

# Bilan apparent d'azote à l'échelle de différents types d'exploitations agricoles de la région du Souss-Massa

A. MIMOUNI<sup>1</sup>, A. WIFAYA, F. MOKRINI, R. BOUHARROUD, Y. KARRA, F. ELAME

(Reçu le 11/03/2019; Accepté le 27/09/2019)

## Résumé

Afin de disposer d'informations et de données sur le bilan d'azote de différents types d'exploitations agricoles de la région du Souss-Massa, la méthode du bilan apparent a été utilisée dans cette étude. Les termes du bilan sont exprimés par hectare de surface Agricole Utile (SAU) à travers la différence entre la Somme des Entrées (kg N/ha/an) et la Somme des Sorties (kg N/ha/an). Les bilans des différents systèmes de cultures ont montré une différence très hautement significative entre eux. De même, les excédents (bilans) d'azote moyens sont très disparates entre types d'exploitations allant de 23 kg N/ha/an en céréaliculture extensive associée au maraîchage vivrier à 1026 kg N/ha/an pour le système caractérisé par le maraîchage intensif diversifié (tomate, melon, haricot vert, poivron, concombre) ainsi que le système composé de bananier et du maraîchage intensif diversifié (tomate, pastèque, melon) qui ont enregistré chacun un excédent en azote élevé (environ 1000 kg N/ha/an). Les systèmes caractérisés par une monoculture intensive de tomate sous-serre, les agrumes et le maraîchage intensif diversifié, sont similaires et ont enregistré un excédent moyen de l'ordre de 270 kg N/ha/an. Le bilan azoté est fortement corrélé aux entrées ( $r = 0,98^{***}$ ) et aux sorties ( $r = 0,94^{***}$ ). Les résultats ont aussi montré que l'utilisation des engrais azotés et l'irrigation non raisonnées reste le principal facteur déterminant dans la pollution nitrique de la nappe, vu que le surplus en azote est généralement lessivé des sols sableux de faible capacité de stockage.

**Mots clés:** Bilan d'azote, systèmes de culture, fertilisation azotée et pollution nitrique.

## Nitrogen apparent balance at the farm level in the Souss-Massa region (Morocco)

### Abstract

In order to have information and data on nitrogen balance of different types of farms in the region of Souss-Massa (Morocco), the apparent balance method was used in this study. The terms of the balance are expressed on per hectare basis of cropped agricultural land using the difference between the Sum of Inputs (kg N/ha/year) and the Sum of Outputs (kg N/ha/year). The balance of the different cropping systems showed a very highly significant difference between them. The average nitrogen surpluses (balances) are very disparate between farm types ranging from 23 kg N/ha/year in extensive cereal farming associated with vegetables and 1026 kg N/ha/year for the system characterized by diversified intensive vegetables (tomato, melon, green bean, pepper, cucumber) as well as the mixed system of banana and diversified intensive vegetables (tomato, watermelon, melon) having each one a high nitrogen surplus (about 1000 kg N/ha/year). The systems characterized by a monoculture of intensive tomato greenhouse production, citrus and diversified intensive vegetables, are similar and had an average surplus of 270 kg N/ha/year. The nitrogen balance is strongly correlated with inputs ( $r = 0.98^{***}$ ) and outputs ( $r = 0.94^{***}$ ). The results also showed that the use of nitrogen fertilizers and unsustainable irrigation remains the main determining factor in aquifer nitrate pollution as nitrogen surplus is generally leached on sandy soils of low storage capacity.

**Key words:** Nitrogen balance, cropping systems, nitrogen fertilization and nitrate pollution.

## INTRODUCTION

Depuis quelques décennies, de très nombreuses régions du monde connaissent une augmentation de la concentration en nitrates des eaux souterraines. Cette pollution pose un problème d'ordre sanitaire lorsque les eaux contaminées par les nitrates sont utilisées pour les besoins alimentaires. C'est ainsi qu'une norme pour la potabilité des eaux est fixée par l'OMS à 50 mg/l de  $\text{NO}_3^-$ .

D'après Mariotti (1998), les nitrates qui polluent les nappes aquifères résultent des nombreuses années de fertilisation. En effet, pour la nappe aquifère de la Brie en France, les pertes en azote dans le sol étaient un processus continu dans le temps. Dans cette région, malgré la maîtrise par les agriculteurs de la fertilisation azotée, la teneur nitrique était de 35 mg/l sur une durée d'environ 50 années. En Allemagne, Bokman et Olf (1990) ont montré qu'environ 80% des quantités de nitrates trouvées dans les eaux polluées proviennent de l'utilisation agricole des sols.

D'après Bel *et al.*, (1999), l'origine de la pollution par les nitrates réside dans les interactions entre les différents éléments du système de culture. Les facteurs impliqués sont d'ordre climatiques (précipitation ou irrigation, températures, évapotranspirations), agrologiques (propriétés physico-chimiques, hydrodynamiques et microbiologiques des sols) et agronomiques (type de culture, rotations culturales, travaux culturaux, pratique de fertilisation, couverture végétale, profondeur d'enracinement). Selon les études réalisées sur la pollution nitrique des différents systèmes de culture, Prevost (1991) a pu conclure qu'un hectare en horticulture, particulièrement les cultures maraîchères, est souvent plus polluant que les autres systèmes de cultures.

Dans la région du Souss-Massa, les systèmes de cultures sont très diversifiés allant de l'extensif au très intensif. Dans ces différents systèmes, les pratiques agricoles sont diverses et leurs conséquences sur la gestion de l'azote serait seraient très différentes.

<sup>1</sup> Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), UR-Production Intégrée des Cultures, Agadir, Maroc

La méthode du bilan apparent de l'azote à l'échelle de l'exploitation agricole est un outil important dans l'appréciation de la contribution de chaque système de culture à la génération d'excès en azote (Simon et Le Corre, 1992). Cette méthode 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.

Afin de disposer d'informations et de données sur un ensemble plus large d'activités agricoles, différents systèmes de productions ont été pris en compte en considérant des exploitations très intensives à des fermes à systèmes de production très extensifs.

Les principaux objectifs de cette étude sont:

- Préciser la nature et la variabilité des composante du bilan azoté des différents systèmes de culture ainsi que les soldes correspondants, ce qui permettra de disposer d'éléments de diagnostic intéressants sur les excédents rencontrés dans les exploitations agricoles intensives;
- Analyser les facteurs de variation de l'excédent d'azote;
- 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 agricole donné.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### La méthode du bilan apparent

La méthode du bilan apparent utilisée dans cette étude est celle qui prend en compte l'exploitation dans sa globalité (Simon et Le Corre, 1992, Simon *et al.*, 1994, Simon *et al.*, 2000).

Dans cette étude, la détermination du bilan apparent de l'azote à l'échelle d'une exploitation agricole repose sur le calcul des entrées et des sorties du système que constitue l'exploitation. Ce bilan est dressé pour deux campagnes agricoles données (2010/2011 et 2015/2016). Les informations nécessaires à ce calcul sont recueillies par une enquête complétée par des estimations pour des composantes non disponibles pour quelques exploitations (exportation de quelques cultures). 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).

$$\text{Bilan (kg N/ha/an)} = [\text{Somme des Entrées (kg N/ha/an)}] - [\text{Somme des Sorties (kg N/ha/an)}]$$

Les entrées d'azote sont estimées à partir des achats d'engrais azotés, des fumiers et d'entrées diverses comme l'azote provenant de l'eau d'irrigation.

$$\text{ENT (kg N/ha/an)} = \text{ENG} + \text{FUM} + \text{DIV}$$

(ENT = Entrées, ENG = Engrais azotés minéraux, FUM = azote du fumier acheté et DIV = azote de l'irrigation).

De la même façon, les sorties sont estimées à partir des produits végétaux évacués de l'exploitation (vendus et déchets de cultures).

$$\text{SOR (kg N/ha/an)} = \text{VEG (VEG= UTI + DEC)}$$

(SOR = Sorties, VEG = végétaux vendus et déchets de cultures, UTI = Produits vendus et DEC = Déchets de cultures).

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 (OCDE, 1997).

### Les 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 qui permettront d'affiner plus l'analyse (Simon *et al.*, 2000). Il s'agit:

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

$$\text{EFF} = \text{SOR/ENT}$$

- D'indice de «conversion» de l'azote en protéines alimentaires (CVE), dont le principe est suggéré par certains auteurs (OCDE, 1997), égal au rapport entre les sorties que l'on peut quantifier d'«utiles» (UTI) (produits de cultures) et les entrées mises en œuvre pour les produire. Ce coefficient diffère du précédent par la non prise en compte des déchets de cultures sortants de l'exploitation ou détruites. Ces déchets de cultures ne pouvant être considérées comme une finalité agronomique mais plutôt comme sous-produits dont l'agriculteur doit se débarrasser; ce coefficient a une valeur égale au précédent dans les exploitations ne sortant pas de déchets de cultures.

$$\text{CVE} = \text{UTI/ENT}$$

**Tableau 1: Différentes caractéristiques des types de systèmes de cultures choisis dans la plaine région du Souss-Massa**

Type de système	Caractéristiques
Type 1	Monoculture intensive de tomate sous-serre
Type 2	Maraîchage intensif diversifié (tomate, melon, haricot vert, poivron, concombre...)
Type 3	Bananier et maraîchage intensif diversifié (tomate, pastèque, melon...)
Type 4	Monoculture intensive du bananier seul
Type 5	Monoculture intensive d'agrumes seuls
Type 6	Agumés et maraîchage intensif diversifié (pomme de terre, haricot vert)
Type 7	Céréaliculture (surtout le blé tendre rare le blé dure) avec quelques irrigations de pointes en association avec du maraîchage intensif de saison (pomme de terre, tomate...).
Type 8	Céréaliculture (surtout l'orge et le blé tendre) en bour en association avec du maraîchage extensif vivrier de saison (choux-fleur, laitue, persil, artichaut...).

• D'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.

$$\text{GAS} = \text{BIL}/\text{UTI} \quad (\text{BIL} = \text{Bilan})$$

### Les 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, celles-ci n'ont pas été choisies au hasard. L'échantillonnage a été construit de manière dirigée selon le type de système de production (cultures intensives et extensives). De ce fait, il est important de souligner que l'échantillon ne se veut pas représentatif de l'agriculture de région du Souss-Mass mais représentatif des différents types d'exploitation choisis, les exploitations ont été choisies au hasard dans chaque système de culture. Dans cette étude, huit (8) types de systèmes de culture ont été choisis et dans chacun 8 exploitations ont été tirées au hasard. Les caractéristiques des 8 types de système de culture sont présentées dans le tableau 1.

### Les analyses statistiques

Une analyse de la variance et le test de Newman et Keuls pour déterminer les groupes homogènes avec un seuil de probabilité de 5% ont été effectués. Des corrélations entre les différents paramètres ont été faites à l'aide du Logiciel COSTAT.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

### Caractérisation des types de système de cultures

Les entrées et les sorties totales et «utiles» d'azote, comptent parmi les principales caractéristiques des différents systèmes de culture choisis. En effet, ces trois paramètres traduisent d'une manière générale le fonctionnement des pratiques culturales dans chaque exploitation.

L'analyse de la variance et la classification de ces caractéristiques en groupes homogènes sont présentées dans le tableau 2.

Dans le tableau 2, les entrées des différents systèmes de culture diffèrent d'une manière très hautement significative d'un système par rapport à un autre. En effet, aucun système de culture ne ressemble à l'autre. Cette analyse valide la classification initiale choisie lors de l'échantillonnage de départ des différents types de systèmes de culture. Le système 3 (bananier et maraîchage intensif diversifié, tomate,

pastèque, melon...) est un système présentant une entrée très élevée par rapport aux autres systèmes de culture avec en moyenne une entrée avoisinant les 2300 kg N/ha/an. Ce système est suivi par type 2 (maraîchage intensif diversifié, tomate, melon, haricot vert, poivron, concombre...) ayant enregistré une entrée moyenne de l'ordre de 2091 kg N/ha/an. A partir de ce système de culture, les entrées ont chuté nettement pour passer à environ 1200 kg N/ha/an pour le système de culture 4 (monoculture intensive du bananier seul). Enfin, le système 8 (céréaliculture, surtout l'orge et le blé tendre, en bour en association avec du maraîchage extensif vivrier de saison, choux-fleurs, laitue, persil, artichaut...) qui a enregistré les entrées les plus faibles, soit en moyenne 155 kg N/ha/an.

En ce qui concerne les sorties totales, la même classification des systèmes qu'avec les entrées est observé, à une exception près, les systèmes 4 et 6 sont identiques pour ce paramètre (Tableau 2). Le système 3 a enregistré une sortie moyenne de l'ordre de 1300 kg N/ha/an. Alors que le système 8 a enregistré une entrée moyenne de l'ordre de 132 kg N/ha/an. Pour les sorties dites «utiles», les systèmes 2, 3 et 1 ont mieux valorisé les apports en engrais azotés par rapport aux autres systèmes (Tableau 2).

### Bilans apparents des types de système de cultures

Le bilan apparent des différents types de système de culture est présenté dans le tableau 3.

La différence est très hautement significative entre les bilans des différents systèmes de cultures (Tableau 3). De même, les excédents (bilans) d'azote moyens sont très disparates entre types d'exploitations allant de 23 kg N/ha/an en céréaliculture extensive associée au maraîchage vivrier à 1026 kg N/ha/an pour le système 2, caractérisé par le maraîchage intensif diversifié (tomate, melon, haricot vert, poivron, concombre). Le système 3, composé de bananier et du maraîchage intensif diversifié (tomate, pastèque, melon) est similaire au système 2, il a enregistré aussi un excédent en azote élevé (environ 1000 kg N/ha/an). Les systèmes 1 (monoculture de tomate sous-serre intensive) et 6 (agrumes et maraîchage intensif diversifié, pomme de terre, haricot vert) sont similaires et ont enregistré un excédent moyen de l'ordre de 270 kg N/ha/an.

Le bilan (excédent d'azote) est fortement corrélé aux entrées ( $r = 0,98^{***}$ ) et aux sorties ( $r = 0,94^{***}$ ). Des résultats analogues ont été trouvés par Simon *et al.*, (2000) quant aux entrées en les engrais minéraux. Cette liaison forte s'explique par la non maîtrise de la fertilisation des cultures pratiquées (en particulier pour les systèmes ayant un excédent élevé), indiquant que plus les apports

**Tableau 2: Comparaison des caractéristiques des différents systèmes de culture**

	ENT (Kg N/ha/an)	SOR totaux (Kg N/ha/an)	UTI (Kg N/ha/an)
Type 1	771,2 d	511,2 d	222,3 e
Type 2	2091,2 g	1065,6 f	433,2 g
Type 3	2298,7 h	1297,5 g	375,0 f
Type 4	1212,5 f	635,0 e	158,7 b
Type 5	587,5 c	438,7 c	99,7 a
Type 6	901,2 e	616,2 e	176,1 c
Type 7	451,2 b	260,0 b	200,0 d
Type 8	155,0 a	132,5 a	90,7 a
LSD à 5%	10,7	13,1	12,8

en engrais azotés augmentent, plus les pertes augmentent aussi. Ceci met en exergue la sensibilité des exploitations vis à vis des risques de pollution des eaux souterraines par la non maîtrise des apports azotés. Cette hypothèse est confirmée ailleurs par Machet *et al.* (1987), Salette *et al.*, (1993), Jarvis *et al.* (1996) et Simon *et al.* (2000) qui ont montré qu'en production végétale, le coefficient réel d'utilisation de l'azote des engrais minéraux est le plus souvent situé entre 40 et 60%. Une autre liaison étroite lie aussi les excédents aux sorties dites «utiles» (coefficient de corrélation égal à 0,89\*\*\*). Ceci s'explique par le fait qu'il existe des exploitations très productives (systèmes 1) qui valorisent au mieux l'azote des engrais minéraux (ayant un potentiel polluant moyen), malgré qu'elles soient intensives. Les mêmes constatations ont été signalées par Simon *et al.*, (2000) pour les systèmes intensifs de grandes cultures en France.

### Recherche d'indicateurs de fonctionnement des exploitations

Le tableau 4 présente les valeurs moyennes des trois indicateurs de fonctionnement (EFF, CVE et GAS), calculables à partir des données disponibles dans la méthode du bilan apparent.

Le tableau 4 met en évidence que la différence entre les différents systèmes de culture pour les trois indices est très hautement significative. Ceci renseigne sur le fait que ces indices sont efficaces, pour caractériser et classer les différents systèmes, selon leur utilisation efficiente ou non de l'azote apporté aux exploitations en relation avec leur productivité.

Il ressort de ce tableau aussi que seulement trois groupes homogènes ont été distingués, les systèmes 2, 4, 3 et 7 dans le groupe ayant enregistré les indices d'efficacité les plus faibles. Ils sont suivis par le groupe constitué par les systèmes 1, 6 et 5. Enfin, le système 8 se trouve seul dans le groupe ayant enregistré l'indice le plus élevé. Une autre constatation est que l'indice d'efficacité de l'azote (EFF) est assez élevé pour les différents systèmes, il dépasse généralement les 50% (0,50) et atteint environ 89% pour le système 8. Les résultats trouvés par Simon *et al.* (2000) indiquent plutôt des indices d'efficacité faibles.

Pour l'indice de conversion de l'azote (CVE), les valeurs enregistrées sont globalement faibles allant de 13 à 58%. Les mêmes constatations ont été faites dans les travaux réalisés par l'OCDE (1997) et Simon *et al.*, (2000).

Le tableau 4 met également en évidence que l'indice de gaspillage (GAS) varie dans de fortes proportions, 0,34 pour le système extensif céréalier (système 8) et 3,64 pour le système bananier en monoculture intensive (système 4). Les mêmes remarques ont été signalées par Simon *et al.*, (2000) pour cet indice.

Pour les trois indices, des corrélations hautement significatives ont été trouvées avec les autres paramètres de gestion de l'azote à savoir les entrées, les sorties et le bilan (tableau 5).

Ces relations entre les différents paramètres d'utilisation de l'azote dans les exploitations agricoles, pour différents systèmes de culture, montrent l'étroite liaison entre les entrées, les sorties et le bilan d'une part, et des indices la rationalisation ou non de l'utilisation de l'azote dans

**Tableau 3: Comparaison des bilans apparents des différents systèmes de culture**

	BIL (Kg N/ha/an)	
Type 1	260,0	c
Type 2	1025,6	e
Type 3	1001,2	e
Type 4	600,0	d
Type 5	148,7	b
Type 6	285,0	c
Type 7	191,2	bc
Type 8	22,5	a
LSD à 5%	8,4	

**Tableau 4: Comparaison des trois indicateurs de fonctionnement (EFF, CVE et GAS) concernant les différents types de systèmes de culture**

	EFF		CVE		GAS	
Type 1	0,664	b	0,286	c	1,169	bc
Type 2	0,509	a	0,209	b	2,367	d
Type 3	0,566	a	0,163	ab	2,665	d
Type 4	0,525	a	0,130	a	3,638	e
Type 5	0,746	b	0,169	ab	1,498	c
Type 6	0,695	b	0,199	b	1,584	c
Type 7	0,579	a	0,444	d	0,956	b
Type 8	0,888	c	0,579	e	0,340	a
LSD à 5%	0,07		0,04		0,35	

**Tableau 5 : Matrice de corrélation entre les indices de fonctionnement et les paramètres de base**

	ENT	SOR	BIL
EFF	r= -0,66***	r= -0,58***	r= -0,71***
CVE	r= -0,62***	r= -0,66***	r= -0,57***
GAS	r= 0,71***	r= 0,66***	r= 0,75***

l'exploitation. Ce tableau met en évidence que l'efficacité de l'utilisation de l'azote (EFF) est meilleure lorsque les entrées et les sorties sont bien maîtrisées (réduites à l'optimum). En effet, une fois l'excédent est élevé l'efficacité est affectée négativement. De même, pour CVE qui indique qu'une fois les entrées, les sorties (surtout sorties non vendues) et l'excédent augmentent, la conversion de l'azote en protéines alimentaires est affectée négativement. Enfin, le tableau 5 montre également que l'indice de gaspillage de l'azote augmente proportionnellement avec les entrées, les sorties et plus particulièrement avec l'excédent d'azote (bilan). Ceci se traduit pratiquement par le fait qu'une fois l'excédent en azote global (bilan) augmente, la quantité d'azote excédentaire par kilogramme d'azote transformé en protéines alimentaires (azote des fruits, légumes, produits céréaliers...) augmente aussi. Des résultats similaires ont été confirmés par Simon *et al.* (2000).

### CONCLUSION

Les résultats présentés dans cette étude du bilan apparent de l'azote au niveau des exploitations agricoles n'ont pas pour objectif de donner une image représentative de l'impact polluant de l'ensemble des exploitations agricoles

de la plaine du Souss-Massa. Ils apportent par contre des informations nouvelles sur les flux d'azote, les excédents qui en résultent et leur variabilité pour quelques systèmes de culture répandus dans la plaine du Souss-Massa.

Par ailleurs, 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 la volatilisation (Amberger, 1990; Moal *et al.*, 1995 et Simon *et al.*, 2000), les eaux via les pertes de nitrates et d'ammonium par lixiviation (Ryden *et al.*, 1984 et Muller, 1996) et le sol via les résidus d'azote minéral ou le stockage sous forme organique (Bristow et Jarvis, 1991; Chaussod *et al.*, 1992; Loiseau et Decau, 1995; Recous *et al.*, 1997 et Simon *et al.*, 2000). Cette restriction limite la portée pratique de cette méthode puisqu'il n'est 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 notoirement différents avec pour conséquence des devenirs diversifiés. Néanmoins, on peut prévenir grossièrement l'importance relative des différents flux, selon le type du système de culture. Ainsi, dans la majorité des systèmes de culture considérés dans cette étude, le surplus existant sera en grande partie dans le sol où il peut alors rester sous forme minérale, y être organisé ou lessivé. De ce fait, pour la grande majorité des exploitations agricoles de la plaine du Souss-Massa, la maîtrise de la fertilisation azotée est la voie la plus efficace et la plus immédiate pour diminuer leur potentiel polluant. Cette amélioration passe par une meilleure connaissance des productions permises (notamment pour les cultures maraîchères, la banane et les agrumes) par le pédo-climat (type de sol, besoins en eau et irrigation) et donc des besoins réels des cultures.

## RÉFÉRENCES

- Amberger A. (1990). Ammonia emissions during and after land spreading of slurry. In "Odour and ammonia emissions from livestock farming", Nielson J-H Hermite P. (Ed.), Elsevier, pp. 126-140.
- Bel F., Lacroix A., Mollard A., et Regairaz E. (1999). Réduire la pollution azotée, les choix pré-alables d'une politique publique.
- Bøckman O. C., and Olf H. W. (1998). Fertilizers, agronomy and N<sub>2</sub>O. *Nutrient cycling in Agro-ecosystems*, 52: 165-170.
- Bristow A.W. et S.C. Jarvis (1991). Effects of grazing and nitrogen fertilizer on the soil microbial biomass under permanent pasture. *J. Sci. Food Agric.* 54: 9-21.
- Chaussod R., Zuvia M., M-C Breuil et J-M Hetier (1992). Biomasse microbienne et «statut organique» des sols tropicaux: exemple d'un sol vénézuélien des Llanos sous différents systèmes de culture. *Cah. Orstom (Série Pédol.)*, 27, 59-67.
- Jarvis S. C., Stockdale E. A., Shepherd M. A. and Powlson D. S. (1996). Nitrogen mineralization in temperate agricultural soils: processes and measurement. *Advances in Agronomy* 57:187-235.
- Jarvis S.C. (1993). Nitrogen cycling and losses from dairy farms. *Soil Use Manag.* 9: 99-105.
- Loiseau P. et M-L Decau (1995). Minéralisation et organisation de l'azote dans les sols estimés à partir des données de marquage <sup>15</sup>N des parties aériennes à la récolte. In utilisation des isotopes stables pour étude de fonctionnement des plantes. INRA ED., Versailles «Les Colloques», 70 pp. 299-314.
- Machet J. M., Pierre D., Recous S., et Remy J. C. (1987). Signification du coefficient réel d'utilisation et conséquences pour la fertilisation azotée des cultures. *CR Acad. Agric. Fr.* 73: 39-55.
- Mariotti A. (1998). La pollution nitrique des eaux: un processus de longue durée. *Courrier de l'Environnement* n° 195.
- Moal J.F., Martinez J., Guiziou F. et C.M. Coste (1995). Ammonia volatilization following surface-applied pig and cattle slurry in France. *J. Agric. Sci.* 125: 245-252.
- Muller J-C. (1996). Trente ans de lysimétrie en France (1960-1990) INRA-Éditions, Versailles «Point sur».
- OCDE (1997). Indicateurs environnementaux pour l'agriculture, Ed. OCDE, 1997.
- Prevost (1991). Horticulture et pollution nitrique. PH.M N° 321.
- Recous S., Nicolardot B. et J-C. Simon (1997). Le cycle de l'azote dans les sols et la qualité des eaux souterraines. In l'eau et l'espace rural, INRA-ED., Versailles, «Mieux comprendre », pp. 193-215.
- Ryden J. C., Ball P. R., and Garwood E. A. (1984). Nitrate leaching from grassland. *Nature*, 311: 50.
- Salette J., Decau M.L. et Simon (1993). Good agricultural practices: Some prospects for grassland and forage systems, CEC Workshop on Scientific basis for codes of good agricultural practices. Bruxelles, Ed. VWL Jordan, pp. 69-78.
- Simon J. C., et Le Corre L. (1992). Le bilan apparent de l'azote à l'échelle de l'exploitation agricole: méthodologie, exemples de résultats. *Fourrages*, 129: 79-94.
- Simon J-C., Griniani C., Jacquet A., Le Corre L. et J. Pages (2000). Typologie des bilans d'azote de divers types d'exploitation agricole: Recherche d'indicateurs de fonctionnement. *Agronomie*, 20:175-195.
- Simon J-C., Le Corre L. et F. Vertes (1994). Nitrogen balances on a farm: results from dairy farms in north west-France, Proceedings of 15<sup>th</sup> General Meeting of European Grassland Federation, Wageningen, 429-433pp.