Le collectif d'experts « élevage et azote »

Pilotes scientifiques			
Pierre	CELLIER	Inra, Versailles –Grignon	Agriculture et pollution de l'air
Jean-Louis	PEYRAUD	Inra, Rennes	systèmes d'élevage, bovins laitiers
Experts			
Franz	AARTS	PRI, WUR, Pays-Bas	Systèmes d'élevage, modélisation
Fabrice	BELINE	Irstea	Gestion des effluents
Christian	BOCKSTALLER	Inra Nancy	Agronomie, évaluation, développement durable
Luc	DELABY	Inra, Rennes	Systèmes d'élevage, ruminants
Jean-Yves	DOURMAD	Inra, Rennes	Système d'élevage, porcs
Pierre	DUPRAZ	Inra, Rennes	Economie de l'environnement
Patrick	DURAND	Inra, Rennes	Milieus, transferts de polluants, paysage
Philippe	FAVERDIN	Inra, Rennes	Systèmes d'élevage, exploitation, modélisation
Jean-Louis	FIORELLI	Inra Nancy	Systèmes, élevage bio
Carl	GAIGNÉ	Inra, Rennes	Economie industrielle, localisation
Peter	KUIKMAN	Alterra, WUR Pays-Bas	Environnement, Emission de GES, climat,
Alexandra	LANGLAIS	CNRS, université Rennes I	Droit, pollutions diffuses, nitrates
Philippe	LE GOFFE	Agrocampus ouest, Rennes	Economie, pollutions diffuses, nitrates
Philippe	LESCOAT	Inra, Tours	Système d'élevage, volailles
Christian	NICOURT	Inra, Ivry	Sociologie, métier, agriculture
Philippe	ROCHETTE	Centre Agriculture et Agroalimentaire, Canada	Environnement, Emissions de gaz, N ₂ O, NH ₃
Françoise	VERTÈS	Inra, Rennes	Agronomie, évaluation environnementale
Patrick	VEYSSET	Inra, Clermont Ferrand	Economie, systèmes d'élevage bio
Experts complémentaires ayant intervenu ponctuellement			
Thierry	MORVAN	Inra, Rennes	Agronomie
Virginie	PARNAUDEAU	Inra, Rennes	Agronomie
Magalie	BOURBLANC	Cirad	Science politique

Plusieurs relecteurs scientifiques ont été sollicités : Marc Benoît (Inra, agronome), Gilles Billen (CNRS, hydrologue), Isabelle Doussan (Inra, juriste.), Amédée Mollard (Inra, économiste), Philippe Leterme (Agrocampus ouest, agronomie), Didier Stilmant (CRA Wallonie, Belgique, systèmes d'élevage).

Analyse du corpus bibliographique

Qualification des experts

L'analyse de la bibliographie est utilisée dans une première étape pour repérer les experts. Celle-ci a utilisé une base de données internationale (Web of ScienceSM), complétée par l'interrogation de bases de données couvrant les domaines des Sciences humaines et sociales (EconlitTM et FrancisTM). L'analyse des auteurs de ce corpus bibliographique (classés par occurrence et par pays) a permis d'identifier les « leaders » parmi lesquels les pilotes de l'expertise ont sélectionné une soixantaine de scientifiques potentiellement mobilisables. Les documentalistes ont établi, pour chacun de ces scientifiques, à partir de recherches dans les bases de données (WOSSM, CABI ©, Prodinra, EconlitTM et FrancisTM) une fiche de synthèse combinant des indicateurs quantitatifs (nombre de publications, total, par année...) et qualitatifs (co-auteurs, disciplines, mots-clés...). Lorsqu'un expert sollicité ne donnait pas suite (3 cas), nous lui demandions de suggérer d'autres noms qui étaient alors eux-mêmes qualifiés par exploration bibliographique.

En cours d'exercice, le besoin d'apports sur des questions précises s'est fait sentir et trois experts complémentaires ont rejoint le collectif. Leur contribution a été ponctuelle.

Tableau 0.3. Classement des experts lors du processus de qualification (sont regroupés sous un même rang tous les auteurs ayant la même occurrence pour un corpus donné).

Rang dans le classement des auteurs affiliés à la France (WOS SM)	
BELINE, F	2
DOURMAD, JY	3
MORVAN, T	3
DELABY, L	4
PEYRAUD, JL	4
DURAND, P	6
CELLIER, P	7
VERTES, F	8
BOCKSTALLER, C	8
FIGRELLI, JL	9
PARNAUDEAU, V	9
Rang dans le classement des auteurs affiliés au Canada (WOS SM)	
ROCHETTE, P	1
Rang dans le classement des auteurs affiliés aux Pays Bas (WOS SM)	
AARTS, HFM	5
KUIKMAN, PJ	7

Principales sources d'informations utilisées dans ce processus d'identification des experts

Web of ScienceSM : produite par Thomson Scientific, base de données couvrant l'ensemble des disciplines scientifiques en sciences et SHS depuis 1975.

CABI © : produite par CABI Publishing (Commonwealth Agricultural Bureaux), base de données couvrant les thématiques relatives à l'agriculture, depuis 1973.

EconlitTM : produite par American Economic Association, base de données couvrant les thématiques relatives à l'économie, depuis 1969.

FrancisTM : produite par l'INIST, base de données couvrant les thématiques relatives aux sciences humaines et sociales depuis 1972.

Prodinra : base institutionnelle des publications de l'Inra.

Cairn : portail de revues francophones en sciences humaines et sociales.

Constitution du corpus documentaire

Une collaboration documentalistes-chercheurs. Sur la base de l'étape de qualification des experts, les principaux descripteurs et classifications thématiques ont été utilisés pour élaborer la stratégie de recherche sur la base de données des CAB Abstracts® (CABI) et du Web of ScienceSM (WOS). Face à la quantité d'informations, les documentalistes ont utilisé le potentiel de recherche proposé par le Web of KnowledgeSM (WOK) : affinage par les mots-clés, les disciplines et navigation entre bases, utilisation des citations et publications similaires...

La constitution de ce corpus ne vise pas à l'exhaustivité mais à la pertinence des références par rapport au sujet. N'ont été retenues que des références écrites en français ou en anglais, correspondant ou transposable au cadre géographique européen de l'étude (exclusion par exemple des travaux asiatiques sur les rizières) en privilégiant la période récente (environ 10-15 ans). Un complément d'informations a été recueilli par l'interrogation de plusieurs bases de données (EconlitTM et FrancisTM ...), portails de revues (Cairn...) et catalogues de bibliothèques (Worldcat...) pour la partie Sciences humaines et sociales (SHS).

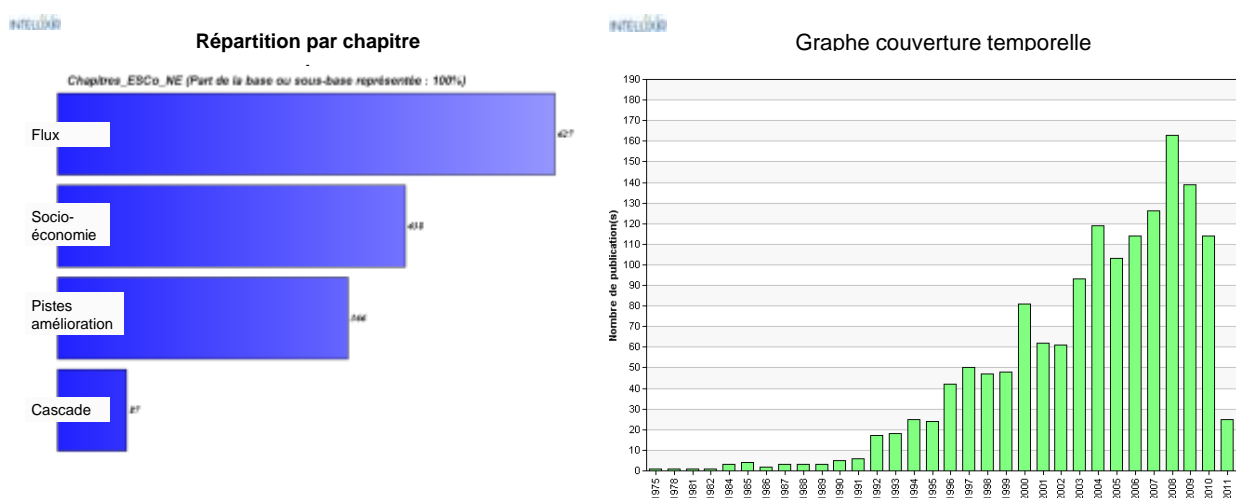
Quand les connaissances scientifiques ne sont pas stabilisées ou sont lacunaires, il est fait appel à de la littérature dite « grise », c'est-à-dire relevant de documents non validés par un comité de lecture scientifique : rapports, publications techniques, statistiques... La validation/certification de ces sources est faite dans le cadre de l'étude sous la responsabilité du groupe des experts. Ces sources peuvent également apporter d'autres types d'informations et des éclairages récents sur certaines questions (études non encore publiées dans la littérature scientifique).

Pour favoriser les échanges d'informations, l'expertise disposait aussi d'un espace de travail partagé Silverpeas© où ont été déposés la base bibliographique générale et les versions successives du rapport et de la synthèse. Une veille bibliographique a été mise en place sur les bases de données (WOSSM et CABI®), tout au long de l'expertise (thématiques Biotechniques) et diffusée via Silverpeas©.

Taille du corpus, enrichissement et sélection. L'exploration initiale avait apporté quelques 20 000 références. Une première sélection drastique a ramené le corpus à une dimension abordable par les experts pour un premier cadrage : 1 156 références compilées dans une base EndNote© et réparties par chapitre et par expert. Sur cette base, des échanges et demandes de compléments ont abouti à une base intermédiaire de 2 258 références. C'est cette base que les experts ont exploité. Ils ont encore eu recours à des ajouts et opéré des sélections. Le corpus final est de 1360 références (dont 1 332 analysées).

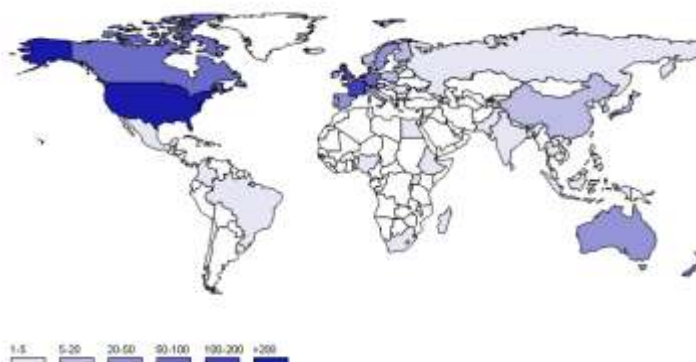
Ce travail itératif a permis une analyse intermédiaire du corpus (réunion plénière des 4 et 5 janvier 2011) au cours de laquelle la couverture temporelle et les concepts ont été discutés et élargis.

Figure 0.1 : Représentations du corpus bibliographique intermédiaire discutées par les experts (base intermédiaire de 2 258 références)



Carte pays associés aux publications

Les pays associés aux articles sont détectés aux sein des champs « affiliations » des notices d'articles.
Attention : les références provenant de différentes bases, les affiliations sont très hétérogènes (une affiliation principale ou toutes les affiliations). Le nombre de publications par pays est donc sous estimé.



Les auteurs experts

Le Facteur d'expertise est calculé à partir du nombre de publication et du nombre de co-auteurs différents.

Auteurs	Facteur d'expertise
Oenema O	3816
Velthof GJ	1950
Dourmad Jy	1541
Keulen Hv	989
Beline F	867
Sommer Sg	855
Erisman Jw	819
Aarts Hfm	741
Scholefield D	684
Billen G	672
Webb J	663
Chadwick Dr	646
Olesen Je	627
Morvan T	559
Oenema J	532

Par ailleurs, le corpus ayant été constitué initialement par les documentalistes sans *a priori* scientifique, le mouvement important de références nouvelles ou disparues oblige à s'interroger sur d'éventuels biais dans l'évolution du corpus, notamment en termes de champs couverts, d'écoles de pensée représentées et d'auteurs cités. Nous nous sommes interrogés :

- 1) sur les chapitres ayant connu le plus d'ajouts : il s'agit essentiellement des chapitres 5, 6, 7 (quantification des flux) et 8 (indicateurs d'évaluation).
- 2) si les ajouts (corpus final / corpus intermédiaire) modifiaient la typologie des sources. Il se trouve que la majorité des ajouts concerne des articles scientifiques.

Figure 0.2 : Ajouts en cours d'expertise

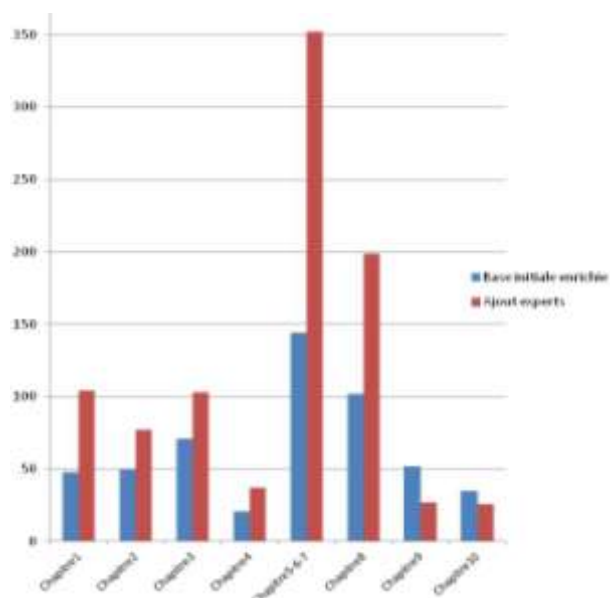
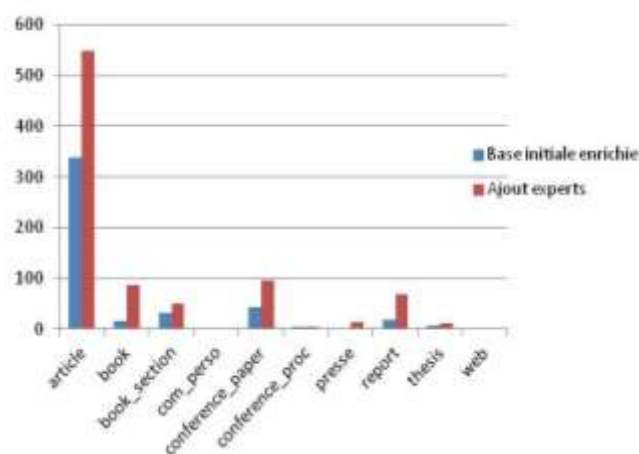


Figure 0.3 : Types de document ajoutés



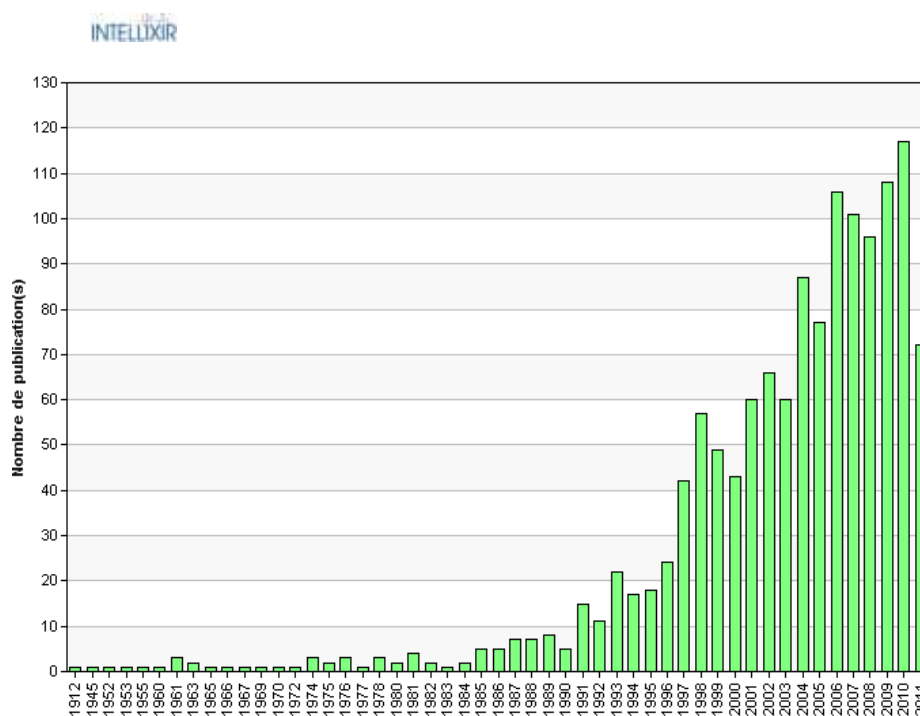
3) Enfin, nous avons vérifié la pertinence des références citées par rapport aux différents courants de pensées. Pour ce faire, nous avons comparé les corpus intermédiaire et final, en termes d'auteurs et de sources. Puis, nous avons sélectionné les auteurs cités au moins 5 fois et vérifié leur absence ou présence dans les deux corpus. Parmi les 2 912 auteurs du corpus final, on compte 8 nouveaux auteurs (parmi les auteurs cités au moins 5 fois) dont les travaux portent sur des thématiques agronomiques. Les 27 auteurs disparus (parmi les auteurs cités au moins 5 fois) sont essentiellement des économistes dont les travaux sont trop techniques ou technico-économiques (gestion, comptabilité), pas assez pertinents au regard de l'analyse théorique ou trop illustratifs. Le reste concerne des publications traitant plus spécifiquement de pollutions (qualité de l'eau, odeurs, pesticides...).

A partir de la comparaison entre le corpus initial-enrichi (2 258 références) et le corpus final (1 332), pour les occurrences ≥ 3 , nous avons identifié les revues disparues/apparues. Les 8 revues apparues (comme support de publications citées au moins 3 fois) ont pour thématique : agronomie, sciences politiques, indicateurs et pour la moitié ne sont pas référencées dans les bases de données interrogées. Pour les 26 revues disparues (comme support de publications citées au moins 3 fois), d'après le « scope » des éditeurs, ces revues traitent essentiellement de questions de pollution de l'eau, préservation des ressources, climatologie, ingénierie, géographie... ou sont des revues d'associations nationales. Il n'apparaît pas de distorsion entre les courants de pensées. Les références ajoutées concernent pour l'essentiel des auteurs déjà présents dans le corpus initial mais pour des références différentes de celles initialement proposées. La même analyse prévaut pour les supports de publications.

Analyse du corpus final

Couverture temporelle. Quatre cinquièmes des références couvrent la période 1998-2011. Pour les références antérieures à cette période plus d'un quart sont des ouvrages.

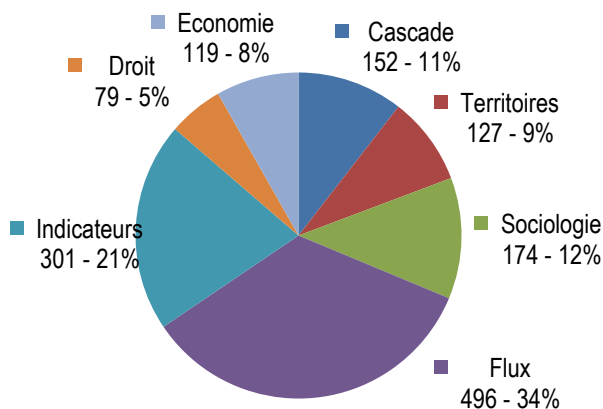
Figure 0.4 : Couverture temporelle du corpus bibliographique



Répartition des références par chapitre. La répartition des références par grandes thématiques place les aspects biotechniques au premier rang : ils représentent 75 % des références, dont la moitié traite de la description et de la quantification des flux d'azote dans les systèmes de production animale. Très peu d'articles ont considéré simultanément la problématique des flux d'azote et celle des autres flux ayant des impacts environnementaux. La littérature relative aux indicateurs et méthodes est également très importante : plus d'un

cinquième du corpus. Un quart des références relève des sciences sociales (droit, économie, sociologie) dont la moitié pour la sociologie ; ces références concernent essentiellement le volet « nitrate » en France. 92 % des références sont citées dans un seul chapitre, 7 % dans deux chapitres, 1 % dans trois chapitres. Seule la référence suivante « Jarvis, S., N. Hutchings, et al. (2011). Nitrogen flows in farming systems across Europe. » issue de *The European Nitrogen Assessment. Sources, Effects and Policy Perspectives.*, est citée dans quatre chapitres.

Figure 0.5 : Répartition des références par chapitre



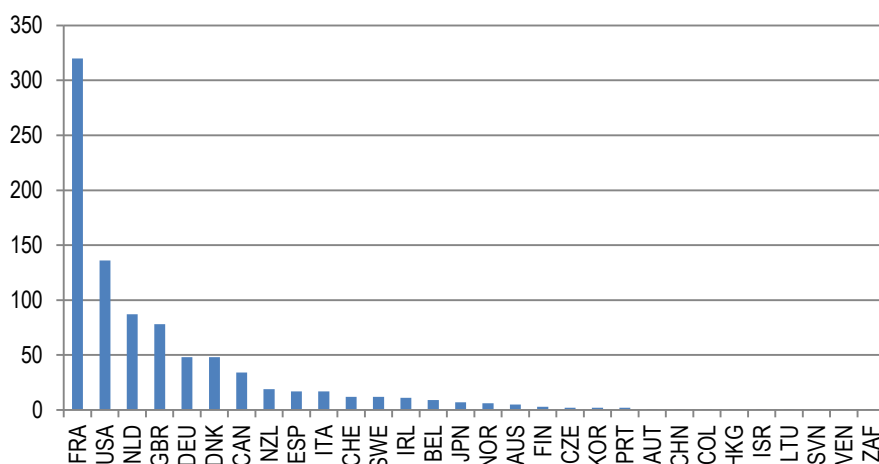
NB : Dans cette représentation graphique, ont été regroupés, sous le vocable « Economie », les chapitres concernant l'économie (chapitre 10) et les stratégies de concentrations (chapitre 4).

Les auteurs du corpus.

Dans le corpus final, il y a 2 912 auteurs. Les bases de données étant très hétérogènes en termes d'affiliation des auteurs, nous avons fait le choix de ne considérer que l'affiliation du premier auteur pour les 884 articles, afin d'établir son origine géographique. Pour 40% des références, le premier auteur est européen, pour 36% il est Français et pour 24% il est originaire d'un autre continent (Amérique, Asie ou Océanie). Les pays européens les plus représentés sont les Pays-Bas, la Grande-Bretagne, l'Allemagne et le Danemark.

Les experts apparaissent bien placés dans le corpus bibliographique final : une dizaine d'entre eux figurent parmi les 50 premiers auteurs les plus cités.

Figures 0.6 : Origine des 50 premiers auteurs



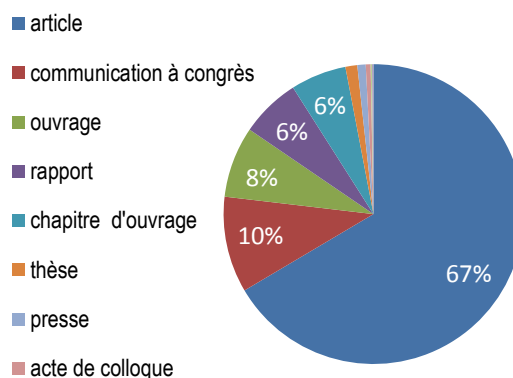
Sources du corpus

Répartition des références par type de document.

Le type de document « Article » regroupe tous les travaux parus dans une revue, scientifique ou technique. Dans la catégorie « Communication à congrès » sont classées les travaux présentés lors d'un congrès national ou international, avec ou sans comité de lecture.

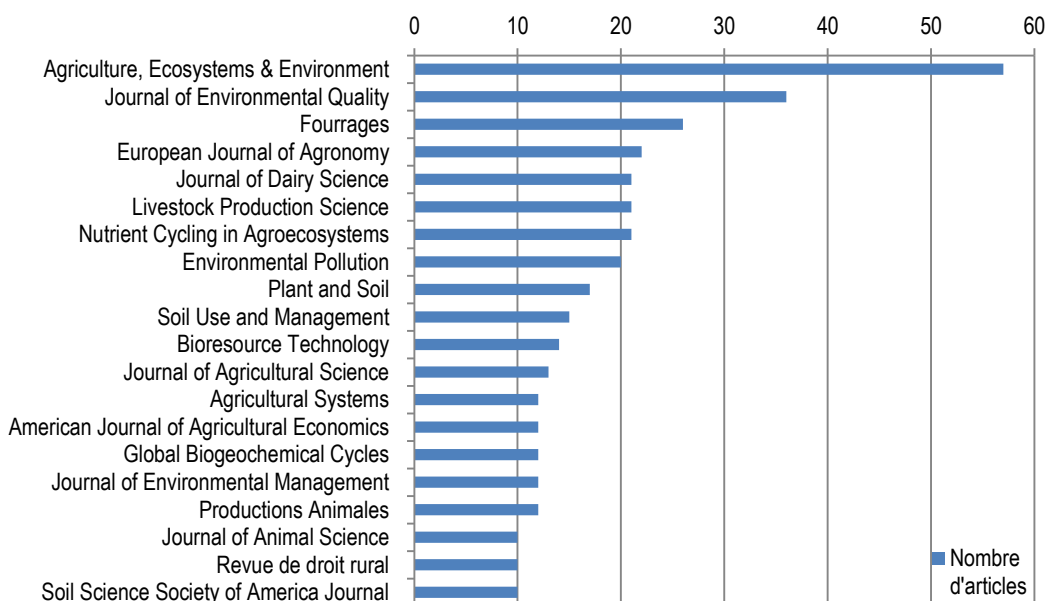
Le corpus final est constitué de 67 % d'articles. En incluant les principales conférences dans des congrès internationaux, les trois quarts des sources citées sont référencées dans les bases de données internationales. Le dernier quart est constitué d'ouvrages et de chapitres d'ouvrages scientifiques et techniques et dans une moindre mesure, de rapports issus d'organismes d'Etat, de collectivités et des instituts techniques, de thèses, d'articles de presse et de pages web.

Figure 0.8 : Types de document



Les revues de publications. Parmi les 1 332 références citées dans le rapport, il y a 67 % d'articles répartis dans 272 revues. Le top 20 des revues présente celles dans lesquelles sont citées au moins 10 articles. 42% des articles cités dans le rapport sont issues de ces 20 revues, listées ci-dessous :

Figure 0.9 : Top 20 des revues citées



Parmi ces 20 revues, 19 sont classées dans les « subject category » du WOSSM :

- AGRICULTURE, DAIRY AND ANIMAL SCIENCE
- ENVIRONMENTAL SCIENCES
- SOIL SCIENCE
- AGRICULTURE, MULTIDISCIPLINARY
- AGRONOMY

La Revue de droit rural n'est pas référencée dans le *Journal of Citations ReportSM : Journal of Citations ReportSM* qui recense les revues analysées dans les bases de données du Web of KnowledgeSM

Autres sources

102 ouvrages, 80 chapitres d'ouvrages, 17 thèses et 12 articles de presse (la majorité dans le quotidien *Le Monde*) ont également été cités.

En termes de littérature grise, on compte 87 rapports scientifiques et techniques, édités par des institutions nationales ou internationales. Les principaux commanditaires sont les suivants :

- European Union
- Ministère de l'alimentation, de l'agriculture et de la pêche
- Alterra Wageningen
- Corpen
- European Environmental Agency (EEA)
- Inra
- Institut de l'Elevage
- Ademe
- Agroscope FAL Reckenholz

Les experts ont également cité des communications présentées lors de symposiums nationaux et internationaux (141 communications lors d'un colloque et 7 actes de colloque). Ces colloques se sont tenus pour 57% en France, 33% en Europe et 10% à l'international. Les deux tiers des colloques cités abordent la problématique de l'expertise sous l'angle élevage et un tiers sous l'angle azote et sol.

Tableau 0.5 : Les colloques les plus cités

Rencontres Recherches Ruminants	26
Journées Recherche Porcine	24
Nitrogen Workshops	9
Ramiran	9
International Nitrogen Conference	4
International Conference on LCA in the AgriFood Sector	3
Journées de la Recherche Avicole	3
Journées de Recherches en Sciences Sociales Inra Sfer Cirad	3
International Congress of the International Society for Animal Hygiene	2
Annual meeting of American Agricultural Economics Association	2
Canadian Agrienvironmental Indicators, Canadian Society of Soil Science Annual Meeting	2
Entretiens du Pradel	2
ESA Congress	2
General meeting of the European Grassland Federation, British Grassland Society	2
International Conference of Agricultural Engineering, XXXVII Brazilian Congress of Agricultural Engineering, International Livestock Environment Symposium ILES VIII	2
OECD Workshop: Livestock waste treatment systems of the future: A challenge to environmental quality, food safety, and sustainability	2
Séminaire José Rey : Impact des mesures agroenvironnementales et des soutiens au développement rural	2

NB : « Les Rencontres Recherches Ruminants », « Journées Recherche Porcine » et « Journées de la Recherche Avicole », sont des colloques annuels à destination des professionnels, organisés par les instituts techniques et l'Inra. Les communications présentées font l'objet d'un processus de peer-review et d'une publication, pour partie référencée dans les bases de données internationales.

