



**HAL**  
open science

## Typologie des bilans d'azote de divers types d'exploitation agricole: recherche d'indicateurs de fonctionnement

Jean-Claude Simon, Carlo Grignani, Alain Jacquet, Louis Le Corre, Jérôme  
Pagès

### ► To cite this version:

Jean-Claude Simon, Carlo Grignani, Alain Jacquet, Louis Le Corre, Jérôme Pagès. Typologie des bilans d'azote de divers types d'exploitation agricole: recherche d'indicateurs de fonctionnement. *Agronomie*, 2000, 20 (2), pp.175-195. 10.1051/agro:2000118 . hal-00886003

**HAL Id: hal-00886003**

**<https://hal.science/hal-00886003>**

Submitted on 11 May 2020

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

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

## Typologie des bilans d'azote de divers types d'exploitation agricole: recherche d'indicateurs de fonctionnement

Jean-Claude SIMON<sup>a</sup>, Carlo GRIGNANI<sup>b</sup>, Alain JACQUET<sup>a</sup>, Louis LE CORRE<sup>c</sup>, Jérôme PAGÈS<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Unité Associée INRA de Physiologie et Biochimie Végétales, Université de Caen, Esplanade de la Paix, 14032 Caen Cedex, France

<sup>b</sup> Dipartimento di Agronomia, Selvicoltura e Gestione del territorio, Università di Torino, 44 via L. da Vinci, 10095 Grugliasco, Italie

<sup>c</sup> Station d'Agronomie de Quimper, 4 rue Stang Vihan, 29000 Quimper, France

<sup>d</sup> Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, 65 rue de Saint Briec, 35042 Rennes Cedex, France

(Reçu le 6 mai 1999 ; révisé le 3 décembre 1999 ; accepté le 16 décembre 1999)

**Résumé** – Suite à un travail d'enquête s'appuyant sur la méthode du bilan apparent de l'azote à l'échelle de l'exploitation agricole, les entrées et les sorties d'azote inhérentes aux transactions commerciales de l'agriculteur ont pu être analysées dans 555 fermes de France et du Nord de l'Italie. Cette méthode qui assimile l'exploitation à une boîte noire, prend également en compte les entrées d'azote par la fixation symbiotique. Elle n'intègre ni les entrées par les dépôts atmosphériques, ni les sorties par volatilisation, dénitrification et lixiviation, d'où le qualificatif de bilan « apparent ». L'étude a permis de préciser les excédents d'azote et leurs principales sources de variation pour 11 grands types de systèmes de production agricole : grandes cultures, exploitations avec ateliers hors sol, élevages bovins, exploitations mixtes de polyculture-élevage. Les fermes de grande culture présentent les surplus d'azote les plus faibles (en moyenne  $50 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ ), les fermes orientées vers la production bovine de lait ou de viande, des valeurs intermédiaires (30 à  $250 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ ) et les exploitations intensives avec ateliers hors sol, les excédents les plus élevés (250 à plus de  $500 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ ). En règle générale, il apparaît que dans les exploitations présentant les soldes les plus faibles ( $< 200 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ ), l'excédent d'azote est étroitement lié au niveau des entrées par les achats d'engrais minéraux. Pour celles présentant les surplus les plus élevés ( $> 200 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ ), l'excédent est fortement dépendant des entrées d'azote par les aliments destinés à l'alimentation animale. Deux types d'exploitations se distinguent nettement : celles orientées vers la production végétale où les indices d'efficacité et de conversion de l'azote en produits utiles sont en moyenne élevés (72 %) et celles spécialisées en production animale où ces indices sont plus faibles (22 à 44 %), ces dernières mobilisant des quantités très variables d'azote mais en exportant peu. Contrairement aux exploitations où le type de production est lié à une surface où le gaspillage d'azote augmente avec le surplus, les exploitations avec ateliers hors sol gaspillent d'autant moins d'azote que l'excédent est élevé. La forte variabilité des excédents d'azote et des

---

Communiqué par Emmanuel Frossard (Lindau, Switzerland)

---

\* Correspondance et tirés à part  
jcsimon@ibba.unicaen.fr

indices d'efficacité, de conversion et de gaspillage suggère que dans de nombreuses situations, il est possible de diminuer le risque pour l'environnement d'une exploitation sans remise en cause majeure du système de production.

### **Azote / bilan / exploitation / excédents / variabilité**

**Abstract – Typology of nitrogen balances on a farm scale: research of operating indicators.** A farm survey based on the method of the nitrogen apparent balance at the farm scale quantified the nitrogen inputs and outputs due to the farm commercial transactions. A total of 555 farms, partly situated in France and partly in north-west Italy, was analyzed. This method considers the farm as a “black box” and also takes the nitrogen fixation into account. However, nitrogen input due to atmospheric deposition, or nitrogen losses due to volatilisation, denitrification or leaching are disregarded: this is the reason why it is called “apparent balance”. The study quantified the excess of nitrogen and its most important sources of variation in 11 important types of farm production systems including stockless farming, crop-less intensive rearing, forage crop-livestock integrated farming systems, mixed farming with livestock. The surplus of N was smaller in the stockless farming system ( $50 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$ , on average), intermediate in dairy cow or beef breeding farms (from 30 to  $250 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), and higher in intensive stocking systems where forage was not produced in the farm (from 250 to  $500 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , or even more). In general, where the apparent N surplus was small ( $< 200 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) the excess of N was mainly caused by the purchase of mineral fertilizers, while in farms with a high surplus ( $>200 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) the N surplus was highly dependent on N input of purchased animal feedstuffs. Two groups of farming systems were clearly identified: one was oriented to crop production and was characterized by a favourable N efficiency or N conversion (72%); the other one was oriented to livestock production, with very variable N fluxes, but little outputs, and was characterized by lower values (22-44%). The very large variability in N surplus and in indicators (N efficiency, N conversion and N losses) suggests that in many situations it should be possible to reduce the environmental impact of a farm without drastic changes in the production system.

### **Nitrogen / balance / farm / surplus / variability**

#### **Liste des abréviations**

##### *Types d'exploitations*

BIO	Fermes biologiques,
AUT	Fermes recherchant plus d'autonomie (recours aux légumineuses)
DIV	Type hétérogène regroupant les exploitations n'appartenant pas aux 2 premiers
C	Grandes cultures
CV	Grandes cultures associées à la production de viande bovine
DBC	Ateliers avicoles combinés à diverses spéculations
P	Ateliers porcins spécialisés
PD	Ateliers porcins associés à des productions diverses
PVL	Ateliers porcins et production laitière
VL	Production spécialisée de lait
V	Production spécialisée de viande bovine
VLC	Production laitière et cultures de vente
VLCV	Production de lait, de viande bovine et de cultures de vente
VLV	Double spécialisation, lait et viande bovine

##### *Caractéristiques des exploitations*

SAU	Surface Agricole Utile (ha)
CER	Céréales (% de la SAU)
MAG	Maïs grain (% de la SAU)
OLP	Oléagineux et protéagineux (% de la SAU)
MAE	Maïs ensilage (% de la SAU)
PPE	Prairies permanentes (% de la SAU)
PTE	Prairies temporaires (% de la SAU)
PI N	Prairies diverses (% de la SAU)
ASS	Associations graminées - légumineuses (% de la SAU)
LEF	Prairies artificielles (% de la SAU)
AUT	Autres cultures (% de la SAU)
USA	Chargement bovin par ha de SAU ( $\text{UGB}\cdot\text{ha}^{-1}$ )
PHA	Porcs charcutiers produits (nombre $\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ )
HAV	Volailles produites (nombre $\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ )
LSA	Litres de lait produits par ha de SAU ( $\text{l}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ )
VHA	Viande produite par ha de SAU ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ )

##### *Termes du bilan de l'azote (exprimés par hectare de SAU)*

ENT	<b>Total des entrées d'azote (<math>\text{kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}</math>)</b>
ENG	Engrais minéraux azotés ( $\text{kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ )
DEE	Entrées de déjections animales ( $\text{kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ )

ALI	Aliments du bétail (kg·N·ha <sup>-1</sup> ·an <sup>-1</sup> )
DIV	Entrées diverses dont la paille (kg·N·ha <sup>-1</sup> ·an <sup>-1</sup> )
FIX	Fixation symbiotique (kg·N·ha <sup>-1</sup> ·an <sup>-1</sup> )
ANI	Animaux de renouvellement (kg·N·ha <sup>-1</sup> ·an <sup>-1</sup> )
<b>SOR</b>	<b>Total des sorties (kg·N·ha<sup>-1</sup>·an<sup>-1</sup>)</b>
DES	Sorties de déjections animales (kg·N·ha <sup>-1</sup> ·an <sup>-1</sup> )
VEG	Produits végétaux vendus (kg·N·ha <sup>-1</sup> ·an <sup>-1</sup> )
LAI	Lait vendu (kg·N·ha <sup>-1</sup> ·an <sup>-1</sup> )
VIA	V viande vendue (kg·N·ha <sup>-1</sup> ·an <sup>-1</sup> )
OEU	Œufs vendus (kg·N·ha <sup>-1</sup> ·an <sup>-1</sup> )
<b>BIL</b>	<b>Bilan N (kg·N·ha<sup>-1</sup>·an<sup>-1</sup>)</b>

#### *Autres indicateurs de fonctionnement*

EFF	Indice d'efficacité de l'azote : EFF = SOR/ENT
CVE	Indice de conversion de l'azote : CVE = UTI/ENT
UTI	Sorties utiles (kg·N·ha <sup>-1</sup> ·an <sup>-1</sup> ) : UTI = VEG+LAI+VIA+OEU
GAS	Indice de gaspillage : GAS = BIL/UTI.

## 1. Introduction

La responsabilité de l'agriculture dans les processus de pollution nitrique n'est plus à démontrer [5, 6, 16, 17, 20, 28, 31]. De très nombreux travaux, effectués principalement au cours des deux dernières décennies, ont ainsi eu pour objectif de préciser les différents impacts des pratiques agricoles sur le cycle naturel de l'azote. Selon les objectifs poursuivis, ces travaux ont été réalisés à différentes échelles d'espace et de temps : du lysimètre au bassin versant, d'un pas de temps horaire à pluriannuel. Les approches consacrées à l'étude des flux d'azote à l'échelle globale de l'exploitation agricole et aux éventuels excédents qui en résultent, reposent sur des méthodes de bilan. L'utilisation de telles méthodes pour faire des diagnostics et des pronostics d'évolution de certains minéraux n'est pas récente [5, 6]. Elles se sont avérées particulièrement efficaces. Ainsi, en exploitations porcines, l'enrichissement des sols en phosphore, potassium, cuivre et zinc prévu par ce type de méthode au début des années 70 [5] s'est confirmé 20 ans plus tard [8].

La méthode du bilan apparent de l'azote à l'échelle de l'exploitation agricole [32], adaptation

à l'azote de la méthode proposée par Coppenet pour les autres minéraux [7], a été utilisée par divers auteurs. Elle permet de quantifier les entrées et sorties d'azote inhérentes aux transactions commerciales de l'agriculteur (achats et ventes), l'exploitation agricole étant considérée comme une boîte noire. Cette méthode a été affinée en prenant en compte une estimation de la fixation symbiotique des légumineuses. Elle n'intègre ni les entrées par les dépôts atmosphériques, ni les sorties par volatilisation, dénitrification et lixiviation, d'où le qualificatif de bilan « apparent ». Les travaux réalisés à l'aide de cette méthode ont jusqu'à présent essentiellement concerné les exploitations d'élevage spécialisées en production laitière [4, 13, 14, 18, 33, 36].

Afin de disposer d'informations et de chiffres sur un ensemble plus large d'activités agricoles, nous avons effectué une approche comparative des entrées et sorties d'azote engendrées par une gamme diversifiée de systèmes de production allant des exploitations très intensives avec ateliers hors-sol à des fermes très extensives pratiquant l'agriculture biologique. Cette étude a été réalisée par enquête dans 555 exploitations agricoles de France et d'Italie, avec trois objectifs principaux :

- **préciser la nature et la variabilité des composantes du bilan** des différents systèmes ainsi que les soldes correspondants ; cette synthèse sur un nombre aussi important d'exploitations agricoles est inédite ; elle permet de disposer d'éléments de diagnostic intéressants, sur les excédents rencontrés dans les grands types d'exploitations, aucune hypothèse n'étant faite sur le devenir du surplus d'azote ainsi créé ;

- **analyser les facteurs de variation de l'excédent d'azote** en adoptant une démarche multidimensionnelle prenant en compte simultanément l'ensemble des caractéristiques de l'exploitation et l'ensemble des composantes du bilan ;

- **proposer** à partir des informations disponibles, **d'autres indicateurs de fonctionnement** aisément accessibles permettant de juger de l'efficacité ou du gaspillage de l'azote mis en jeu dans un système de production donné et des marges d'amélioration possibles.

## 2. Matériel et méthode

### 2.1. Choix d'une méthode de bilan de l'azote

Les méthodes de bilan des minéraux dont l'azote, sont très nombreuses [2, 5, 6, 15, 32]. Il en existe plus d'une trentaine qui se distinguent essentiellement par l'échelle et l'objet d'étude. Si l'objectif est de faire un diagnostic sur le risque d'atteinte environnementale d'une exploitation agricole donnée et d'en préciser l'origine, deux grands types d'approches peuvent être retenus. Ils diffèrent principalement par l'échelle à laquelle est effectuée l'analyse des flux au niveau de l'exploitation agricole. Le premier effectue cette analyse à l'échelle de la parcelle et l'exploitation est assimilée à une somme de parcelles : c'est le cas de la méthode « BASCULE » [2]. Le second appréhende l'exploitation dans sa globalité : la méthode du « bilan apparent » [32] en est une illustration.

C'est cette dernière méthode qui a été retenue. Elle permet non seulement de ne pas privilégier les flux d'azote inhérents aux productions végétales par rapport à ceux liés aux productions animales mais aussi de s'affranchir d'une des difficultés majeure de l'approche parcellaire : la prise en compte des déjections, notamment les restitutions directes par les animaux au pâturage. Les effluents d'élevage ne sont pris en compte que lorsqu'ils font l'objet d'une transaction entre exploitations, ce qui limite les erreurs liées à ce paramètre dont les valeurs quantitatives et qualitatives sont souvent connues de façon approximative.

### 2.2. Méthode du bilan apparent

La détermination du bilan apparent de l'azote à l'échelle d'une exploitation agricole repose sur le calcul des entrées et des sorties d'azote du système que constitue l'exploitation. Ce bilan est dressé pour une année agricole donnée. Les informations nécessaires à ce calcul sont recueillies par enquête auprès des agriculteurs et se réfèrent à l'année agricole précédant l'enquête. Les données collectées concernent non seulement les données de base pour estimer ces divers flux (masses et teneurs en

azote des différents produits échangés) mais aussi les caractéristiques de l'exploitation afin d'en faire une typologie simple. Afin de pouvoir comparer aisément les exploitations agricoles entre elles, les termes du bilan sont exprimés par hectare de Surface Agricole Utile (SAU).

$$\text{Bilan (kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}\cdot\text{SAU}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}) = \Sigma \text{ Entrées} \\ (\text{kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}\cdot\text{SAU}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}) - \Sigma \text{ Sorties} \\ (\text{kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}\cdot\text{SAU}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}).$$

Les entrées d'azote sont estimées à partir des achats d'engrais azotés minéraux, des déjections animales provenant d'exploitations voisines, des aliments du bétail achetés, des animaux achetés pour renouveler les effectifs, d'entrées diverses comme les achats de paille et de la fixation symbiotique :

$$\text{ENT (kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}\cdot\text{SAU}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}) = \\ \text{ENG} + \text{DEE} + \text{ALI} + \text{ANI} + \text{DIV} + \text{FIX}.$$

La quantité d'azote mise en jeu par la fixation est calculée à partir du niveau de production des cultures de légumineuses (pures ou associées) et de leur teneur en azote. Par simplification, la fixation symbiotique a été estimée à 80 % de l'azote présent dans les parties aériennes des légumineuses [37]. Ne disposant pas d'informations précises sur le taux de légumineuses des prairies permanentes présentes dans les exploitations enquêtées, nous avons retenu un taux moyen de 10 % s'appuyant sur des travaux antérieurs réalisés sur les mêmes zones [38]. Ce chiffre est vraisemblablement faible pour les exploitations biologiques et peut conduire à minorer leurs excédents. La méthode de calcul retenue est simplificatrice en prairie associée pâturée car elle n'intègre pas les diverses régulations qui y sont observées. Par exemple sous les impacts de pissats, la proportion d'azote contenue dans la légumineuse et provenant de la fixation diminue [37].

De la même façon, les sorties sont estimées à partir des produits végétaux et animaux vendus (lait, viande et œufs), des déjections animales vendues à des tiers ou sortant de l'exploitation du fait de l'existence d'un plan d'épandage :

$$\text{SOR (kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}\cdot\text{SAU}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}) = \\ \text{VEG} + \text{LAI} + \text{VIA} + \text{OEU} + \text{DES}.$$

Cette méthode permet de déterminer la quantité d'azote excédentaire qui reste sur l'exploitation et de préciser l'importance relative des différents flux conduisant à ce surplus. Elle informe sur le risque d'atteinte à l'environnement et non sur la pollution effective [25].

### 2.3. Indicateurs de fonctionnement

Outre l'excédent d'azote, cette méthode de bilan permet de préciser différents indicateurs de fonctionnement pour une exploitation agricole donnée et d'affiner ainsi l'analyse :

- un indice d'« efficacité » de l'azote (EFF), égal au rapport entre les sorties et les entrées engendrées par le système de production considéré ;

- un indice de « conversion » de l'azote en protéines alimentaires (CVE), dont le principe est suggéré par certains auteurs [25], égal au rapport entre les sorties que l'on peut qualifier d'« utiles » (cultures, lait, viande, œufs) et les entrées mises en œuvre pour les produire ; ce coefficient diffère du précédent par la non prise en compte des déjections dans les sorties, les déjections sortant de l'exploitation ne pouvant être considérées comme une finalité agronomique mais plutôt comme un sous-produit dont l'agriculteur doit se débarrasser ; ce coefficient a une valeur égale au précédent dans les exploitations ne sortant pas de déjections ;

- un indice de « gaspillage » de l'azote (GAS) égal au rapport entre l'excédent engendré par l'activité de l'exploitation et les sorties « utiles » correspondantes ; ce coefficient traduit en fait la quantité d'azote excédentaire par kilogramme d'azote transformé en protéines alimentaires.

### 2.4. Enquêtes en exploitations agricoles

L'objectif de cette étude étant de préciser les flux d'azote et les excédents de quelques grands types d'exploitations agricoles, les exploitations n'ont pas été choisies au hasard. L'échantillonnage a été construit de manière dirigée selon deux critères principaux : le type de système de production

(grandes cultures, production laitières, ateliers porcins, etc.) et pour les seuls élevages laitiers, le mode de production (conventionnel, autonome et biologique). De ce fait, il est important de souligner que l'échantillon ne se veut pas représentatif de l'agriculture des régions où les enquêtes ont été effectuées mais représentatif des types d'exploitations choisis, les exploitations ayant été choisies au hasard dans chaque type défini a priori.

Les enquêtes ont été réalisées entre 1989 et 1994, dans 555 exploitations agricoles couvrant au total 28 690 hectares. Ces exploitations sont situées dans des régions présentant des contextes pédoclimatiques contrastés (Tab. I) : Bretagne, Normandie, Pays de la Loire, Piémont italien, le reste se répartissant entre le Nord, l'Est et le Centre de la France.

Les onze grands types d'exploitations agricoles retenus sont présentés dans le tableau I. En ce qui concerne les exploitations laitières, 3 modes de production ont pu être analysés : les exploitations conventionnelles dont le niveau d'intensification est très varié, classées en catégorie « divers » (Tab. II), les fermes « biologiques » répondant à un cahier des charges précis et les fermes « autonomes » où le choix stratégique de l'agriculteur est de réduire volontairement l'utilisation des engrais azotés en faisant appel aux associations graminées-légumineuses.

### 2.5. L'analyse des données

Un aspect important de ce travail consiste à mettre en évidence la variabilité de structure des exploitations étudiées ; notre point de vue étant fondamentalement multidimensionnel et les variables analysées quantitatives, l'Analyse en Composantes Principales (ACP) a été utilisée.

Une première ACP a été réalisée sur les 555 exploitations caractérisées par leurs assolements et leurs productions animales. L'objectif est ici d'identifier les principaux facteurs de variabilité des exploitations du point de vue de la structure de leur production et de contrôler que notre classification a priori en 11 types d'exploitation rend bien compte de ces facteurs. Dans une seconde ACP,

**Tableau I.** Répartition des exploitations enquêtées par région d'origine et par type.

Types d'exploitations	Code	Régions					Total
		Bretagne	Normandie	Pays Loire	Nord, Est et Centre	Piémont	
Grandes cultures	C	0	1	0	19	0	20
Cultures/viande bovine	CV	8	25	8	5	14	60
Ateliers avicoles et divers	DBC	5	6	3	2	0	16
Porcs	P	22	0	0	0	0	22
Porcs et divers	PD	18	7	0	5	0	30
Porcs/lait	PVL	19	7	0	1	0	27
Lait	VL	27	58	18	15	3	121
Viande bovine	V	1	13	3	0	7	24
Lait/grandes cultures	VLC	1	27	0	11	2	41
Lait/cultures/ viande bovine	VLCV	1	33	3	12	44	93
Lait/ viande bovine	VLV	7	36	8	9	41	101
Total		109	213	43	79	111	555

Remarque : voir liste des abréviations.

**Tableau II.** Caractéristiques moyennes des 11 grands types d'exploitations agricoles enquêtées.

	Assolement (% de la SAU)									Productions animales				
	NB	SAU	CER	MAG	OLP	MAE	PPE	PTE	LEG	AUT	PHA	USA	LSA	VHA
C	20	155	53	6	22	0	0	0	0	19	0	0,07	0	9
CV	60	61	25	11	6	16	14	2	8	18	0	1,39	13	930
DBC	16	42	18	18	4	23	9	12	1	15	0	1,04	4116	3970
P	22	42	41	47	3	0	0	4	0	5	133	0,02	0	12613
PD	30	34	25	15	3	19	8	15	4	11	46	0,82	1840	4908
PVL	27	40	17	5	0	29	5	35	1	8	35	1,47	6151	4060
VL	121	37	8	1	0	26	28	17	7	13	0	1,58	6339	235
<i>Bio.</i>	13	35	4	0	0	1	73	0	18	4	0	1,18	3143	168
<i>Aut.</i>	22	34	7	0	0	21	40	2	28	2	0	1,45	5645	235
<i>Div.</i>	86	38	8	1	0	33	15	23	1	19	0	1,70	7261	251
V	24	52	3	8	0	19	47	2	6	15	0	2,10	0	1477
VLC	41	65	23	4	3	19	26	5	4	16	0	1,03	4009	153
VLCV	93	61	19	10	2	22	21	1	12	13	0	1,73	5090	310
VLV	101	40	6	2	0	39	26	6	9	12	0	2,89	11426	491
MOY		51,5	16,7	7,4	2,5	23,3	20,8	8,6	7,2	13,5	9,5	1,63	5129	1446
ET		45,5	16,6	15,4	6,5	20,5	29,3	16,2	9,2	15,3	38,1	1,41	7161	3808

Remarque : Voir liste des abréviations ; MOY (moyenne), ET (écart-type), NB (nombre d'exploitations par type).

ces mêmes exploitations ont été analysées sous l'angle des composantes du bilan apparent. On cherche ici les principaux facteurs de variabilité de la structure de ce bilan. Dans une troisième ACP, on adopte le même point de vue mais en se restreignant aux 440 exploitations spécialisées en production bovine.

L'intérêt de l'ACP dans notre démarche est double [11] :

- identifier les principaux facteurs de variabilité des exploitations ; quelles sont les exploitations qui se ressemblent du point de vue de l'ensemble des critères ? Quelles sont celles qui diffèrent le plus ?

- fournir une représentation synthétique des corrélations entre variables ; quelles variables sont corrélées entre elles ? Lesquelles ne le sont pas ? Peut-on identifier des groupes de variables corrélées entre elles ?

Il a été nécessaire d'examiner la relation entre les composantes principales trouvées et une variable qualitative. Pour cela, à partir de la représentation des exploitations, on a figuré, pour chaque modalité de la variable qualitative, le centre de gravité des exploitations présentant cette modalité. Cette possibilité est offerte par le logiciel utilisé [35] pour traiter ces données.

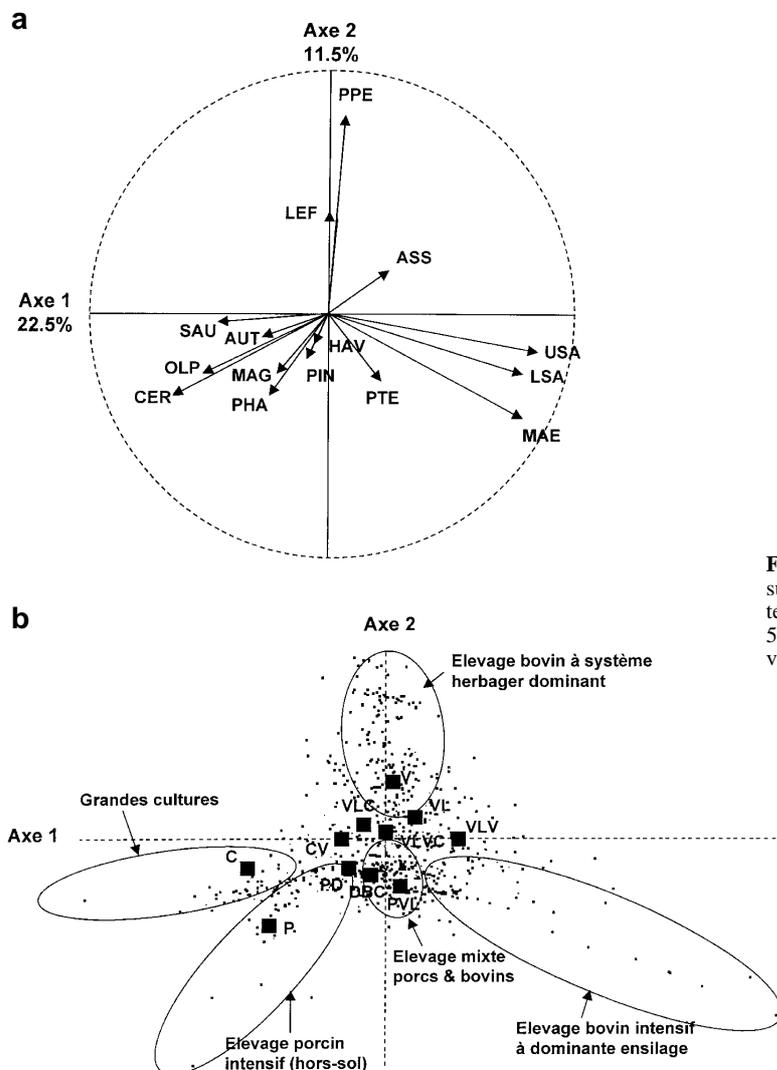
### 3. Résultats

#### 3.1. Caractéristiques principales des exploitations enquêtées

Les caractéristiques moyennes des 11 types d'exploitations retenus sont rassemblées dans le tableau II. Dans les fermes de grande culture (C) spécialisées dans la production de céréales et d'oléo-protéagineux, la SAU est en moyenne importante (155 ha). Dans les ateliers porcins spécialisés (P), le nombre de porcs produits annuellement par hectare est en moyenne élevé (133). Ces exploitations, de type naisseur-engraisseur, n'ont pas une structure homogène de leur cheptel ; elles présentent une proportion très variable de porcelets achetés. Les céréales produites occupent ici une

grande part de la SAU (88%) et sont toutes auto-consommées. Les exploitations spécialisées en production de lait (VL) ont une SAU en moyenne modeste (37 ha) quel que soit le choix stratégique des agriculteurs. Les 3 orientations (biologique, autonome et divers dont intensif) diffèrent par contre par le chargement (1,18 UGB·ha<sup>-1</sup> à 1,70), le niveau de production laitière (3143 à 7261 l·ha·SAU<sup>-1</sup>) et les assolements. On relève ainsi une forte disparité dans l'importance relative du maïs ensilage (0 à 33% de la SAU), de la prairie permanente (15 à 73%) et des cultures fourragères à base de légumineuses (1 à 28%). Dans les fermes associant la production de viande bovine à celle de lait, les chargements sont importants (2,89 UGB·ha·SAU<sup>-1</sup>) et le niveau des performances techniques de ces élevages est élevé. Les fortes productions laitières observées dans ces exploitations s'expliquent par la présence dans l'échantillon d'une proportion importante de fermes du Piémont italien où la production de fourrages, favorisée par les conditions climatiques locales, est très intensive et où l'utilisation de concentrés est importante.

La classification des exploitations agricoles en 11 grands types (Tab. II) déterminés a priori, est confortée par la typologie réalisée par une analyse en composantes principales sur le tableau des données rassemblant les caractéristiques des 555 exploitations. Les 15 variables actives retenues sont la SAU, la proportion de chaque culture dans la SAU (CER, MAG, MAE, OLP, PPE, PTE, PIN, LEF, ASS, AUT) et les productions animales (PHA, HAV, LSA, USA). Le plan principal représentant les variables (Fig. 1a) et les individus (Fig. 1b) individualise nettement les exploitations très spécialisées. L'axe principal exprime 22,5% de la variation totale des individus et l'axe 2, 11,5%. La part de l'information exprimée par les axes suivants est respectivement de 10,6% pour l'axe 3 et 8,8% pour l'axe 4, soit au total 53,3%. Ce plan principal permet de distinguer très nettement plusieurs groupes d'exploitations. L'axe 1 oppose les exploitations présentant une forte proportion de maïs ensilage dans la SAU, des chargements bovins élevés et les plus fortes productions laitières à l'hectare aux exploitations dont la SAU



**Figure 1.** Analyse en composantes principales sur le tableau des données rassemblant les caractéristiques de l'assolement et du cheptel pour les 555 exploitations : plan principal représentant les variables (a) et les individus (b).

est occupée en majorité par les céréales et les oléo-protéagineux. Cette première composante principale oppose ainsi les exploitations laitières intensives aux exploitations de grande culture. L'axe 2 est essentiellement corrélé à la place relative (en % SAU) des prairies permanentes qui s'oppose à celle du maïs ensilage. Il s'agit d'un axe traduisant le niveau d'intensification du système de culture. Il individualise les exploitations traditionnelles valorisant la production d'herbe ; à l'opposé se

trouvent les exploitations bovines et porcines les plus intensives. L'axe 3 (non représenté) individualise clairement les exploitations porcines très intensives caractérisées par une SAU moyenne et une production de maïs grain importante. Enfin, deux variables s'opposent nettement sur l'axe 4 (non représenté) : le taux de prairies temporaires (présentes en fermes bovines intensives) et celui des associations graminées-trèfle blanc (plus caractéristiques des exploitations autonomes et

biologiques). La classification opérée a priori est étroitement liée aux principaux facteurs de variabilité. Cette analyse valide a posteriori la classification initiale mais en la simplifiant en ramenant de 11 à 5 le nombre de types d'exploitations. On sépare ainsi nettement les exploitations spécialisées : fermes céréalières, les exploitations porcines et les exploitations bovines, ces dernières pouvant être soit très intensives, soit très extensives. Les autres types d'exploitations occupent une situation intermédiaire entre ces grands types, situation parfois bien identifiable (PVL) ou parfois plus diffuse (du moins pour les critères retenus) pour les autres exploitations mixtes comme le montre le nombre très important de fermes situées près de l'origine sur le premier plan factoriel.

### 3.2. Bilans de l'azote des 555 exploitations

#### 3.2.1. Approche globale des bilans

Les caractéristiques moyennes des divers flux d'azote observés pour les 11 types d'exploitations retenus et pour l'ensemble des 555 exploitations sont présentées dans le tableau III.

Tous types d'exploitations confondus, le solde du bilan de l'azote est nettement positif et s'élève à 184 kg·N·ha<sup>-1</sup>·an<sup>-1</sup>. Ce bilan présente une forte variabilité comme l'attestent la valeur élevée du coefficient de variation (95 %) et les valeurs extrêmes rencontrées : de -13 kg·N·ha<sup>-1</sup>·an<sup>-1</sup> en exploitation laitière biologique à 1630 kg·N·ha<sup>-1</sup>·an<sup>-1</sup> en exploitation porcine très intensive. En entrées, deux flux d'azote apparaissent

**Tableau III.** Composantes moyennes du bilan de l'azote (kg·N·ha<sup>-1</sup>·an<sup>-1</sup>) pour les 11 grands types d'exploitations agricoles retenus et pour l'ensemble des 555 exploitations.

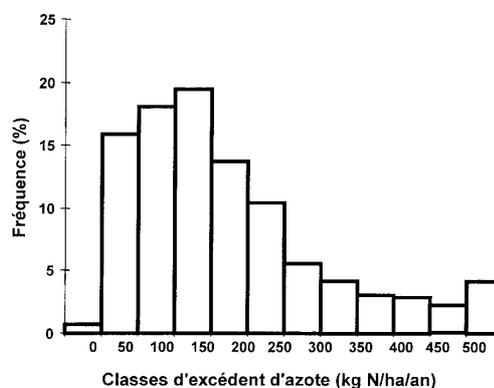
Type	ENTREES (kg·N·ha <sup>-1</sup> ·an <sup>-1</sup> )						SORTIES (kg·N·ha <sup>-1</sup> ·an <sup>-1</sup> )						BILAN		
	ENG	DEE	ALI	DIV	FIX	ANI	ENT	DES	VEG	LAI	VIA	OEU	SOR	BIL	ET
C	144	1	2	0	24	0	<b>171</b>	0	120	0	0,3	0	<b>120</b>	<b>51</b>	61
CV	99	8	43	0	15	5	<b>170</b>	2	45	0	22	0	<b>70</b>	<b>100</b>	80
DBC	109	0	390	1	7	6	<b>512</b>	30	34	23	114	34	<b>235</b>	<b>277</b>	131
P	78	0	1060	0	2	4	<b>1144</b>	292	8	0	303	0	<b>602</b>	<b>542</b>	373
PD	94	12	381	0	10	15	<b>512</b>	40	31	11	118	0	<b>199</b>	<b>313</b>	181
PVL	122	11	334	1	4	8	<b>479</b>	26	4	36	97	0	<b>163</b>	<b>316</b>	141
VL	118	5	53	0	20	1	<b>196</b>	1	4	36	6	0	<b>47</b>	<b>149</b>	91
Bio.	3	0	8	0	46	0	<b>57</b>	0	1	18	4	0	<b>23</b>	<b>34</b>	13
Aut.	83	11	43	0	48	0	<b>185</b>	0	2	32	6	0	<b>39</b>	<b>146</b>	57
Div.	153	5	66	0	9	1	<b>233</b>	1	5	42	6	0	<b>54</b>	<b>180</b>	81
V	77	0	64	0	18	14	<b>173</b>	0	0	0	36	0	<b>36</b>	<b>137</b>	129
VLC	107	3	36	0	16	1	<b>165</b>	0	36	22	4	0	<b>62</b>	<b>103</b>	59
VLCV	104	0	74	0	13	1	<b>191</b>	1	34	27	7	0	<b>69</b>	<b>122</b>	78
VLV	112	1	181	0	14	1	<b>310</b>	4	2	59	12	0	<b>76</b>	<b>234</b>	199
<b>MOY*</b>	<b>108</b>	<b>4</b>	<b>157</b>	<b>0</b>	<b>14</b>	<b>3</b>	<b>287</b>	<b>17</b>	<b>22</b>	<b>28</b>	<b>35</b>	<b>1</b>	<b>103</b>	<b>184</b>	
ET*	67	23	338	1	18	11	<b>339</b>	107	33	36	93	14	<b>193</b>	<b>174</b>	
CV(%)*	62	585	215	550	126	366	<b>118</b>	627	150	129	264	1410	<b>187</b>	<b>95</b>	
MINa*	0	0	0	0	0	0	<b>8</b>	0	0	0	0	0	<b>4</b>	<b>-13</b>	
MAXa*	472	460	4705	11	94	136	<b>4729</b>	1823	183	322	1276	2	<b>3099</b>	<b>1630</b>	

Remarque : Voir liste des abréviations ; MOY (moyenne), ET (écart-type), CV (coefficient de variation en %), MINa (minimum absolu), MAXa (maximum absolu). Les paramètres suivis de (\*) se réfèrent aux calculs effectués sur les 555 exploitations tous types confondus.

prépondérants : l'azote inhérent aux achats d'aliments pour les animaux ( $157 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ ) et celui relatif aux engrais minéraux ( $108 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ ). Comparativement, les divers flux d'azote apparaissant en sorties sont faibles. Ils sont tous inférieurs à  $35 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$  et ne représentent en totalité que le tiers des entrées. Les différents termes du bilan présentent une très forte variabilité comme le montre les valeurs extrêmes et le coefficient de variation de chacun d'eux. Le flux d'azote observé le plus important correspond à une entrée liée à un achat d'aliments en exploitation porcine ( $4705 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ ), valeur 10 fois plus élevée que la plus forte entrée inhérente aux engrais minéraux rencontrée en exploitation laitière intensive ( $460 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ ).

Seules 4 exploitations ont un solde du bilan négatif (soit 0,7 % de l'effectif enquêté). 17 % des exploitations ont un excédent inférieur à  $50 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ , 34 % inférieur à 100 et 67 % inférieur à 200. 9 % des exploitations ont un excédent supérieur à  $400 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$  (Fig. 2).

Les excédents d'azote moyens sont très disparates entre types d'exploitations : de  $51 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$  en grandes cultures à  $542 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$  en exploitations porcines intensives. Ce dernier chiffre suggère que les apports de lisiers étaient encore très importants sur les parcelles de ces exploitations lors de la réalisation des enquêtes (début des années 90). Les excédents sont en moyenne plus faibles pour les fermes où les cultures de vente ont une place plus importante ( $51$  à  $122 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$  pour les types C, CV, VLC, VLCV) que pour les autres types d'exploitations où les principales sorties sont liées à des produits animaux. Pour ces dernières, les exploitations avec ateliers hors-sol sont les plus excédentaires avec un solde supérieur à  $250 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$  (de 277 pour DBC à 542 pour P). Exception faite des fermes biologiques, les fermes bovines occupent une position intermédiaire : 137 à  $234 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ . En fermes spécialisées en production laitière où 3 sous-types ont pu être analysés, les excédents moyens varient de  $34 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$  en agriculture biologique à 180 en exploitations classées en catégorie « divers » dont les intensifs. En fermes laitières « autonomes » où l'excédent est intermédiaire



**Figure 2.** Histogramme des excédents d'azote ( $\text{kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ ) des 555 exploitations agricoles.

re ( $146 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ ), la baisse des entrées par les engrais ( $-70 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ ) y est pour partie compensée par une augmentation des entrées par la fixation ( $+39 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ ).

### 3.2.2. Analyse de la variabilité des excédents

#### 3.2.2.1. Analyse globale de la variabilité, tous types d'exploitations confondus

Les résultats précédents mettent en évidence une très grande variabilité des excédents d'azote tant entre types d'exploitations qu'au sein d'un même type, comme le montrent les écarts-types calculés (Tab. III). Afin de disposer d'une représentation synthétique de ces données, nous avons réalisé une ACP. Le tableau des données analysées comporte 555 individus, 11 variables explicatives (les termes du bilan présentés Tab. III) et 18 variables illustratives. Ces dernières qui ne participent pas à la construction des axes, rassemblent les caractéristiques de l'assolement, du système de production animale (15 variables décrites plus haut) et du bilan (ENT, SOR et BIL).

Le plan principal représentant les variables et les individus est présenté figure 3 (3a et 3b). L'axe principal exprime 26,3 % de la variation totale des individus et l'axe 2, 14,4 %. La part de variabilité exprimée par les axes suivants (Figs. 3c et 3d) est respectivement de 12,4 % pour l'axe 3 et 9,9 % pour l'axe 4, soit au total 63 %.



permanente et aux légumineuses fourragères. Cet axe distingue nettement les fermes bovines biologiques des fermes classées en catégorie divers, dont les exploitations intensives (Fig. 3b).

La figure 3a montre que le bilan est fortement corrélé à l'axe 1 et légèrement au second. Pour analyser plus finement cette variable nous l'avons subdivisée en 6 classes d'effectifs à peu près égaux. Les centres de gravité de ces classes sont représentés figure 3b. BIL1 correspondant à la classe de bilans les plus faibles et BIL6 à la classe de bilans les plus élevés. Pour les exploitations présentant les excédents d'azote les plus faibles (BIL1 à BIL4), le bilan est fortement corrélé à l'axe 2 ce qui signifie que le bilan est d'autant plus élevé que les achats d'engrais sont importants (le bilan s'accroît avec l'intensification laitière) ; pour celles qui présentent les bilans les plus élevés (BIL4 à BIL6), le bilan est corrélé à l'axe 1, le solde augmente avec les achats d'aliments pour les animaux (le bilan augmente alors avec la production de viande en hors-sol).

L'axe 3 oppose principalement 2 variables : LAI ( $r = 0,70$ ) et VEG ( $r = -0,69$ ). Cette composante oppose des exploitations où la principale sortie d'azote est soit une production végétale (grandes cultures), soit une production animale (le lait). Pour ces exploitations (grandes cultures et fermes bovines) où les sorties d'azote sont liées à une surface de production, **l'axe 3 distingue nettement productions végétales et productions animales**. Dans les premières, les excédents d'azote sont en général faibles, les sorties d'azote étant très importantes par les cultures de vente. Dans les secondes, les excédents sont plus élevés, les sorties d'azote par les produits animaux étant faibles en proportion. Rappelons qu'une tonne de viande correspond à 24 kg·N et 10 000 litres de lait à 55 [34].

### 3.2.2.2. Cas des 20 fermes de grandes cultures

Dans les exploitations de grandes cultures qui forment un groupe bien identifié (Fig. 1), l'excédent d'azote est en moyenne faible (51 kg·N·ha<sup>-1</sup>·an<sup>-1</sup>). Il est fortement corrélé aux entrées d'azote par les engrais minéraux (Tab. IV). Dans ces exploitations, le flux d'azote inhérent aux sorties par les cultures est fortement corrélé aux

**Tableau IV.** Matrice des corrélations entre variables brutes en exploitations de grandes cultures.

	SAU	OLP	ENG	FIX	VEG	BIL
SAU	1,00					
OLP	0,08	1,00				
ENG	0,14	-0,28	1,00			
FIX	-0,18	0,62	-0,14	1,00		
VEG	-0,15	0,43	0,07	0,70	1,00	
BIL	0,10	0,26	<b>0,74</b>	-0,14	-0,42	1,00

Remarque : voir liste des abréviations.

entrées par la fixation symbiotique ( $r = 0,70$ ). La corrélation entre ces deux variables, a priori surprenante, peut s'expliquer assez simplement par la place importante des légumineuses dans la SAU. Ces cultures qui présentent des teneurs en azote élevées, contribuent fortement aux sorties d'azote via les cultures de vente. Rappelons que 80 quintaux de blé représentent une sortie voisine de 145 kg·N, valeur faible en comparaison des légumineuses : 60 q de pois correspondent à 215 kg·N et 10 t de luzerne à environ 300 kg·N. Les sorties d'azote par les cultures ne sont pas corrélées aux entrées par les engrais ( $r = 0,07$ ).

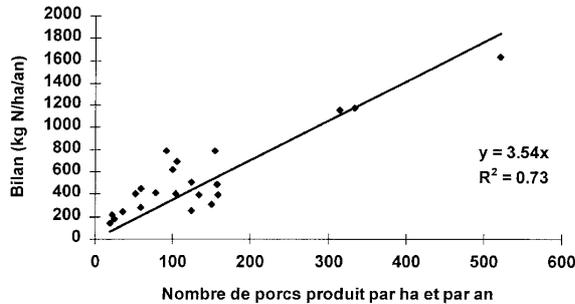
### 3.2.2.3. Cas des 22 exploitations spécialisées en production porcine

Ces exploitations qui correspondent également à un groupe bien individualisé (Fig. 1), se caractérisent par les excédents moyens les plus élevés (542 kg·N·ha<sup>-1</sup>·an<sup>-1</sup>). Deux variables entrant dans le calcul du bilan sont fortement corrélées à l'excédent (Tab. V) : les entrées d'azote par les aliments et les sorties par la viande. La très forte corrélation entre ces deux dernières variables révèle que la contribution de l'azote des végétaux auto-consommés (non intégré dans ALI) à l'alimentation des porcs est faible en valeur relative. Dans ce type d'exploitation, l'excédent d'azote est d'autant plus important que le niveau d'intensification est élevé : BIL est fortement corrélé au nombre de porcs produits par hectare et par an ( $r = 0,90$ ) comme le montre la figure 4. Ces exploitations se caractérisent par une grande variabilité des sorties d'azote par les

**Tableau V.** Matrice des corrélations entre variables brutes en exploitations porcines spécialisées.

	SAU	PHA	ENG	ALI	DES	VEG	VIA	BIL
SAU	1,00							
PHA	0,29	1,00						
ENG	0,13	-0,26	1,00					
ALI	0,12	0,93	-0,38	1,00				
DES	0,00	0,87	-0,40	0,96	1,00			
VEG	-0,24	-0,30	0,13	-0,36	-0,34	1,00		
VIA	0,12	0,94	-0,39	<b>1,00</b>	0,96	-0,36	1,00	
BIL	0,27	<b>0,90</b>	-0,19	<b>0,92</b>	0,79	-0,35	0,90	1,00

Remarque : voir liste des abréviations.



**Figure 4.** Nombre de porcs produits par hectare et par an et excédent d'azote (bilan en kg·N·ha<sup>-1</sup>·an<sup>-1</sup>) : 22 exploitations spécialisées dans l'élevage porcin.

déjections animales (DES). Si l'on considère la valeur des excédents avant la prise en compte de ces sorties (ce qui a pour effet d'éliminer la variabilité de gestion des effluents via les plans d'épandage), BIL+DES devient très fortement corrélé aux entrées par les aliments ( $r = 0,99$ ) comme le montre la figure 5. Cette figure montre clairement le poids particulier des aliments achetés dans ce type d'exploitation où les ateliers de production sont voisins du hors-sol.

#### 3.2.2.4. Cas des 440 exploitations à dominante bovine

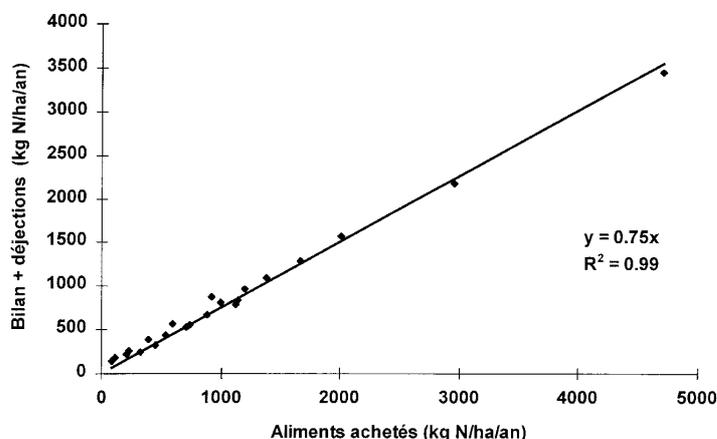
Ce sous-groupe est le plus important avec 440 fermes (V, VL, VLV, VLC, VLCV et CV). Il est très diversifié tant par la nature des produits

vendus que par le contexte pédo-climatique des exploitations et le choix tactique des exploitants du moins en production laitière. Les excédents moyens d'azote sont très variables (Tab. III).

L'analyse en composantes principales sur le tableau des données comportant 10 variables explicatives (les termes du bilan), 15 variables illustratives (les caractéristiques des exploitations et le solde du bilan) et 440 individus, met en évidence les principaux facteurs explicatifs de la variabilité observée sur l'excédent d'azote pour ces exploitations. Le plan principal est présenté figure 6 (6a et 6b). L'axe principal exprime 22,8 % de la variabilité totale des individus et l'axe 2, 16,3 %. La part de la variabilité exprimée par les axes suivants est respectivement de 12,6 % pour l'axe 3 et 10,9 % pour l'axe 4, soit au total 62,6 %.

Les flux d'azote les plus corrélés à l'axe 1 (Fig. 6a) sont les entrées par les aliments ( $r = -0,84$ ) et les engrais azotés minéraux ( $r = -0,58$ ), les sorties par le lait ( $r = -0,76$ ) et la viande ( $r = -0,45$ ), variables opposées aux entrées par la fixation symbiotique ( $r = 0,58$ ). L'axe 1 est un **axe d'intensification** qui oppose les exploitations à chargements élevés (USA) à forte production de lait (LSA) et de viande (VIA) aux exploitations extensives moins productives mais à excédents d'azote faibles. Le solde du bilan est très étroitement corrélé à cet axe ( $r = -0,90$ ).

L'axe 2 oppose quatre variables : les sorties d'azote par les cultures de vente ( $r = -0,51$ ) et la viande ( $r = -0,41$ ), ces dernières étant associées



**Figure 5.** Relation entre les entrées d'azote par les aliments achetés (en  $\text{kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ ) et l'excédent d'azote avant la sortie des déjections de l'exploitation (BIL+DES) : 22 exploitations spécialisées dans l'élevage porcin.

aux entrées par les animaux de remplacement ( $r = -0,50$ ), aux sorties par le lait ( $r = 0,59$ ). L'axe 2 est un **axe discriminant la spécialité de l'exploitation : lait ou viande (associée aux cultures de vente)**.

Les classes de bilans croissants (BIL1 à BIL6) figurées sur le plan principal (Fig. 6b), s'ordonnent parfaitement selon l'axe 1. Le solde du bilan augmente avec les niveaux d'intensification croissants tant en production de lait que de viande. Les exploitations laitières biologiques et autonomes figurent près des classes de bilans les plus faibles.

La figure 7 illustre la relation croissante entre niveau de production et excédent d'azote dans le cas des exploitations laitières spécialisées. Elle met en évidence une **grande variabilité de l'excédent pour un niveau de production donné**. Cette variabilité peut s'expliquer par la technicité de l'agriculteur. Dans un même contexte pédoclimatique, certains agriculteurs sont capables d'obtenir le même niveau de production laitière avec un excédent 3 à 4 fois moindre. Cette différence s'explique principalement par une meilleure gestion de la fertilisation azotée. Le contexte pédoclimatique module également l'excédent. Ainsi, dans les régions où la production fourragère est limitée du fait de contraintes particulières (comme une sécheresse estivale marquée dans les Pays de la Loire), l'agriculteur compense une moindre production fourragère par des achats d'aliments. L'excédent d'azote est de ce fait en moyenne plus

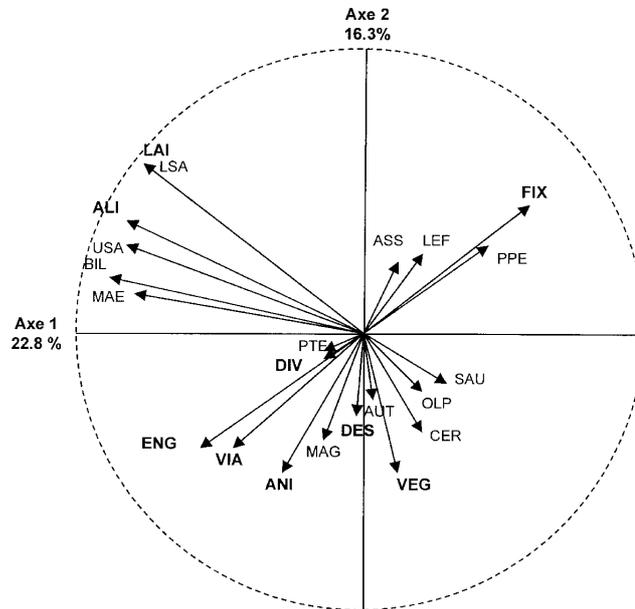
élevé pour un niveau de production laitière donné. On observe ainsi un décalage de potentiel polluant entre régions présentant des potentialités de production fourragère diversifiées.

### 3.3. Recherche d'indicateur de fonctionnement des exploitations

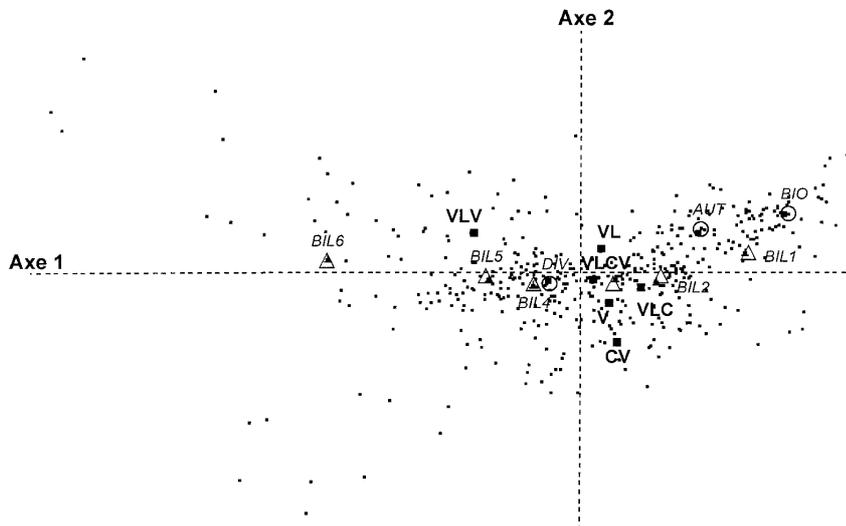
Le tableau VI présente les valeurs moyennes de trois indicateurs de fonctionnement calculables à partir des données disponibles dans la méthode du bilan apparent.

Ce tableau met en évidence que **les indices d'efficacité et de conversion** de l'azote sont en moyenne faibles : respectivement 35 et 34 % pour l'ensemble des exploitations. Ces deux paramètres varient dans de fortes proportions entre types d'exploitations agricoles : de 22 à 72 %. Ils sont nettement plus élevés dans les exploitations spécialisées en productions végétales que dans les exploitations spécialisées en productions animales. On peut ainsi remarquer que l'indice de conversion est de 72 % en grandes cultures et seulement de 22 à 28 % en exploitations orientées strictement vers l'élevage. Les fermes laitières biologiques dérogent à cette règle avec un indice plus élevé, égal à 44 %. Rappelons que dans ces dernières, les flux d'azote engagés sont faibles (Tab. III).

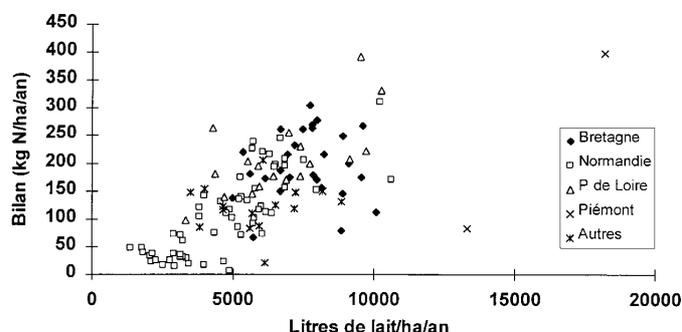
a



b



**Figure 6.** Analyse en composantes principales sur le tableau des données relatives aux bilans des 440 exploitations spécialisées en production bovine de lait et/ou de viande : plan principal représentant les variables (a) et les individus (b).  
**Remarque (figure 6b) :** BIL1 à 6 (classes croissantes de bilan N).



**Figure 7.** Relation entre niveau de production laitière (en litres de lait par hectare de SAU et par an) et excédent d'azote (bilan en  $\text{kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ ) : 121 fermes spécialisées en production laitière.

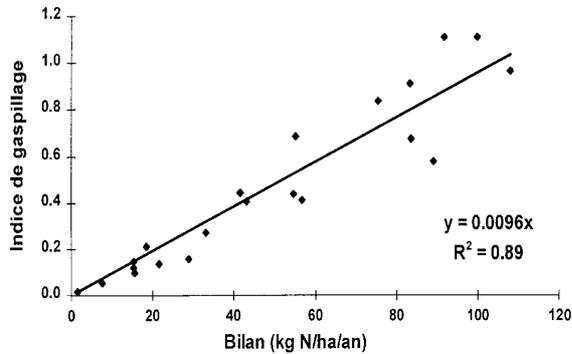
**Tableau VI.** Valeurs moyennes des indicateurs de fonctionnement par type d'exploitation enquêtée : excédents d'azote (BIL) et indices d'efficacité de l'azote (EFF), de conversion en produits utiles (CVE) et de gaspillage (GAS).

Type	Spéculation principale	BIL		EFF		CVE		GAS	
		MOY	ET	MOY	ET	MOY	ET	MOY	ET
C	Grandes cultures	51	0,21	0,72	0,21	0,72	0,21	0,48	2,22
CV	Grandes cultures + viande bovine	100	0,28	0,46	0,28	0,45	0,28	1,92	1,60
DBC	Atelier avicole + divers	277	0,18	0,43	0,18	0,40	0,15	1,78	1,13
P	Porcs	542	0,15	0,45	0,15	0,28	0,04	2,05	0,70
PD	Porcs + divers	313	0,11	0,36	0,11	0,31	0,09	2,36	1,10
PVL	Porcs + vaches laitières	316	0,12	0,33	0,12	0,28	0,06	2,56	0,88
VL	Vaches laitières	149	0,12	0,28	0,12	0,27	0,12	3,23	1,51
	bio. Biologiques	34	0,16	0,44	0,16	0,44	0,16	1,64	1,05
	aut. Autonomes	146	0,07	0,23	0,07	0,23	0,07	3,70	1,46
	div. Divers	180	0,08	0,24	0,08	0,24	0,07	3,57	1,36
V	Viande bovine	137	0,24	0,22	0,24	0,22	0,24	6,94	5,63
VLC	Vaches laitières + cultures	103	0,18	0,40	0,18	0,40	0,18	1,94	1,20
VLCV	Laitières + cult. + viande bovine	122	0,17	0,39	0,17	0,38	0,16	2,00	1,16
VLV	Laches laitières + viande bovine	234	0,12	0,26	0,12	0,26	0,12	3,53	1,62
	<b>Global</b>	<b>184</b>	<b>0,20</b>	<b>0,35</b>	<b>0,20</b>	<b>0,34</b>	<b>0,19</b>	<b>2,74</b>	<b>2,10</b>

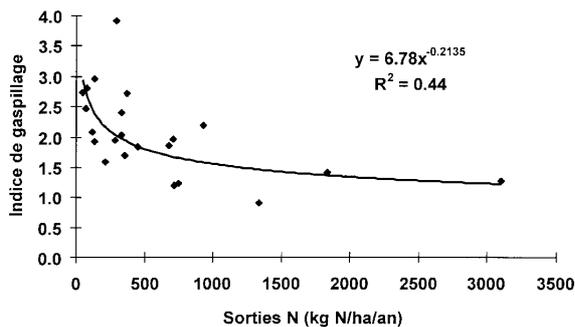
Remarque : voir liste des abréviations ; MOY (moyenne), ET (écart-type).

Le tableau VI met également en évidence que **l'indice de gaspillage** varie également dans de fortes proportions. Il est en moyenne de 2,74 kg d'azote excédentaire par kg d'azote transformé en protéines alimentaires. En moyenne, les indices les plus faibles sont observés en grandes cultures (0,48) et les plus élevés en exploitations d'élevage (2,05 à 6,94). Ces chiffres moyens ne doivent pas faire oublier une grande variabilité à l'intérieur de chaque type d'exploitation agricole. En fermes de grandes cultures, l'indice de gaspillage se caractérise par des valeurs faibles : 0 à 1,2. Sa valeur n'est

pas corrélée au niveau des sorties d'azote, ces dernières ne dépendant pas seulement de l'intensification des cultures mais aussi de l'importance des légumineuses dans l'assolement. Par contre, il augmente proportionnellement avec l'excédent d'azote (Fig. 8). L'amplitude de variation de cet indice est plus large en exploitations porcines (0,9 à 3,9). Sa valeur est ici étroitement liée aux sorties d'azote (Fig. 9). Il est d'autant plus faible que les sorties sont importantes. L'amplitude de variation de l'indice de gaspillage est très élevée en exploitations laitières (0 à 8,5). Cet indice n'est pas corrélé



**Figure 8.** Relation entre excédent d'azote (bilan en  $\text{kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ ) et indice de gaspillage : 20 exploitations de grande culture.



**Figure 9.** Relation entre sorties d'azote (en  $\text{kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ ) et indice de gaspillage : 22 exploitations porcines.

aux sorties d'azote donc au niveau de production laitière qui représente 77 % de ces dernières. On remarque ainsi que pour un niveau de sorties donné, l'indice de gaspillage varie dans de très fortes proportions. A niveau de production égal, certains agriculteurs gaspillent donc moins d'azote que d'autres.

#### 4. Discussion

Les résultats présentés ci-dessus montrent que la très grande majorité des exploitations enquêtées

engendrent des excédents d'azote : seules 2,5 % ont un solde voisin de 0 et 66 % un excédent supérieur à  $100 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ . L'approche du potentiel polluant par la méthode du bilan apparent a permis de mettre en évidence de fortes disparités entre types d'exploitations agricoles, les exploitations orientées vers l'élevage (P, PVL, PD, DBC, V, VL et VLV) ayant en règle générale des excédents d'azote plus importants que les exploitations de grande culture (C) ou de polyculture-élevage (CV, VLC et VLCV). Elle permet également de mettre en évidence une grande variabilité au sein d'un même type d'exploitation, comme cela a été souligné par Carlier et al. [4] en exploitations laitières. Si l'on excepte les exploitations laitières biologiques, les résultats montrent que les exploitations orientées vers l'élevage (porcs, bovins et volailles) se distinguent nettement des exploitations spécialisées en grande culture par le fait qu'elles sortent très peu d'azote alors qu'elles peuvent en consommer beaucoup. Cette différence est clairement mise en évidence par l'indice d'efficacité de l'azote qui est de 0,72 en grandes cultures, contre 0,22 à 0,45 pour les exploitations d'élevage. Cette disparité observée entre productions végétales et animales peut s'expliquer simplement. En production végétale, le coefficient réel d'utilisation de l'azote des engrais minéraux est le plus souvent compris entre 40 et 60 % [22]. En production animale, l'efficacité de l'azote est nettement plus faible : selon le régime alimentaire distribué, 20 à 30 % de l'azote ingéré par une vache laitière sont retrouvés au niveau du lait [26] ; 30 à 40 % de l'azote ingéré par les porcs sont retenus dans les protéines corporelles [10]. Le coefficient de conversion, suggéré par certains auteurs [25] traduit bien cette différence entre productions végétales et animales. Ainsi, dans les exploitations où l'azote est transformé en protéines animales, les excédents sont en règle générale élevés si les quantités mobilisées pour les produire sont importantes. Cette moins bonne conversion par l'animal est moins défavorable aux systèmes alternatifs orientés vers l'élevage car ils mobilisent peu d'azote. Ainsi pour les exploitations laitières « biologiques » où les flux d'azote sont faibles et où le coefficient de conversion de l'azote est en moyenne élevé (44 %), les potentiels polluants

figurent parmi les plus faibles observés. Ce résultat qui montre l'intérêt environnemental des systèmes alternatifs, ne condamne pas pour autant l'intensification, certaines exploitations très productives ayant un potentiel polluant moyen. La variabilité des résultats observés tant sur les bilans que sur les indices de conversion de l'azote, suggère même que certains agriculteurs disposent d'une marge de manœuvre importante pour diminuer leur potentiel polluant, sans pour autant remettre en cause leur système de production (Fig. 7).

Pour les valeurs les plus faibles du bilan (0 à 200 kg·N·ha<sup>-1</sup>·an<sup>-1</sup>), l'excédent est étroitement corrélé aux entrées par les engrais minéraux et pour les valeurs les plus élevées (> 200 kg·N·ha<sup>-1</sup>·an<sup>-1</sup>), il est fortement corrélé aux entrées d'azote par les aliments. L'analyse oppose ainsi nettement deux grands modes de production en agriculture quant à leur impact global sur l'environnement : ceux qui sont liés à une surface, à base de cultures de vente et/ou de fourrages produits sur l'exploitation, transformés ensuite en lait ou viande, et ceux qui sont indépendants de la surface où les animaux sont principalement nourris avec des aliments achetés, certaines fermes bovines très intensives étant proches de ce dernier type. Ces deux grands types se distinguent également quant à leur propension à gaspiller l'azote. Pour les premiers (grandes cultures, lait, viande bovine), le gaspillage est d'autant plus important que les excédents sont élevés. Pour les seconds (exploitations avec atelier hors sol), le gaspillage tend à diminuer avec les excédents croissants.

Ainsi, en exploitations porcines, la relation observée (Fig. 9) entre l'indice de gaspillage et les sorties d'azote, suggère que plus l'exploitation est intensive, plus elle est techniquement performante et moins le gaspillage d'azote est important. Il n'en demeure pas moins que ces exploitations présentent les plus forts excédents. Pour celles qui présentent des excédents relativement plus faibles, l'indice de gaspillage est très variable ce qui traduit vraisemblablement une plus grande variabilité des performances techniques des agriculteurs et suggère pour certains des améliorations techniques possibles. En exploitations laitières où les sorties d'azote proviennent majoritairement du lait, le

coefficient de gaspillage varie dans de très fortes proportions pour un même niveau de sorties. Il apparaît ici clairement qu'il existe une forte marge de diminution de l'impact polluant de certaines exploitations, diminution qui ne remet pas en cause tout le système de production. Les résultats présentés plus haut montrent que pour ce type d'exploitation, cette amélioration devrait passer par une meilleure gestion de la fertilisation azotée.

La variabilité de l'excédent d'azote pour un niveau d'intensification donné met également en relief les limites de références normatives pour certains types d'élevages. Par exemple, en exploitations laitières, pour un même niveau de production de lait (Fig. 7), le potentiel polluant est variable non seulement entre exploitations d'une même région mais aussi entre exploitations situées dans des contextes pédoclimatiques différents. Dans ces fermes où les aliments destinés aux animaux sont produits en grande partie sur l'exploitation, la satisfaction des besoins alimentaires du troupeau peut être limitée par les potentialités du milieu et conduire à l'achat de fourrages de complément pour atteindre un objectif de production donné. Il peut en résulter des différences significatives de potentiel polluant. On conçoit ainsi les limites de normes basées sur des critères de production (ou de chargement) applicables à une échelle géographique trop large.

Les résultats présentés dans cet article montrent que les origines du risque pour l'environnement des exploitations agricoles sont multiples : achats d'aliments dans les exploitations avec ateliers hors sol et engrais azotés minéraux dans les exploitations bovines. Cette étude conforte les diverses voies qui sont actuellement explorées pour réduire les excédents d'azote dans ces deux grands types d'exploitations.

Pour les premières, une réduction des entrées d'azote par les aliments peut être envisagée de deux manières mais avec des effets et des niveaux de contrainte différents : en limitant drastiquement les densités animales comme le conseillait Coppenet [6], solution qui a le mérite de régler le problème à la base mais qui pose d'énormes problèmes (économiques et politiques) ; en modifiant

la stratégie d'alimentation ou les performances des animaux [10, 26] de manière à limiter leurs rejets azotés, mais la marge d'amélioration ainsi permise est limitée. Pour ces exploitations où une diminution des excédents par une simple réduction des intrants via les aliments semble limitée ou irréaliste, l'amélioration passe par une meilleure gestion des déjections animales [12] : utilisation sur l'exploitation, échange avec des tiers (banques de lisiers, plans d'épandage), traitement.

Pour les secondes, la maîtrise de la fertilisation azotée est la voie la plus efficace et la plus immédiate pour diminuer leur potentiel polluant [19, 30]. Cette amélioration passe par une meilleure connaissance des productions permises par le pédo-climat (notamment en prairie pâturée) et donc des besoins réels des cultures.

Dans son développement actuel, la méthode du bilan apparent ne permet pas de préciser le devenir du surplus d'azote et de préciser sa répartition entre l'atmosphère via les rejets d'ammoniac, d'oxyde d'azote ou d'azote gazeux [1, 23], les eaux via les pertes de nitrate et d'ammonium par lixiviation et ruissellement [24, 29] et le sol via les résidus d'azote minéral ou le stockage sous forme organique [3, 21, 27]. Cette restriction limite la portée pratique de cette méthode puisqu'il n'est pas possible de fixer des valeurs seuils de l'excédent à ne pas dépasser. En effet, un même niveau d'excédent peut être obtenu à partir de flux d'azote notablement différents avec pour conséquences des devenirs diversifiés. Néanmoins, on peut prévoir grossièrement l'importance relative des différents flux, selon le type de production. Ainsi, en production végétale le surplus est déjà en grande partie dans le sol : il peut alors y rester sous forme minérale, y être organisé ou lixivié. Par contre en production animale, le surplus d'azote se retrouve majoritairement dans les déjections qui sont stockées (ou non) puis utilisées comme fertilisant ; dans ce cas, une partie importante du surplus est perdue par volatilisation lors du stockage et de l'épandage des déjections [23], le reste se retrouvant dans le sol avec un devenir fonction des formes d'azote en présence, différentes selon le

mode de conservation [9]. L'impact d'un même niveau d'excédent sur l'environnement pourra donc être très variable.

## 5. Conclusion

Les résultats présentés ci-dessus n'ont pas pour objectif de donner une image représentative de l'impact polluant de l'ensemble des exploitations agricoles. Ils apportent par contre des informations nouvelles sur les flux d'azote, les excédents qui en résultent et leur variabilité pour quelques grands types de systèmes de production agricoles parmi lesquels figurent ceux qui posent problème en terme d'impact sur l'environnement : production porcine, production laitière, grandes cultures et certains systèmes mixtes.

Parmi les outils de diagnostic existants, la méthode du bilan apparent et les divers indices qui en constituent le prolongement, se révèlent être des outils particulièrement intéressants, simples à mettre en œuvre et donnant des informations objectives sur les problèmes inhérents à une exploitation donnée. Néanmoins, dans le développement actuel de cette méthode, il n'est pas possible de fixer des valeurs seuils de l'excédent à ne pas dépasser, un même niveau d'excédent pouvant avoir des effets environnementaux différents. Préciser le devenir de l'excédent d'azote est donc une des perspectives de recherche prioritaire ouverte par cette étude.

**Remerciements :** Les auteurs tiennent à remercier toutes les personnes qui ont contribué à mener à bien ce travail en particulier celles qui ont participé au travail d'enquête sur le terrain auprès de plus de 600 agriculteurs (Chambres d'Agriculture des régions concernées, collègues INRA du Service d'Aide au Développement et du Département d'Agronomie, Agence de Bassin Seine-Normandie). Ce travail a reçu l'appui financier de l'INRA dans le cadre de l'A.I.P « Eau » animée par C. Riou et de la C.E.E. dans le cadre du Contrat « CAMAR » coordonné par J. Salette.

## Références

- [1] Amberger A., Ammonia emissions during and after land spreading of slurry. In "Odour and ammonia emissions from livestock farming", Nielsen V.C., Voorburg J.H., L'Hermite P. (Eds.), Elsevier, 1990, pp. 126-140.
- [2] Benoit M., Un indicateur des risques de pollution azotée nommé BASCULE, *Fourrages* 129 (1992) 95-110.
- [3] Bristow A.W., Jarvis S.C., Effects of grazing and nitrogen fertilizer on the soil microbial biomass under permanent pasture, *J. Sci. Food Agric.* 54 (1991) 9-21.
- [4] Carlier L., Vergruggen I., Van Bockstaele E., Nitrogen balances as measuring instrument on cattle farming husbandry, *Proc. COST 814 Workshop, Gembloux*, Ed. E. François, 1992, pp. 37-38.
- [5] Coppenet M., L'épandage du lisier de porcherie : ses conséquences agronomiques, *Ann. Agron.* 25 (1974) 403-423.
- [6] Coppenet M., Bilan des éléments fertilisants sur les exploitations d'élevage, *Fourrages* 62 (1975) 119-132.
- [7] Coppenet M., Bilan des éléments fertilisants dans les exploitations d'élevage : application à la fertilisation raisonnée, *Techniques Agricoles* 1315 (1985) 12 p.
- [8] Coppenet M., Golven J., Simon J-C., Le Corre L., Le Roy M., Evolution chimique des sols en exploitations d'élevage intensif : exemple du Finistère, *Agronomie* 13 (1993) 77-83.
- [9] Dalgaard T., Halberg N., Kristensen S., Can organic farming help to reduce N losses?, In : *Nutrient Cycling in Agroecosystems* A. Mosier et al. (Eds.), 52 (1998) 277-287.
- [10] Dourmad J.Y., Henry Y., Influence de l'alimentation et des performances sur les rejets azotés des porcs, *Prod. Anim.* 7 (1994) 263-274.
- [11] Escofier B., Pagès J., *Analyses factorielles simples et multiples*, 3<sup>ème</sup> édition, Dunod, Paris, 1998.
- [12] Farrugia A., Simon J.C., Déjections et fertilisation organique au pâturage, *Fourrages* 139 (1994) 231-253.
- [13] Grignani C., Acutis M., Assessment of mineral and organic balance in North-Western Italy dairy and beef cattle farms, *Proc. European Society of Agronomy Congress, Padova*, 1994, pp. 700-701.
- [14] Grignani C., Influenza della tipologia di allevamento e dell'ordinamento culturale sul bilancio di elementi nutritivi di aziende padane, *Riv. Agron.* 30 (1996) 414-422.
- [15] Hébert J., La fertilisation azotée du blé tendre d'hiver, *Bull. Tech. Inf.* 244 (1969) 755-766.
- [16] Hénin S., Rapport du groupe de travail « activités agricoles et qualité des eaux », N° ISBN 2.11.084504.X, Tome 1, 1980 (a), Ed. Ministères de l'Agriculture et de l'Environnement.
- [17] Hénin S., Rapport du groupe de travail « activités agricoles et qualité des eaux », N° ISBN 2.11.084504.X, Tome 2, 1980 (b), Ed. Ministères de l'Agriculture et de l'Environnement.
- [18] Jarvis S.C., Nitrogen cycling and losses from dairy farms, *Soil Use Manage.* 9 (1993) 99-105.
- [19] Jarvis S.C., Wilkins R.J., Pain B.F., Opportunities for reducing the environmental impact of dairy farming managements: a systems approach, *Grass Forage Sci.* 51 (1996) 21-31.
- [20] Lemaire G., Nicolardot B., Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes, INRA-Editions, Versailles « Les Colloques » (83), 1997.
- [21] Loiseau P., Decau M.L., Minéralisation et organisation de l'azote dans les sols prairiaux estimées à partir des données de marquage <sup>15</sup>N des parties aériennes à la récolte, in: *Utilisation des isotopes stables pour l'étude du fonctionnement des plantes*, INRA-Editions, Versailles « Les Colloques » (70), 1995, pp. 299-314.
- [22] Machet J.M., Pierre D., Recous S., Remy J.C., Signification du coefficient réel d'utilisation et conséquences pour la fertilisation azotée des cultures, *C. R. Acad. Agric. Fr.* 73 (1987) 39-55.
- [23] Moal J.F., Martinez J., Guizieu F., Coste C.M., Ammonia volatilization following surface-applied pig and cattle slurry in France, *J. Agric. Sci.* 125 (1995) 245-252.
- [24] Muller J.C., Trente ans de lysimétrie en France (1960-1990), INRA-Editions, Versailles « Un Point Sur », 1996.
- [25] O.C.D.E., Indicateurs environnementaux pour l'agriculture, Ed. O.C.D.E., 1997.
- [26] Peyraud J.L., Vérité R., Delaby L., Rejets azotés chez la vache laitière : effet du type d'alimentation et du niveau de production des animaux, *Fourrages* 142 (1995) 131-144.
- [27] Recous S., Nicolardot B., Simon J.-C., Le cycle de l'azote dans les sols et la qualité des eaux souterraines, in: *L'eau et l'espace rural*, INRA-Editions, Versailles, « Mieux Comprendre », 1997, pp. 193-215.

[28] Riou C., Bonhomme R., Chassin P., Neveu A., Papy F., L'eau dans l'espace rural : production végétale et qualité de l'eau, Ed. INRA, « Mieux Comprendre », 1997.

[29] Ryden J.C., Ball P.R., Garwood E.A., Nitrate leaching from grassland, *Nature* 311 (1984) 50-53.

[30] Salette J., Decau M.L., Simon J.-C., Good agricultural practices: some prospects for grassland and forage systems, CEC Workshop on "Scientific basis for codes of good agricultural practices", Bruxelles, Ed. V.W.L. Jordan, N°ISSN 1018-5593, 1993, pp. 69-78.

[31] Sébillotte M., Meynard J.M., Système de culture, système d'élevage et pollution azotée, in: R. Calvet (Ed.), Nitrate, agriculture et eau, INRA-Editions, Versailles 1990, pp. 289-312.

[32] Simon J.-C., Le Corre L., Le bilan apparent de l'azote à l'échelle de l'exploitation agricole : méthodologie, exemples de résultats, *Fourrages* 129 (1992) 79-94.

[33] Simon J.-C., Le Corre L., Vertès F., Nitrogen balances on a farm scale: results from dairy farms in

north west France, Proceedings of the 15th General Meeting of European Grassland Federation, Wageningen, 1994, pp. 429-433.

[34] Simon J.-C., Bilan des éléments fertilisants en exploitations d'élevage, *Techniques Agricoles* 1315 (1995) 13p.

[35] SPAD, Système portable pour l'analyse des données, Logiciel diffusé par CISIA, 1 av Herbillon, F-94160 Saint-Mandé, 1998.

[36] Verstraten F., Dairying in the Netherlands and the new environmental constraints, *Fourrages* 144 (1995) 169-180.

[37] Vertès F., Simon J.-C., Decau M.L., Le Corre L., Les flux d'azote au pâturage : II - Etude des flux et de leurs effets sur le lessivage, *Fourrages* 151 (1997) 263-280.

[38] Vivier M., Les prairies permanentes du Bessin et du Pays d'Auge, Thèse de l'Université de Caen, France, 1971.