

Évaluation et Spatialisation des Émissions Gazeuses liées à la gestion des déjections d'élevage (ESEGA) : de l'inventaire au test de technologies de réduction des émissions gazeuses

Thierry Bioteau, Armelle Gac et Fabrice Béline

L'agriculture, et notamment l'élevage, contribue pour une large part aux émissions et aux rejets de gaz polluants vers notre atmosphère. Dans un contexte d'engagement national pour la restauration de la qualité des milieux récepteurs, la maîtrise progressive des émissions de gaz à effet de serre et d'ammoniac liées à la gestion des déjections animales est donc un objectif prioritaire qui passe par l'inventaire et la localisation des flux de ces gaz à une échelle nationale et par l'évaluation des effets des différents procédés utilisés pour les réduire.

Dans cet article, les auteurs nous présentent la conception originale d'un outil d'aide à la décision combinant une base de données à un système d'information géographique et permettant de fournir des cartographies dynamiques pour faciliter l'estimation réaliste des émissions polluantes et l'évaluation de l'impact d'une stratégie de réduction des gaz associant plusieurs technologies.

Depuis l'ère préindustrielle, les concentrations de dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère ont augmenté de 31 %, celles du méthane (CH_4) de 150 % et celles du protoxyde d'azote (N_2O) de 16 %. Les pouvoirs de réchauffement global (PRG) de ces deux gaz à effet de serre (GES) sont respectivement de 21 et 310 fois supérieurs à celui du CO_2 , ce qui les place, compte tenu des quantités émises, au premier rang de ceux à prendre en

compte pour définir des stratégies de réduction (encadré 1). L'ammoniac (NH_3) est également une source de pollution atmosphérique conséquente, avec des effets au niveau des élevages sur la santé des animaux et des hommes (irritant, toxique), mais aussi à une échelle plus large sur le milieu naturel. En effet, Portejoie *et al.* (2002) indiquent que les retombées atmosphériques de NH_3 ont diverses conséquences : « (...) suivant les caractéristiques physico-chimiques des sols et

Encadré 1

Le pouvoir de réchauffement global

Le pouvoir de réchauffement global d'un gaz se définit comme le « forçage radiatif » (c'est-à-dire la puissance radiative que le gaz à effet de serre renvoie vers le sol), cumulé sur une durée de 100 ans. Cette valeur se mesure relativement au CO_2 .

GES	PRG par rapport au CO_2
Dioxyde de carbone (CO_2)	1
Méthane (CH_4)	21
Protoxyde d'azote (N_2O)	310
Perfluorocarbures (PFC)	6 500 à 9 200 (selon les molécules considérées)
Hydrofluorocarbures (HFC)	140 à 11 700
Hexafluorure de soufre (SF_6)	23 900

Source : Citepa.

Les contacts

Cemagref, UR Gestion environnementale et traitement biologique des déchets, 17 avenue de Cucillé, CS 64427, 35044 Rennes Cedex

1. Centre technique interprofessionnel d'études de la pollution atmosphérique.
2. Les principales sources d'émissions gazeuses imputables à l'agriculture proviennent : (1) des fertilisants minéraux qui contribuent essentiellement aux émissions de N_2O ; (2) de la fermentation entérique des ruminants conduisant à des émissions de CH_4 principalement ; (3) des déjections apportées au sol lors des périodes de pâturage et parcours et de la gestion des effluents qui sont issus des bâtiments d'élevage et des fosses de stockage puis épandus.
3. Groupement international d'experts sur le changement climatique.
4. Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.
5. Épurateur biologique des eaux usées, traitement des effluents d'élevage et émissions gazeuses.
6. Institut de recherche appliquée et de développement au service de l'élevage et des filières herbivores.
7. Institut du porc.
8. Institut technique de l'aviculture.

des eaux, cela débouchera, soit sur un enrichissement en azote, soit sur une acidification avec disparition de la faune et de la flore dans les cas extrêmes (...) ».

L'agriculture, et notamment l'élevage, contribue pour une large part aux émissions de ces différents gaz. En effet, d'après l'inventaire national annuel 2006 des émissions, réalisé par le Citepa¹, les activités agricoles sont responsables de 96 % des émissions de NH_3 , de 77 % des émissions de N_2O et de 72 % des émissions de CH_4 ². Plus spécifiquement, la gestion des déjections d'élevage (extérieur, bâtiment, stockage, épandage) représente 76 %, 26 % et 23 % des émissions respectives de NH_3 , N_2O et CH_4 . Le développement des élevages hors-sol, qui impliquent un stockage des déjections sous les animaux et dans des fosses extérieures sous forme liquide (lisiers), conduit à des conditions anaérobies favorisant les émissions de méthane par des processus naturels de fermentation. Le N_2O est, quant à lui, émis au cours des processus de nitrification et de dénitrification, principalement lors des périodes de pâturage et de parcours des animaux, ou après l'épandage des effluents. La volatilisation de l'ammoniac est directement liée à la composition en azote ammoniacal des déjections et se produit lors de leur contact avec l'air, principalement dans les bâtiments et au cours de l'épandage.

La France s'est engagée au niveau européen et international à réduire ses émissions (Convention-cadre des Nations-Unies sur le changement climatique [CCNUCC] pour les gaz à effet de serre, Convention de Genève sur la pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance et Directive européenne sur les plafonds d'émissions nationaux [NEC] pour le NH_3). Dans ce cadre, des méthodologies communes ont été développées pour réaliser des inventaires nationaux comparables entre pays membres de ces conventions.

En France, pour réaliser les inventaires selon les formats internationaux, le Citepa utilise les méthodologies du GIEC³ pour les gaz à effet de serre et celles de l'Agence européenne de l'environnement pour le NH_3 . Ces méthodologies internationales présentent des résultats agrégés. Malgré une possibilité d'adapter les facteurs d'émission proposés, elles ne permettent pas de rendre compte de l'ensemble des spécificités nationales, ce qui peut conduire à des incertitudes importantes sur les estimations (Pain *et al.*, 1998). Par conséquent, de nouvelles méthodes, appli-

quées principalement aux émissions azotées, sont actuellement en cours de développement et devraient probablement être utilisées pour les futurs inventaires nationaux. Ces méthodes sont basées d'une part, sur une évaluation plus précise des émissions tout au long de la filière de gestion des déjections (extérieur, bâtiment, stockage, épandage) et d'autre part, sur l'application d'un flux de matière avec une conservation de la masse tout au long de cette filière (Webb et Misselbrook, 2004 ; Dammgen *et al.*, 2007).

Par ailleurs, des études ont été menées dans différents pays pour élaborer des inventaires nationaux plus précis, à partir de méthodologies spécifiques, de données d'élevage, et/ou de facteurs d'émissions plus détaillés (Pain *et al.*, 1998 ; Chadwick *et al.*, 1999 ; Hyde *et al.*, 2003 ; Freibauer, 2003).

Dans ce cadre, des travaux financés par l'Ademe⁴ et menés dans l'équipe EPURE⁵ du Cemagref de Rennes en collaboration avec les principaux acteurs techniques concernés (Institut de l'Élevage⁶, IFIP⁷, ITAVI⁸) ont été menés afin d'évaluer les flux de gaz à effet de serre (CH_4 , N_2O) et d'ammoniac (NH_3) liés à la gestion des déjections animales (Gac, 2006). L'objectif premier de l'étude était de proposer une alternative aux méthodologies internationales en réalisant un inventaire des émissions gazeuses qui soit plus représentatif des spécificités de l'élevage français (durées de pâturage élevées pour l'élevage bovin, production de foie gras, de veaux de boucherie, etc.). Pour cela, un référentiel des spécificités de l'élevage français a été construit et une synthèse bibliographique spécifique a été réalisée pour déterminer des facteurs d'émissions à chaque étape de la filière de gestion des déjections : extérieur, bâtiment, stockage, épandage. Ensuite, ces éléments ont été utilisés au sein d'un outil de calcul afin de produire un inventaire national selon une méthode par bilan, avec conservation de la matière aussi bien pour les éléments azotés que carbonés. Le deuxième objectif était d'évaluer l'effet de technologies de réduction des émissions polluantes, en tenant compte des effets de reports possibles. En effet, l'ensemble de la filière de gestion des déjections animales est considérée, ainsi que les transferts de matière d'un poste émetteur à un autre. Ainsi, l'effet d'une action ou d'un panel de meilleures techniques est quantifiable.

Le présent article expose tout d'abord un rappel de la méthodologie déployée dans le cadre de

cette étude, et propose une extension de spatialisat-ion en intégrant un système d'information géographique (SIG) à la base de données relation-nelle de calcul afin de réaliser des cartographies dynamiques des résultats, donnant lieu à l'outil ESEGA⁹.

Matériel et méthodes

Description de la méthodologie

La réalisation des objectifs énoncés s'appuie sur la méthodologie de calcul décrite sur la figure 1.

Les principaux systèmes d'élevage ont été définis pour chaque classe d'animal et ont été caracté-risés avec des informations spécifiques (proportion d'animaux concernés, excrétiens, etc.). En effet, ils conduisent à des systèmes de gestion des déjections différents, qui ont une influence sur les émissions.

Les émissions azotées ont été estimées en prenant en compte la quantité totale d'azote excrété (Nex) alors que pour les émissions de méthane, le méthane potentiel maximum¹⁰ des excrétiens (B₀ex) a été considéré. Ensuite, à partir de ces données, une méthodologie de calcul basée sur le flux de matière avec conservation de la masse a été appliquée pour représenter les flux de Nex et B₀ex tout au long de la filière de gestion des déjections, en prenant en compte les émissions gazeuses à chaque étape.

Quatre étapes de gestion des déjections animales, sources d'émissions gazeuses, ont été définies :

- extérieur (pâtures, parcours ...),
- bâtiment (incluant bâtiments d'élevage et salles de traite),
- stockage (ouvrages extérieurs de stockage et de traitement),
- épandage.

Premièrement, les quantités de N et B₀ excrétées dans les bâtiments et à l'extérieur sont estimées en fonction du temps que les animaux y passent. Ensuite, les émissions gazeuses sont calculées, pour chaque étape de la filière, en utilisant les quantités entrantes dans cette étape et les facteurs d'émissions spécifiques exprimés en pourcentage de la quantité entrante :

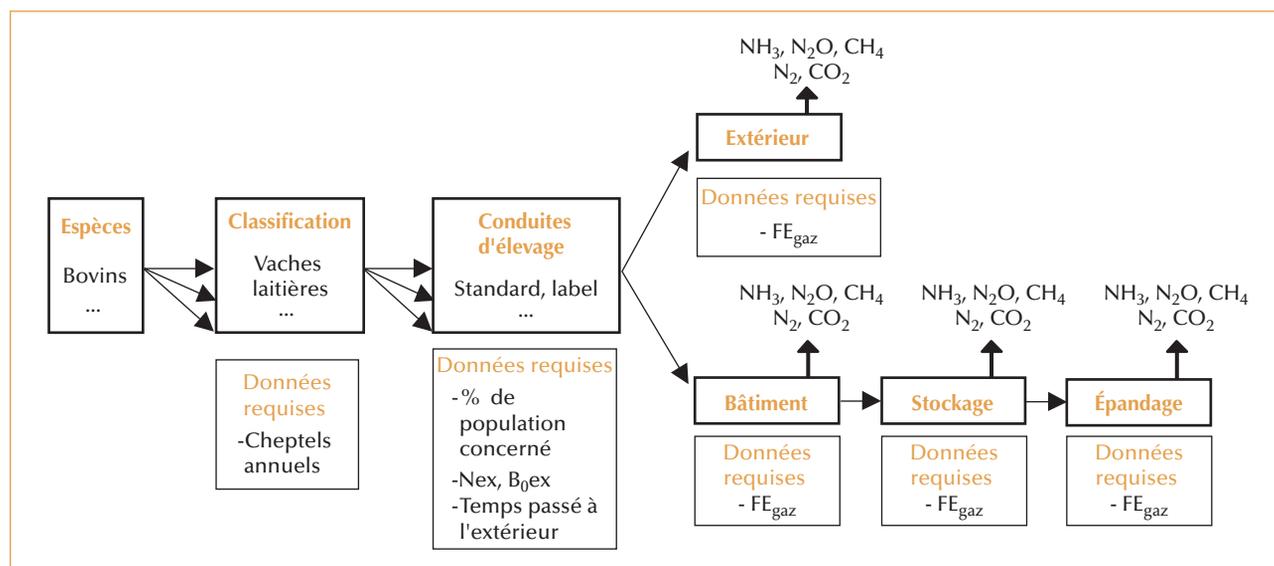
$$E_{g, s, c, a} = Q_{s, c, a} \times FE_{g, c, s}$$

où $E_{g, s, c, a}$ exprimé en kg.an⁻¹ correspond à l'émission du gaz g (NH₃, CH₄ ou N₂O), pour une source d'émission s donnée (extérieur, bâtiment, stockage ou épandage), pour la conduite d'élevage c et pour l'année a ; $Q_{s, c, a}$ exprimé en kg correspond à la quantité d'azote ou de carbone-méthane potentiel entrant, pour une source d'émission s , pour la conduite d'élevage c et pour l'année a ; $FE_{g, c, s}$ exprimé en pourcentage correspond au facteur d'émission du gaz g , de la conduite d'élevage c et de la source d'émission s .

9. Évaluation et Spatialisation des Émissions GAZEuses liées à la gestion des effluents d'élevage.

10. Méthane potentiel maximum ou potentiel biométhanogène B₀ : ce paramètre reflète la production maximale de C-CH₄ issu de la matière organique.

▼ Figure 1 – Méthodologie générale utilisée pour la réalisation de l'inventaire des émissions, incluant une approche par bilan matière (Gac, 2006).



11. Service central des enquêtes et études statistiques du ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

▼ **Tableau 1 – Facteurs d'émissions utilisés par gaz et par poste d'émission (Gac, 2006).**

		CH ₄ (% B0)			N ₂ O (% N)			NH ₃ (% N)		
		Lisier	Fumier	Fientes	Lisier	Fumier	Fientes	Lisier	Fumier	Fientes
Extérieur	Bovins	0,6			2,6			6,5		
	Porcins	0,04			0,9			13,8		
	Volailles	0,04			0,9			10,7		
Bâtiment	Vaches laitières	11,7	9,4	-	0,17	0,17	-	17	10,8	-
	Autres bovins	5,7	9,4	-	0,17	0,17	-	17	10,8	-
	Porcs post-sevrage	31,8	17,4	-	0,09	9,47	-	8,6	14	-
	Porcs engraissement	31,8	17,4	-	0,09	9,47	-	14,4	23,9	-
	Truies et verrats	31,8	17,4	-	0,09	9,47	-	17,4	28,3	-
	Poulets de chair	31,8	4,4	4,4	0,09	1,2	1,2	29,2	30,4	12,3
	Autres volailles	31,8	0	0	0,09	0	0	29,2	30,4	12,3
Stockage	Standard	16,7	10,4	10,4	0	0,3	0,15	3,5	9,5	8,5
	Traitement aérobie	5,0	-	-	0	-	-	1,8	-	-
Épandage	Standard	0,04	0,04	0,04	0,9	0,9	0,9	19,6	10,7	10,7

Enfin, les quantités sortantes de chaque étape servent d'entrée à l'étape suivante. Afin d'assurer la cohérence du bilan matière, les émissions gazeuses non polluantes, telles que l'azote moléculaire (N₂) et le CO₂ issu du pool de CH₄ potentiel, ont été considérées.

Données techniques et facteurs d'émissions

Seules les espèces bovines et porcines et les principales catégories de volailles ont été considérées. En effet, la totalité de ces animaux génère 88 % de l'azote excrété au niveau national et la bibliographie rapporte des données principalement sur ces filières d'élevage.

Les données techniques d'élevage mobilisées pour la mise en œuvre de cette méthodologie de calcul sont :

- les effectifs des animaux fournis par la statistique agricole (SCEES¹¹ 2001 et SCEES 2002 à 2004) ;
- une typologie des conduites d'élevage et les données zootechniques correspondantes, élaborées en concertation avec les instituts techniques d'élevage (Institut de l'Élevage, IFIP et ITAVI).

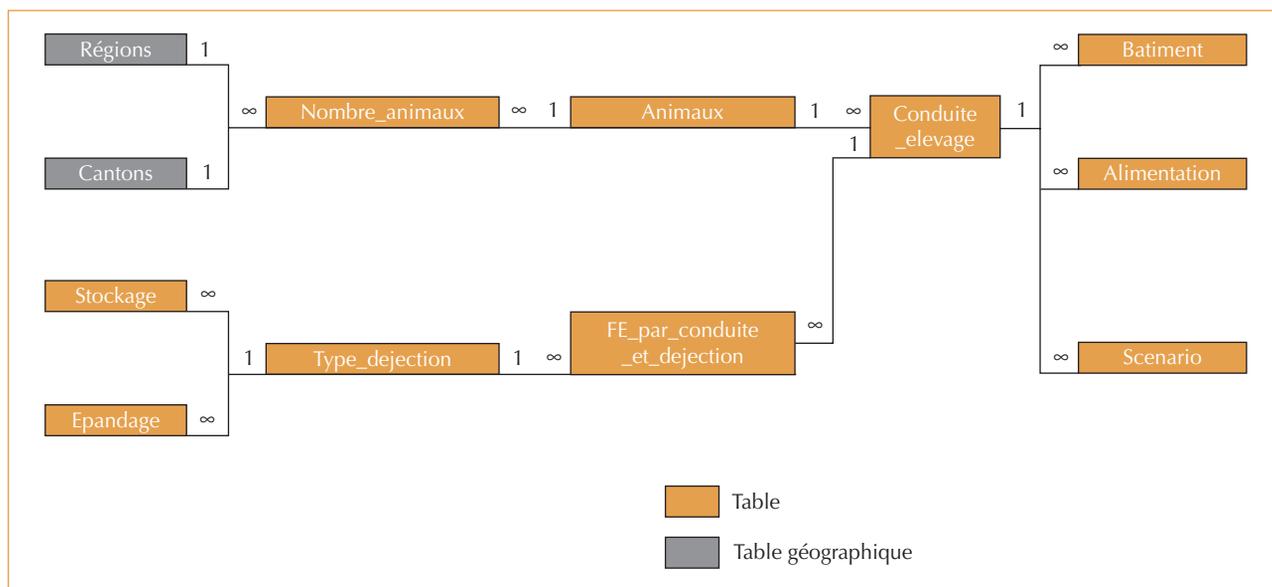
Les facteurs d'émissions (FE) utilisés (tableau 1) ont été déterminés grâce à une synthèse bibliographique (2 200 références sélectionnées, 167 références exploitées). Les données de la littérature

française ne suffisant pas toujours à couvrir toutes les situations, des références de publications internationales ont également été utilisées, en veillant à ce que les systèmes de productions animales et de gestion des déjections soient comparables aux systèmes français. Les données issues des publications ont ensuite été harmonisées dans une même unité, à savoir en pourcentage de N et B₀ entrant dans chaque poste. Puis une analyse de la variance a été effectuée afin de mettre en évidence les éventuels facteurs d'influence sur les FE et de constituer ainsi des modules gaz – animal – poste d'émission – facteurs d'influence (type de déjection, stade physiologique, etc.). Une fois les modules identifiés, la moyenne des données disponibles a été calculée. Cette analyse n'a pas permis de déterminer de FE pour tous les cas. Des recherches documentaires ponctuelles ont fourni les informations manquantes.

Le calculateur ESEGA

LA BASE DE DONNÉES DE CALCUL

L'intégration de l'ensemble des données nécessaires à l'établissement de l'inventaire dans un système de gestion de base de données relationnelle (SGBDR) permet d'exploiter les possibilités du langage SQL (*structured query language*) pour créer des requêtes imbriquées correspondant aux différentes étapes du bilan matière. Ces requêtes se basent sur des tables de données qui permet-



▲ Figure 2 – Schéma relationnel simplifié de la base de données.

tent des calculs en chaîne : la modification d'une donnée « amont » induit instantanément des changements aux étapes suivantes du bilan matière.

Le schéma relationnel ou modèle physique de données (figure 2) décrit l'agencement des tables de la base de données relationnelle et les associations créées entre ces tables.

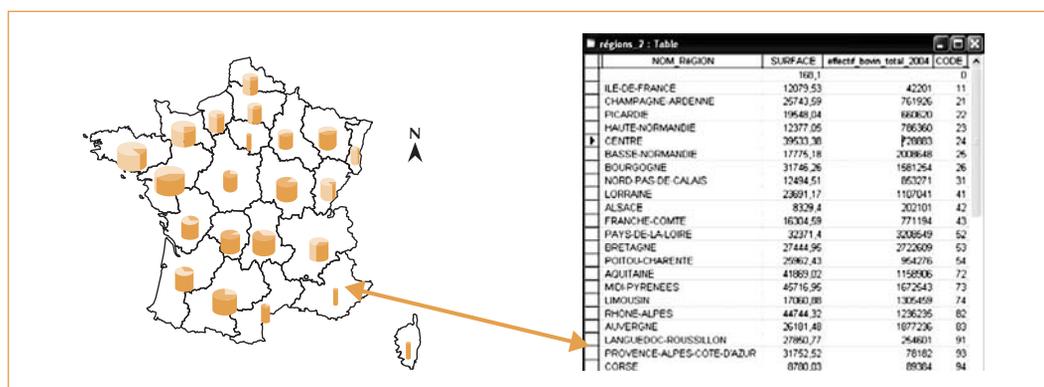
Le SGBDR comporte 11 tables associées entre elles par des relations de type « 1 à plusieurs » (par exemple : à 1 animal de la table « Animaux » correspondent plusieurs conduites d'élevages enregistrées dans la table « Conduite_elevage »). Ce système de gestion des données évite les redondances d'informations et permet, par l'utilisation des requêtes SQL, de réaliser les calculs souhaités.

Il faut noter les relations particulières avec les tables « Régions » et « Cantons », qu'il n'est possible

d'implanter que dans un SGBDR disposant d'une extension spatiale pour être interrogé via des outils de représentation de données géographiques.

LE SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE (SIG)

« Un SIG est un ensemble organisé de matériels informatiques, de logiciels, de données géographiques et de personnel capable de saisir, stocker, mettre à jour, manipuler, analyser et présenter toutes formes d'informations géographiquement référencées » (De Blomac *et al.*, 1994). Dans un logiciel SIG, les données géométriques et les données descriptives représentant et décrivant un objet géographique sont interconnectées. Ainsi, à chaque objet géographique seront obligatoirement associées des données descriptives situées dans sa table attributaire comme l'illustre la figure 3. Les éléments graphiques (l'ensemble



◀ Figure 3 – Principe du SIG, lien données graphiques/données alphanumériques.

des contours des régions) sont les constituants de la « couche géographique » des régions appelée également « thème géographique ».

LE COUPLAGE SIG-SGBDR

L'outil de calcul ESEGA combine les atouts du SGBDR et du SIG.

Les possibilités d'Access 2000® ont été utilisées pour créer des formulaires de saisie et de consultation des données (figure 4). Le calcul de l'inventaire des émissions est réalisé avec plusieurs niveaux de regroupements possibles :

- par animal,
- par espèce,
- ou pour l'ensemble des espèces considérées (bovins, porcs et volailles).

L'outil de calcul abrite l'ensemble des données nécessaires aux calculs, permet de réaliser les inventaires des émissions actuelles et l'évaluation environnementale de techniques de réduction.

Plusieurs voies peuvent être utilisées pour définir des scénarios de réduction des émissions : (1) par la simulation d'une seule technique de réduction (ayant un impact direct uniquement sur une étape, comme la couverture des fosses de stockage) ; (2) par la redéfinition d'une filière d'élevage (ayant des impacts sur différentes étapes, par

exemple en modifiant les caractéristiques du lisier, comme le traitement aérobie du lisier de porc) ; (3) par l'utilisation combinée de différentes techniques de type (1) et/ou (2) afin de tester l'impact de scénarios complexes.

Enfin, l'intégration complète de l'outil au SIG aboutit à des cartographies automatiques qui ne nécessitent pas, pour l'utilisateur, de maîtriser le logiciel SIG. En effet, afin d'obtenir des représentations spatialisées dynamiques des calculs effectués dans le SGBDR, la démarche consiste ici à placer le thème géographique et sa table attributaire dans un « container » capable à la fois de gérer cette couche spatiale et de permettre le développement informatique d'une application. Il faut néanmoins que les outils SIG reconnaissent ce « container ».

Le choix technique de format de l'outil s'est tourné vers une géodatabase®. Il s'agit d'un SGBDR Microsoft Access 2000® qui est étendu à la gestion des données géographiques.

Les résultats de calculs sont enregistrés dans les champs de la table attributaire du thème géographique des régions ou des cantons (figure 2) selon l'échelle de restitution souhaitée. Pour cela, un calcul itératif développé en *visual basic* pour application (VBA) est réalisé pour l'évaluation des émissions gazeuses sur chaque échelle de calcul. Ainsi, les cartographies réalisées sont le reflet des derniers calculs effectués.

Les outils informatiques qui ont été mobilisés sont :

- une géodatabase rassemblant les données d'élevage précédemment décrites et les thèmes géographiques des régions et des cantons (geofla®régions et geofla®cantons, Institut géographique national),
- le logiciel SIG ArcGIS 8.3.

Résultats

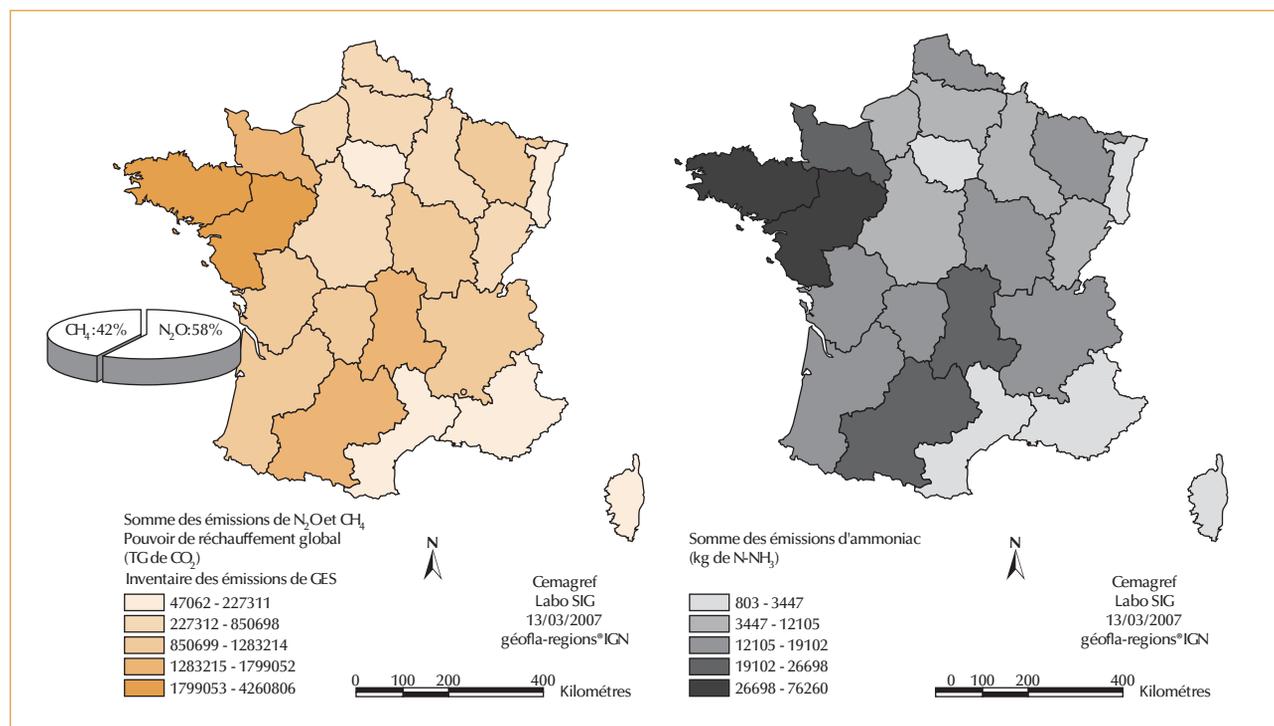
Inventaire spatialisé des émissions gazeuses liées aux déjections d'élevage

L'inventaire effectué à partir de l'outil précédemment décrit et en utilisant les données statistiques de l'année 2003 a permis d'estimer les émissions de CH₄, N₂O et NH₃ respectivement à 10,2 Tg eqCO₂, 14 Tg eqCO₂ et 382 ktN. Les résultats spatialisés montrent d'importantes disparités régionales (figure 5). Ainsi, on observe une

▼ Figure 4 – Menu général de la base de données.

The screenshot shows a software interface with several menu sections:

- Formulaires de Saisies**: Contains buttons for "Conduite Elevage et facteurs d'Emissions", "Stockage", and "Epannage".
- Consultation des données**: Includes "Synthèse des FE issus de la bibliographie au :" with radio buttons for "bâtiment", "stockage", "pâturage", and "épannage".
- Inventaire national**: Features "Calcul des émissions au pâturage, au bâtiment, au stockage et à l'épannage et bilan selon :" with radio buttons for "Conduite d'élevage et espèce", "Animal", "Espèce", and "Somme totale".
- Scénarios**: Includes a button "Utiliser des scénarios".
- Calcul régional et cartographie**: Contains buttons for "Mise à jour des effectifs des animaux et calcul pour chaque région" and "Carto région Emissions totales".



▲ Figure 5 – Inventaire régional des émissions (à gauche : GES, à droite : NH₃).

prépondérance des émissions pour les régions Bretagne et Pays de la Loire qui sont les principales régions d'élevage. Les émissions de ces deux régions représentent ainsi environ un tiers des émissions nationales (31 % pour les GES et 35 % pour l'ammoniac).

Concernant l'effet de serre, les résultats de l'inventaire font apparaître, au niveau national, une contribution majeure des émissions de N₂O (58 %) par rapport aux émissions de CH₄. Cette répartition est proche de 60 % pour toutes les régions françaises, sauf pour la Bretagne où ce pourcentage est de 48 %. Cette différence s'explique principalement par une proportion, plus importante en Bretagne, d'élevages où les déjections sont générées dans les bâtiments et sous forme liquide (lisiers). Les émissions de méthane sont alors favorisées par rapport aux émissions de N₂O.

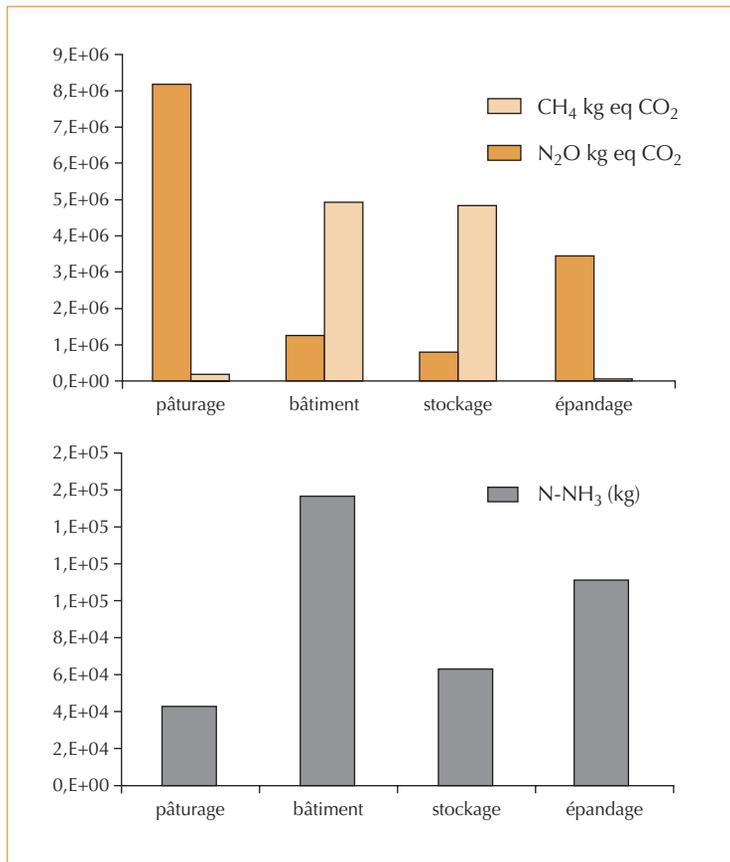
Les résultats présentés sur la figure 6 correspondent à la répartition des émissions gazeuses nationales pour les différentes étapes de gestion des déjections. Pour le N₂O, les étapes « extérieur » et « épandage » sont les principaux postes émetteurs avec respectivement 60 % et 25 % des émissions totales. Au contraire, les étapes « bâtiment » et « stockage » sont prépondérantes pour

les émissions de CH₄ avec respectivement 49 % et 48 % des émissions totales. Pour les gaz à effet de serre, l'analyse plus détaillée des données montre une homogénéité de répartition entre les postes d'émission dans les différentes régions, excepté pour la Bretagne qui montre une particularité aux étapes « extérieur » et « bâtiment » (respectivement 21 % et 38 % contre 35 % et 26 % pour la moyenne nationale). Là encore, on peut expliquer cet écart par une représentation plus élevée des élevages hors-sol en Bretagne, par rapport aux autres régions françaises.

Les émissions de NH₃, quant à elles, sont plus homogènes sur l'ensemble du territoire et se répartissent majoritairement au bâtiment et à l'épandage (respectivement 42 et 30 %) et en moindre mesure au stockage (17 %) et à l'extérieur (11 %).

La figure 7 représente la contribution de chaque filière d'élevage aux émissions totales de gaz à effet de serre et de NH₃. On note la prépondérance des émissions issues de l'élevage bovin.

Si on observe les résultats de cet inventaire à l'échelle régionale, on s'aperçoit qu'il faut nuancer les observations de la figure 7. En effet, cette répartition n'est pas homogène sur l'ensemble des



▲ Figure 6 – Répartition des émissions de gaz à effet de serre et d'ammoniac par étape de gestion des déjections.

régions françaises, certaines régions étant plus spécialisées dans certains types d'élevage. Ainsi, alors que la contribution des bovins aux émissions de gaz à effet de serre est supérieure à 80 % dans la plupart des régions, elle n'est que de 51 % en

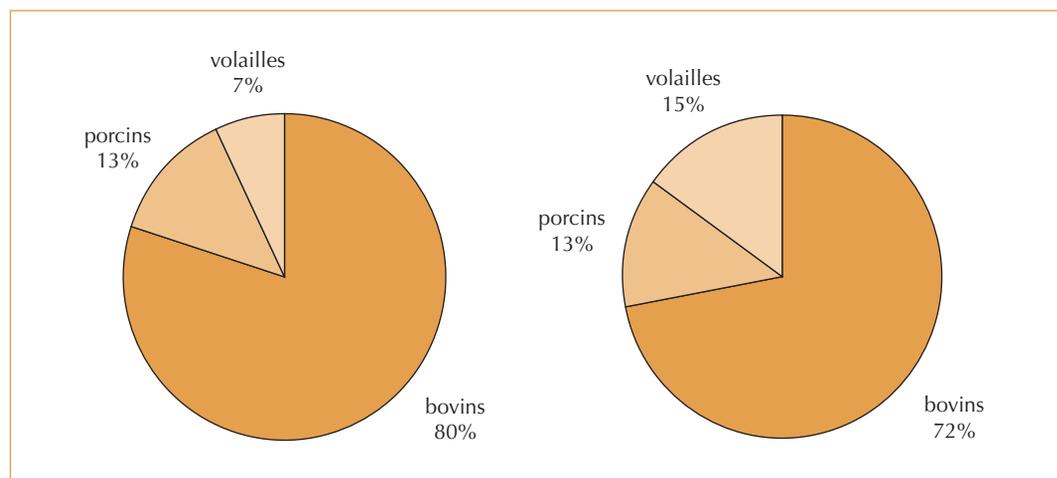
Bretagne, en raison de l'importance des filières porcine (36 %) et avicole (13 %). Pour les émissions de NH₃, des remarques similaires peuvent être faites pour la Bretagne, en liaison là aussi avec les caractéristiques de ses filières d'élevage. En outre, les régions de production bovine laitière (Bretagne, Pays de la Loire, Basse-Normandie), ou à viande (Auvergne, Midi-Pyrénées), présentent les niveaux d'émissions les plus élevés.

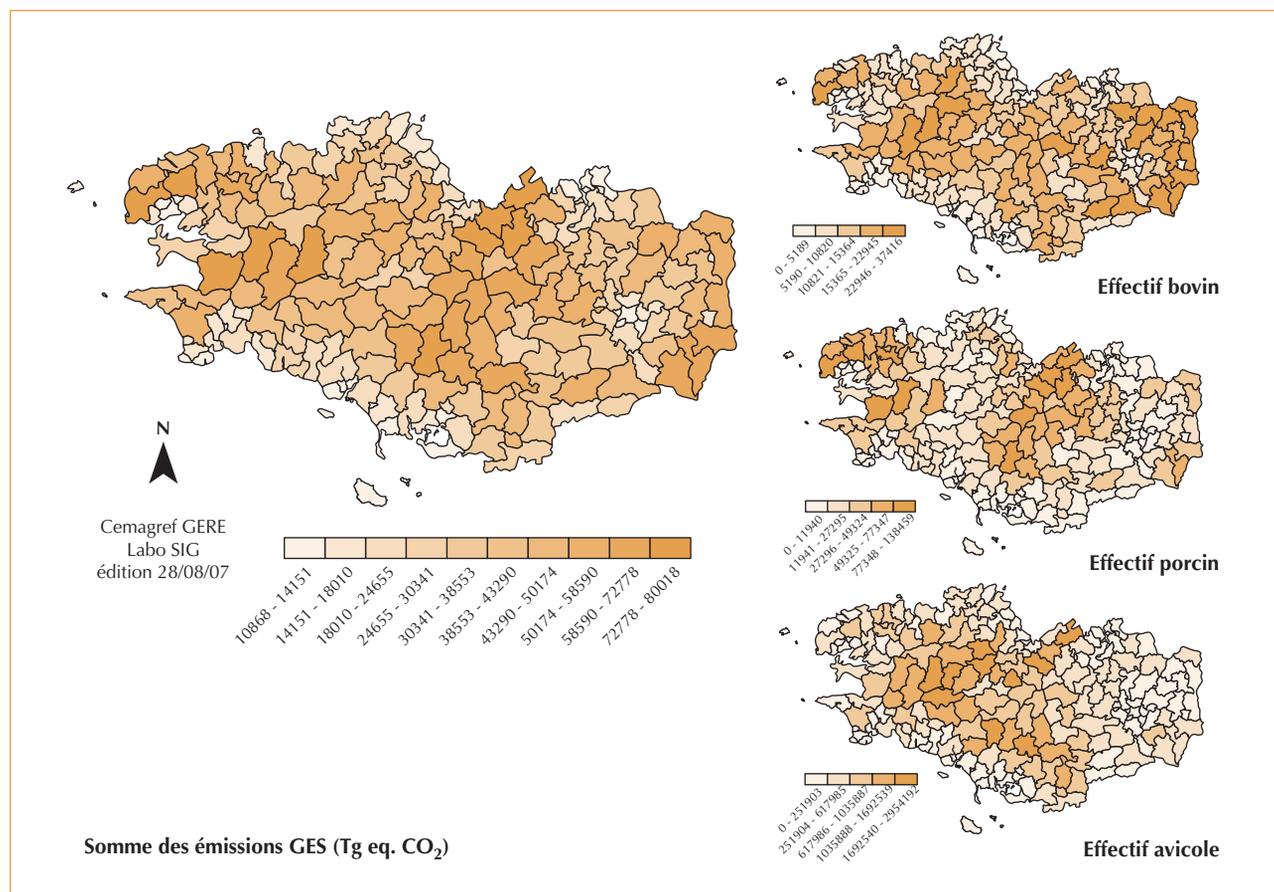
Aide à la décision

ÉTAT DES LIEUX D'UN TERRITOIRE

Il est souvent difficile pour un décideur de connaître les zones d'actions prioritaires et d'estimer l'impact de mesures environnementales sur le territoire dont il a la charge. L'outil ESEGA permet d'approcher cette double ambition à différentes échelles territoriales, de la région au canton. La figure 8 montre l'intérêt de l'outil ESEGA pour la combinaison des différentes sources d'émissions gazeuses. Ces cartographies mettent en évidence une relation entre les cheptels et les émissions. Néanmoins, les résultats spatialisés de l'outil ESEGA, en prenant en compte les pratiques d'élevage, procurent un meilleur indicateur que la seule cartographie des cheptels. Par ailleurs, utiliser l'outil ESEGA à l'échelle cantonale offre des possibilités de diagnostic afin d'envisager la mise en place de mesures environnementales ciblées sur des territoires particuliers au lieu de procéder par filière d'élevage ou de façon uniforme sur la région. Il permet également d'envisager la mise en cohérence de ces mesures avec d'autres actions environnementales liées à l'élevage, par exemple au niveau de bassins versants. En ce sens, le SIG

► Figure 7 – Répartition des émissions par espèce animale (à gauche : GES, à droite : NH₃).





▲ Figure 8 – Émissions de GES cantonales calculées par ESEGA en Bretagne et effectifs des principales productions.

pourrait d'ailleurs se révéler un outil approprié pour croiser ces informations d'emprises géographiques différentes.

ÉVALUATION DE STRATÉGIES DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS

Afin d'illustrer les possibilités de l'outil ESEGA pour l'évaluation de stratégies de réduction des émissions, l'impact d'un scénario incluant des techniques de réduction pour lesquelles des données de mesures d'efficacité existent est présenté. Ce scénario fait intervenir des modifications à plusieurs étapes de la filière d'élevage. Il est globalement défini comme suit :

- alimentation biphasée de 55 à 75 % des porcs selon les stades physiologiques,
- alimentation de 50 % des bovins laitiers avec baisse du taux protéique,
- vidange journalière des bâtiments de porcs élevés sur lisier (25 %),

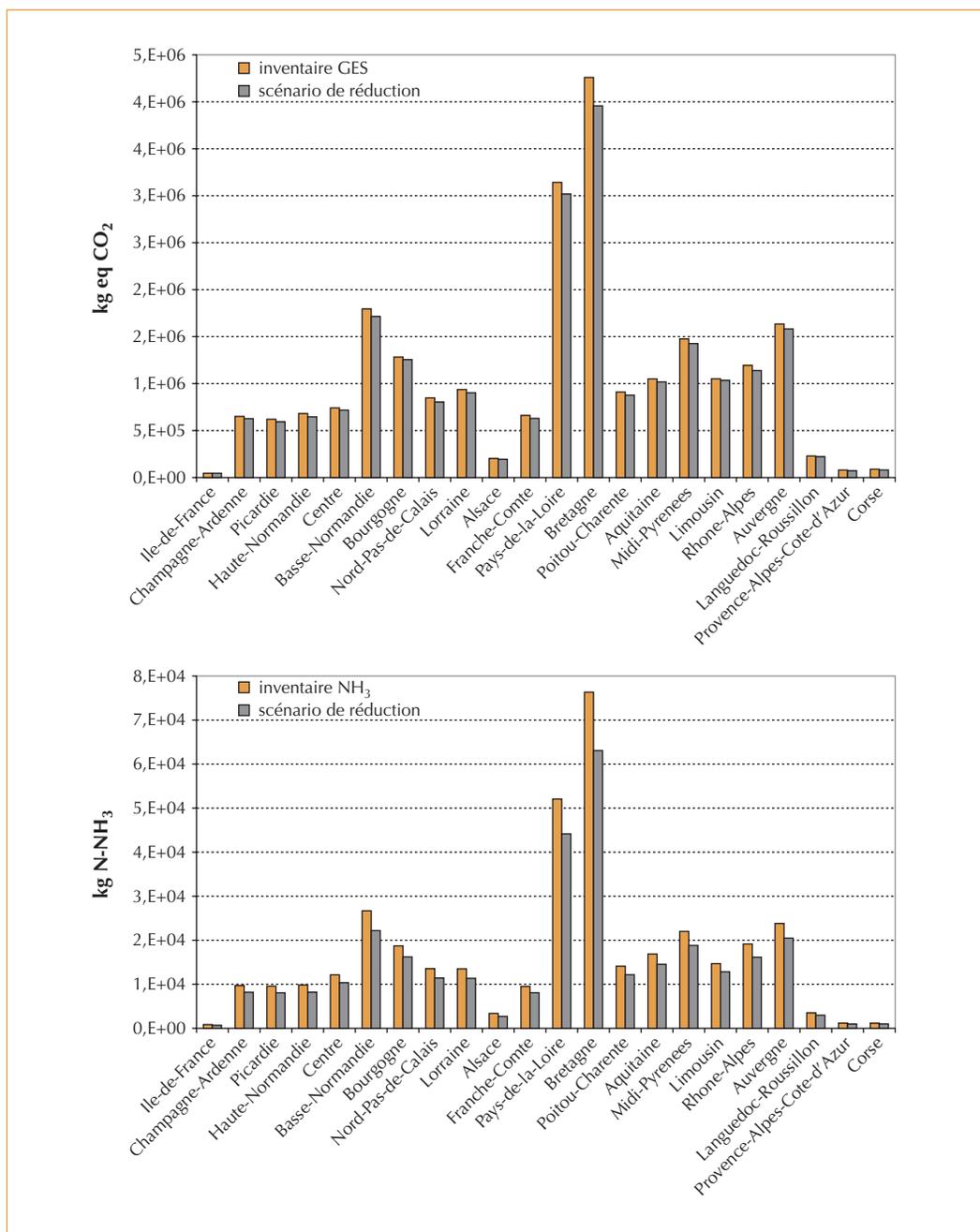
– digestion anaérobie du lisier de porcs (23 %), puis épandage de ce lisier digéré suivi d'un labour rapide (50 %) ou d'un épandage avec une rampe à pendillards (50 %),

– stockage du lisier en fosse couverte (50 %),

– optimisation de l'épandage du lisier (25 % par pendillards, 25 % suivi d'un labour rapide) et du fumier (50 % suivi d'un labour rapide).

Compte tenu de la répartition territoriale des cheptels et du scénario testé, ce sont les régions de l'Ouest qui ont le potentiel de réduction le plus élevé (figure 9). La réduction des émissions observée pour les GES en Bretagne/Pays de la Loire est en moyenne de 7 % alors que la moyenne nationale de réduction n'est que de 4,5 %. Pour le NH₃, la diminution observée est plus homogène sur l'ensemble du territoire avec une moyenne de 15,5 %.

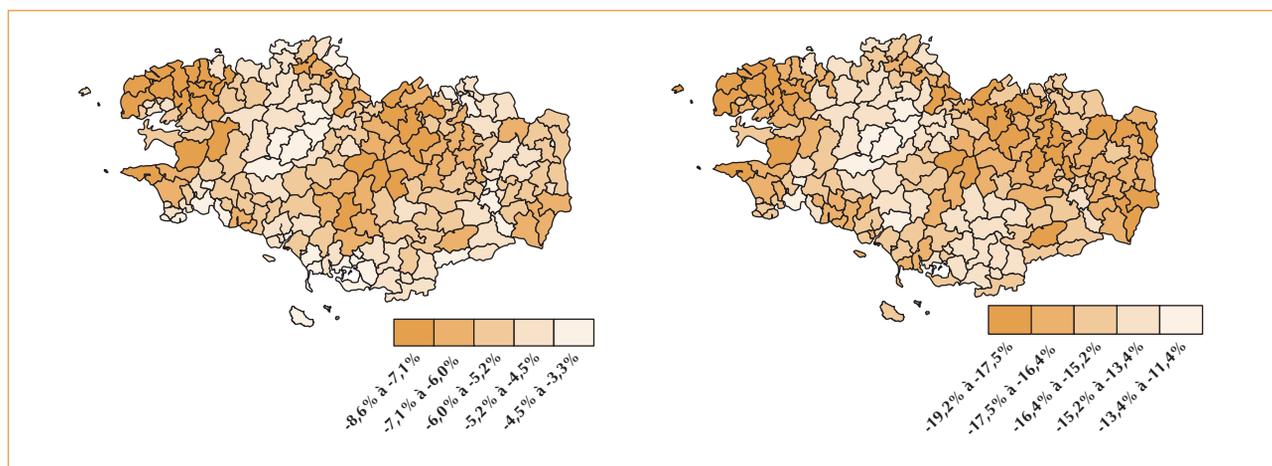
► Figure 9 –
Comparaison de
l'inventaire régional
actuel et d'un scénario
de réduction.



Ce scénario est difficilement applicable dans la réalité, car il implique des modifications importantes dans la gestion des déjections, avec des contraintes techniques de stockage et d'épandage. De plus, il s'applique à une situation nationale moyenne répercutée dans chacune des régions, alors que des disparités régionales existent, notamment au niveau de l'élevage bovin.

Cependant, il peut fournir des pistes de réflexion au niveau régional pour trouver des solutions alternatives.

Il est intéressant de comparer les résultats de ce scénario à fortes contraintes sur les différents cantons de la région Bretagne, où les différences de productions animales sont marquées d'un



▲ Figure 10 – Impact du scénario testé à l'échelle cantonale pour la région Bretagne exprimé en % de réduction (à gauche : GES, à droite : NH₃).

canton à un autre et où les élevages bovins, porcins et avicoles sont présents en forte densité (figure 10).

De manière générale, avec ce scénario, ces cartographies montrent que la marge de progrès est plus importante sur les cantons les plus fortement émetteurs en raison de la conjonction de l'ensemble des filières d'élevage. En effet, pour ces cantons, on peut obtenir des abattements proches de 20 % pour le NH₃ et de 7 à 8,5 % pour les GES. Les meilleurs résultats obtenus de ce scénario sur les gaz à effet de serre se situent là où les élevages porcins dominent (figure 8) alors que les émissions de GES issues de l'élevage bovin sont majoritaires (cf. page 26). En effet, il apparaît plus difficile, pour l'élevage bovin, de réduire les émissions de GES de cette filière, qui proviennent principalement du pâturage et de la gestion du fumier.

Cependant, en combinant ce scénario avec des simulations sur les autres sources agricoles des émissions de GES (fertilisation minérale, fermentation entérique), les efficacités globales obtenues seraient plus significatives.

Conclusions et perspectives

L'approche développée au cours de cette étude, basée sur un flux de matière avec conservation de masse, permet le calcul des émissions gazeuses liées à la gestion des déjections animales. Elle permet de prendre en compte les reports possibles « inter-gaz », « inter-poste » voire « inter-milieu » (air-sol) lors d'une modification de pratique. Cette méthodologie apporte ainsi un inventaire plus réaliste des émissions qui tient compte des parti-

cularités françaises et qui s'applique aux différentes étapes de la filière de gestion des déjections d'élevage. En outre, elle montre des possibilités intéressantes pour l'évaluation de techniques de réduction des émissions polluantes, en permettant la simulation de l'impact de scénarios complexes. D'autre part, l'outil ESEGA, par l'utilisation conjointe d'une base de données relationnelle et d'un SIG, présente plusieurs avantages :

- le stockage et le traitement des données dans un SGBDR permettent des liens dynamiques entre données et résultats ; l'effet d'une mise à jour sur les données d'entrée est donc instantané ;
- des cartographies automatisées à des fins d'inventaires ou de représentations de résultats de scénarios sont possibles ;
- les traitements informatiques sont indépendants de l'échelle spatiale, ce qui rend l'outil évolutif vers d'autres échelles géographiques.

Ainsi, l'outil d'aide à la décision ESEGA se révèle être bien adapté pour des besoins d'inventaires et d'aide à la décision, tout en étant flexible à des évolutions futures.

En effet, l'utilisation du SIG peut être étendue à la prise en compte de données géographiques complémentaires pour le calcul des émissions gazeuses. Par exemple, les facteurs de modulation des émissions de N₂O (climat et caractéristiques du sol) indiqué par Stehfest *et al.* (2006) peuvent être intégrés à l'outil ESEGA. Cette approche élargie devrait impliquer une imbrication plus conséquente entre données géographiques, données descriptives et calculs, ce qui est possible grâce aux choix techniques de structuration de

l'information qui ont été effectués. De même, des informations plus détaillées sur les spécificités régionales en termes d'élevage pourraient être intégrées, notamment pour les bovins.

L'intégration de scénarios offrant les meilleurs compromis coût/efficacité environnementale est une voie à envisager en intégrant une approche économique des technologies de réduction. Enfin, des inventaires à d'autres échelles spatiales seraient envisageables. Par exemple, dans le cadre des plans de reconquête de la qualité de l'eau, l'échelle d'étude étant le bassin versant,

une application de l'outil ESEGA à cette échelle serait intéressante afin de combiner les approches et évaluer les effets sur le compartiment « Atmosphère » des actions menées pour améliorer la qualité de l'eau.

Par ailleurs, une évaluation régionalisée des potentialités des effluents d'élevage en matière de production de biogaz a été menée en Grèce avec une démarche similaire de couplage SGBDR-SIG (Batzias *et al.*, 2004), et pourrait donc également être envisagée au niveau français. □

Résumé

L'article présente ici une approche originale de construction d'un système d'informations appliqué à l'évaluation des émissions de NH_3 (ammoniac), N_2O (protoxyde d'azote) et CH_4 (méthane) aux différentes étapes de la filière de gestion des déjections d'élevage, sur le principe du bilan matière. L'outil ESEGA correspond à la combinaison d'une base de données relationnelle de calcul et d'un système d'information géographique, afin de fournir des cartographies dynamiques des résultats. Cet outil d'aide à la décision se révèle bien adapté pour une estimation réaliste des émissions et l'évaluation de l'impact, sur l'ensemble de la filière, d'une stratégie de réduction des émissions, comportant une ou plusieurs techniques associées. Les possibilités évolutives de cet outil permettent d'envisager des applications nouvelles et des utilisations à plusieurs échelles spatiales.

Abstract

An original approach of construction of an information system applied to the assessment of NH_3 , N_2O and CH_4 gas emissions at the various stages of livestock manure management based on the mass-flow concept is herein presented. The tool ESEGA corresponds to the combination of a relational database dedicated to calculations and a Geographical Information System (GIS) in order to provide dynamic cartographies of the results. This tool of decision-making aid appears well adapted for a realistic assessment of the gaseous emissions and for the evaluation of mitigation strategies, with single or combined techniques. The evolutionary possibilities of this tool enable to consider new applications and uses at several space scales.

Bibliographie

- BATZIAS, F.-A., SIDIRAS, E.-K., SPYROU, E.-K., 2004, Evaluating livestock manures for biogas production : a GIS based method, *Renewable Energy*, n° 30, p. 1161-1176.
- FREIBAUER, A., 2003, Regionalised inventory of biogenic greenhouse gas emissions from european agriculture, *European Journal of Agronomy*, n° 19, p. 135-160.
- CHADWICK, D.-R., SNEATHE, R.-W., PHILLIPS, V.-R., PAIN, B.-F., 1999, A UK inventory of nitrous oxide emissions from farmed livestock, *Atmospheric Environment*, n° 33, p. 3345-3354.
- CITEPA, 2006a, Inventaire des émissions de gaz à effet de serre en France au titre de la Convention cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques, CORALIE format CCNUCC, mise à jour décembre 2006, CITEPA, Paris (<http://citepa.org/publications/Inventaires.htm>).
- CITEPA, 2006b, Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France au titre de convention sur la pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance et de la directive européenne relative aux plafonds d'émissions nationaux (NEC), CORALIE format CEE-NU, mise à jour décembre 2006, CITEPA, Paris (<http://citepa.org/publications/Inventaires.htm>).
- DAMMGEN, U., WEBB, J., 2006, The development of the EMEP/CORINAIR Guidebook with respect to the emissions of different nitrogen and carbon species from animal production, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, n° 112, p. 241-248.
- DE BLOMAC, F., GAL, R., HUBERT, M., RICHARD, D., TOURRET, C., 1994, *ARC/INFO : concepts et applications en géomatique*, Paris, Hermès, 256 p.
- EMEP/CORINAIR, 2006, Emission inventory guidebook (http://reports.eea.europa.eu/EMEP-CORINAIR4/en/page_002.html).
- GAC, A., BELINE, F., BIOTEAU, T., 2007, A french inventory of gaseous emissions (CH₄, N₂O, NH₃) from livestock manure management using a mass flow approach, *Livestock Science*, n° 112, p. 252-260.
- GAC, A., BELINE, F., BIOTEAU, T., 2006, *Flux de gaz à effet de serre (CH₄, N₂O) et d'ammoniac (NH₃) liés à la gestion des déjections animales : Synthèse bibliographique et élaboration d'une base de données*, rapport d'étude, 79 p.
- GIEC, 2000, Recommandations du GIEC en matière de bonnes pratiques et de gestion des incertitudes pour les inventaires nationaux, chapitre 4 Agriculture (http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/french/gp_gaum_fr.htm)
- HYDE, B.-P., CARTON, O.-T. et al., 2003, A new inventory of ammonia emissions from Irish agriculture, *Atmospheric Environment*, n° 37, p. 55-62.
- PAIN, B.-F., VAN DER WEERDEN, T.-J., CHAMBERS, B.-J., PHILLIPS, V.-R., JARVIS, S.-C., 1998, A new inventory for ammonia emissions from UK agriculture, *Atmospheric Environment*, n° 32 (3), p. 309-313.
- PORTEJOIE, S., MARTINEZ, J., LANDMANN, G., 2002, L'ammoniac d'origine agricole : impacts sur la santé humaine et animale et sur le milieu naturel, *Productions animales*, n° 15, p. 151-160.
- STEHFEST, E., BOUWMAN, L., 2006, N₂O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation : Summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, n° 74, p. 207-228.
- SCEES, 2002 à 2004, La Statistique agricole annuelle, Agreste, Chiffres et Données, MAPAR, Paris.
- SCEES, 2001, La Statistique Agricole, Agreste, Recensement Agricole 2000, Fiche comparative Bretagne, MAPAR, Paris.
- WEBB, J., MISSELBROOK, T.-H., 2004, A mass-flow model of ammonia emissions from UK livestock production, *Atmospheric Environment*, n° 38, p. 2163-2176.