

Impact du système fourrager sur la qualité de l'eau.

Enseignements issus du projet Green Dairy

C. Raison^{1,4}, H. Chambaut^{2,4}, A. Le Gall^{1,4}, A. Pflimlin³

1 : Institut de l'Elevage, Monvoisin, BP 85225, F-35652 Le Rheu cedex ; christelle.raison@inst-elevage.asso.fr

2 : Institut de l'Elevage, 9, rue André Brouard, BP 70510, F-49105 Angers cedex 02

3 : Institut de l'Elevage, 149, rue de Bercy, F-75595 Paris cedex 12

4 : Unité Mixte Technologique "Recherche et Ingénierie en Elevage Laitier", Monvoisin, BP 85225, F-35652 Le Rheu cedex

Résumé

Le projet Green Dairy s'est intéressé aux flux d'azote et de phosphore et à leur impact sur la qualité de l'eau dans onze régions de production laitière de l'Espace Atlantique allant de l'Ecosse au Nord Portugal. L'étude a mobilisé 3 niveaux d'approches complémentaires : (i) un suivi en exploitations laitières afin de mieux cerner les excédents d'azote et de phosphore à l'échelle de l'exploitation et les pratiques, (ii) des mesures en fermes expérimentales pour quantifier les pertes d'azote vers l'eau et l'air, enfin (iii) des observations à l'échelle du bassin hydrographique afin de faire le lien entre les pratiques agricoles et la qualité de l'eau. Cette présentation se limite aux deux premiers aspects.

Les régions concernées permettent de couvrir une large diversité de systèmes de production, de pratiques et de contextes pédoclimatiques. Ainsi, dans les îles britanniques, les systèmes herbagers sont basés principalement sur les prairies de longue durée. Ils produisent plus de 8 500 l lait/ha SAU et consomment plus de 250 kg N minéral/ha SAU. Les excédents d'azote et de phosphore sont proches de 225 kg N/ha SAU et de 12 kg P/ha SAU. Les systèmes très intensifs du sud se caractérisent par un chargement de plus de 4 UGB/ha et plus de 25 000 l lait produit par hectare, des vaches en stabulation quasi permanente et un important recours aux concentrés achetés et aux engrais minéraux. Dans ces conditions, les exploitations affichent un excédent de 380 kg N/ha et 56 kg P/ha. Les systèmes de cultures fourragères de l'ouest de la France, avec des prairies et des cultures en rotation, apparaissent comme les plus optimisés. Les améliorations de pratiques apportées depuis plusieurs années permettent d'atteindre des excédents proches de 100 à 150 kg N/ha et de 15 à 22 kg P/ha. Toutefois, dans ces systèmes, les pertes d'azote nitrique par lessivage se situent autour de 50 kg N/ha et sont supérieures à celles observées dans les systèmes herbagers des îles britanniques (proches de 20 kg N/ha), où les conditions de sol et d'humidité sont plus favorables à l'organisation de l'azote dans le sol et à la dénitrification. Dans les systèmes de cultures fourragères de l'ouest de la France, la part de maïs et d'herbe semble avoir peu d'incidence sur les pertes par lessivage à chargement équivalent et lorsque les pratiques sont optimisées.

Introduction

Les systèmes laitiers consomment de l'azote et du phosphore, principalement sous forme d'engrais et d'aliments pour assurer leurs productions. Cependant, ces intrants sont souvent excédentaires par rapport aux exportations par le lait, la viande et les cultures. Il en résulte des excédents qui peuvent être perdus dans l'environnement, sous différentes formes qui atteignent l'eau, l'air et le sol. Pour les éleveurs, ces excédents sont aussi synonymes de pertes d'argent et il faut donc rechercher la meilleure efficacité des intrants.

Depuis le début des années 1990, des dispositifs réglementaires européens (directive européenne 91/676/CEE, règlement N°1782/2003/CEE) et nationaux se sont mis en place pour réduire l'impact des activités agricoles sur l'environnement. Et à l'heure où la pression réglementaire et sociétale augmente, la prise en compte de l'environnement et l'amélioration des pratiques sont dorénavant incontournables pour assurer la pérennité des exploitations agricoles.

C'est dans ce contexte qu'a été initié le projet européen Green Dairy qui a étudié pendant trois ans les systèmes laitiers de onze régions de l'Espace Atlantique sous l'angle de l'environnement (Irlande du Sud et du Nord, Ecosse, Angleterre du sud-ouest, Pays-de-Galles, Bretagne, Pays-de-la-Loire, Aquitaine, Galice, Pays Basque espagnol et nord du Portugal). Ce projet avait pour objectifs de tester les marges de progrès d'amélioration des pratiques et de réduction des excédents d'azote et de phosphore dans les fermes laitières, de chiffrer les pertes d'azote vers l'eau et l'air dans une large gamme de systèmes de production, de pratiques et de contextes de climat et de sol. Il s'agissait aussi de mieux cerner la contribution de l'activité laitière aux excédents d'azote et à leur impact sur la qualité de l'eau au niveau du bassin versant, mais cet objectif ne sera pas développé ici.

Au travers des résultats de ce projet, complétés par des références bibliographiques obtenues par d'autres équipes, cette synthèse apporte des éléments d'évaluation de l'impact des systèmes fourragers sur la qualité de l'eau.

1. Méthodologie

Deux niveaux d'approche complémentaires ont été mobilisés afin de faire le lien entre pratiques, bilan d'azote et de phosphore à l'échelle de l'exploitation, et qualité de l'eau :

1 - L'analyse porte tout d'abord sur les **bilans d'azote et du phosphore à l'échelle de l'exploitation laitière**. Le principe du bilan a été développé par COPPENET (1975) puis précisé par SIMON *et al.* (1992 et 1995). Il consiste à comptabiliser toutes les entrées et les sorties d'azote et de phosphore sur l'exploitation. Le solde (entrées – sorties) donne l'excédent du bilan. Dans le cadre du projet Green Dairy, les bilans azote ont été réalisés sur un échantillon de 139 fermes laitières (fermes pilotes) localisées dans neuf régions allant de l'Ecosse au Nord Portugal (figure 1 et tableau 1). Ces exploitations sont pour la plupart déjà engagées dans des groupes de suivis technico-économiques, sauf pour les régions du sud (Galice, Pays Basque et Nord Portugal). Pour la France, nous disposons également des données des Réseaux d'Elevage bovin lait français¹ pour les années 2000 à 2005 (environ 500 exploitations laitières françaises suivies chaque année).

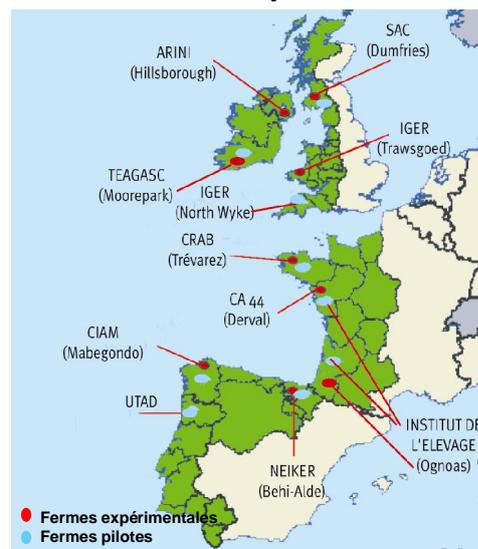
2 - Ensuite, il s'agit de faire le **lien entre l'excédent du bilan et les pertes vers l'eau** grâce à des expérimentations conduites à l'échelle de systèmes complets. Des mesures réalisées en fermes expérimentales permettent d'évaluer les flux d'azote entre les différents compartiments de l'exploitation et de quantifier le lessivage de l'azote sous les parcelles à l'aide de dispositifs adaptés aux contextes pédoclimatiques (bougies poreuses, réseaux de drains, reliquats d'azote couplés à l'utilisation du programme Lixim (MARY *et al.*, 1999). Le protocole expérimental a été plus largement décrit par BOSSUET *et al.* (2006). Les pertes de phosphore vers l'eau n'ont pas fait l'objet de mesures sur les sites étudiés, mais des références bibliographiques sont utilisées pour donner quelques repères.

¹ Ces exploitations sont suivies dans le cadre d'une action partenariale associant des éleveurs volontaires, l'Institut de l'Elevage et les Chambres d'Agriculture, selon une approche globale de l'exploitation sur une durée d'au moins trois ans.

TABLEAU 1 – Principales caractéristiques des régions Green Dairy.

Région	Pluviométrie (mm)	SAU / surface totale (%)	Chargement herbivore (UGB/ha SAU)	Nb Vaches / exploitation (moy. régionale)
Ecosse	1 200	> 70	0,25-0,5	88
Irlande S	1 000	> 70	1-1,5	54
Angleterre S-O	1 000	40-60	1-1,5	81
Bretagne	885	>60	0,75-1	34
Pays-de-la-Loire	825	>60	0,75-1,5	35
Aquitaine	1 100	40-50	<0,5	25
Pays Basque	1 200	40-50	1-1,5	13
Galice	1 180	30-40	>1,5	12
Nord Portugal	1 450	10-20	Localement : > 1,5	10

FIGURE 1 – Localisation des fermes laitières Green Dairy.



2. Les bilans de l'azote et du phosphore dans les différents systèmes laitiers

L'évaluation du bilan de l'azote à l'échelle du système laitier a fait l'objet de nombreuses études françaises et européennes depuis le début des années 1990 (SIMON *et al.*, 1994 ; VERON et LE GALL., 1997; VERBRUGEN *et al.*, 1994 ; VERSTRATEN, 1995 ; HUMPHREYS, 2005). Il a démontré son intérêt en tant qu'outil de diagnostic et de conseil pour faire progresser les pratiques des éleveurs.

2.1. Des bilans très contrastés dans les exploitations laitières de l'Espace Atlantique

Les fermes suivies dans le projet Green Dairy permettent d'intégrer la diversité des systèmes de production régionaux. Il s'agit d'éleveurs intéressés par la problématique environnementale, qui ont accepté de faire évoluer leurs pratiques au cours du projet. Les exploitations étudiées sont globalement plus grandes que la moyenne régionale, surtout dans les régions du sud où les groupes sont constitués d'exploitations de plus de 80 vaches, alors que l'effectif moyen est de 10-15 vaches (tableau 1).

Le tableau 2 présente les bilans d'azote et de phosphore dans les principaux systèmes européens de l'Espace Atlantique. Les excédents d'azote varient de 90 kg d'azote par hectare SAU dans les Pays-de-la-Loire à environ 250 kg N/ha SAU dans les systèmes herbagers des îles britanniques et plus de 350 kg/ha SAU dans les systèmes intensifs de la Corniche Cantabrique (nord du Portugal et de l'Espagne). Les excédents de phosphore sont également très disparates, de 9 kg de phosphore par hectare SAU en Irlande et dans les Pays-de-la-Loire à plus de 65 kg P/ha au Portugal. Ces excédents sont à analyser au regard des caractéristiques des exploitations et de leurs pratiques et des contextes de production. Trois groupes se distinguent ainsi :

- **Les systèmes herbagers du Royaume-Uni et de l'Irlande**, basés sur la prairie permanente, avec des niveaux de concentrés qui varient de 500 kg/vache/an en Irlande, où l'on cherche à maximiser le pâturage, à 1 500 kg/vache/an en Angleterre et en Ecosse, avec davantage d'herbe stockée. Les prairies reçoivent en moyenne 250 kg N minéral/ha, auxquels s'ajoutent les restitutions au pâturage et les épandages de déjections, pour un rendement de 11 t MS/ha en moyenne. Les excédents d'azote observés s'élèvent à 200 kg N/ha SAU et sont équivalents aux entrées d'azote par la fertilisation. En Irlande, les entrées de phosphore par les concentrés et la fertilisation sont faibles et permettent de limiter les excédents sur cet élément.

- **Les fermes laitières intensives de la Corniche Cantabrique** présentent des excédents très élevés par rapport aux autres régions, plus de 380 kg N/ha SAU et 56 kg P/ha SAU. Mais l'échantillon suivi est davantage représentatif des systèmes intensifs de demain que de la ferme laitière moyenne actuelle. Les systèmes étudiés présentent un chargement supérieur à 4 UGB/ha avec des vaches en stabulation permanente, nourries en rations complètes avec 3 tonnes de concentrés par vache, souvent achetés à l'extérieur. Toutefois, la productivité des surfaces (25 t MS/ha au Portugal) permet

de produire une grande partie du fourrage. Les concentrés achetés représentent tout de même plus de 60% des entrées soit environ 396 kg N et 27 kg P/ha SAU. Les niveaux de fertilisation sont également élevés (200 kg N minéral/ha SAU), alors qu'une bonne maîtrise des déjections permettrait de les réduire considérablement, voire de les supprimer.

- **En Bretagne et dans les Pays-de-la-Loire**, les fermes suivies sont engagées depuis plusieurs années dans une démarche de progrès impliquant l'ajustement des concentrés, la création de capacités de stockage, la réduction de la fertilisation minérale et l'introduction de trèfle blanc dans les prairies de graminées pures. Les entrées par la fertilisation sont systématiquement plus faibles que celles observées dans les autres régions européennes. Les excédents d'azote sont assez modérés et le taux d'efficacité (sorties/entrées) est proche de 40%. En Aquitaine, les fermes suivies consomment davantage d'engrais minéral et ont des excédents d'azote et de phosphore plus élevés que dans les deux régions précédentes.

L'analyse des exploitations laitières de plaine des Réseaux d'Elevage bovins lait français sur les années 2000 à 2005 permet de préciser les résultats observés dans les groupes français Green Dairy. On observe que les systèmes à dominante herbagère, avec un chargement moindre (groupe "spécialisés lait avec moins de 30% maïs/SFP"), ont des excédents relativement faibles, 86 kg N/ha SAU. Les entrées d'azote sont proches de 120 kg N/ha SAU, dont 50 kg environ proviennent des engrais minéraux et 30-40 kg de la fixation par le trèfle. Les systèmes plus intensifs, avec davantage de maïs (groupe "spécialisés lait avec plus de 30% maïs/SFP"), consomment plus d'intrants, mais les exportations par le lait sont plus importantes. L'excédent est plus élevé (116 kg N/ha SAU) et varie en fonction de la part de cultures de l'exploitation. Les systèmes en agrobiologie, peu chargés (1,2 UGB/ha SAU), présentent des bilans hors fixation symbiotique négatifs et proches de 30 kg N/ha lorsque l'on intègre ce poste. La fertilisation y est assurée par la fertilisation organique, la fixation symbiotique et la gestion des rotations (libération de l'azote suite aux retournements de prairie).

Les systèmes "lait + cultures" affichent des excédents de 93 kg N/ha SAU et un taux d'efficacité de 46%, favorisé par la présence de cultures de vente qui exportent davantage que les produits animaux pour lesquels il y a une double transformation des minéraux entrant sur l'exploitation (transformation en végétaux puis en lait ou en viande).

2.2. Des marges de progrès possibles pour réduire les excédents

Quels que soient les systèmes étudiés, l'excédent d'azote est essentiellement lié aux entrées par les engrais et l'aliment (figure 2a : $r^2=0,98$). Dans les systèmes herbagers des îles britanniques, l'azote fourni par la fertilisation (engrais, déjections importées et fixation symbiotique) représente plus de 80% des entrées d'azote, tandis que dans les systèmes intensifs du nord du Portugal et de l'Espagne avec de hauts niveaux de concentrés, c'est le poste "aliments" qui domine largement (73% des entrées d'azote). L'excédent d'azote apparaît également bien relié avec le niveau d'intensification laitière (figure 2b). Toutefois, pour un même niveau de production laitière, l'excédent peut varier du simple au double. Cet écart provient de la dispersion des pratiques, mais aussi du potentiel agronomique des sols et de la part des cultures de vente. Ces conclusions obtenues sur l'excédent d'azote sont également valables pour les excédents de phosphore.

FIGURE 2 – Relations entre l'excédent d'azote et (a) les entrées par les engrais et les aliments et (b) la production laitière par ha SAU.

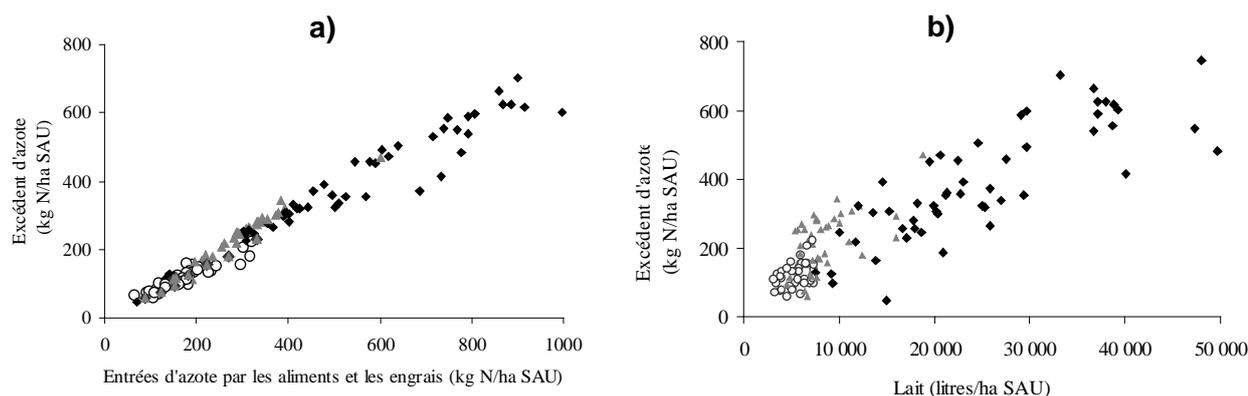


TABLEAU 2 – Bilans de l'azote et du phosphore dans les systèmes laitiers européens et français.

Source	Données Green Dairy (RAISON <i>et al.</i> , 2006)					Réseaux d'Elevage bovin lait			
Pays/Région	Ecosse Irlande Sud Angleterre S-O	Pays Basque Galice Nord Portugal	Bretagne	Pays-de- la Loire	Aquitaine	Lait de Plaine - France			
Systèmes	Herbagers intensifs	Stabulation permanente Très intensifs	Prairies + maïs fourrage	Maïs fourrage + maïs grain	Spécialisés < 30% maïs	Spécialisés > 30% maïs	Lait + cultures	Lait biologique	
Années d'études	2003-2005					2000-2005			
Nombre d'exploitations	47	65	15	13	9	306*	359*	367*	207*
SAU (ha)	96	50	57	82	69	77	70	119	80
SFP / SAU (%)	98	100	79	74	52	81	67	40	83
Maïs / SFP (%)	4	33	30	35	61	16	43	39	5
Chargement UGB/ha SFP	2	4,1	1,8	1,8	2,5	1,3	1,8	1,9	1,2
Concentrés (kg/VL)	1 000	3 500	926	1 494	1 772	--	--	--	--
Lait produit (kg/VL)	6 500	8 500	6 733	7 084	7 881	6 420	7 270	7 550	5 290
Lait produit (kg/ha SAU)	8 530	25 240	5 315	4 837	6 053	4 060	5 420	3 200	3 320
Bilan de l'azote (kg N/ha SAU)									
Entrées (kg N/ha SAU)	282	541	193	154	238	123	179	173	54
Fertilisation (minérale + déjections importées + fixation)	226	136	100	92	147	90	116	131	42
Aliments	52	396	85	59	81	29	56	38	6
Autres (animaux, paille)	4	9	8	3	10	4	7	4	6
Sorties (kg N/ha SAU)	57	160	76	61	83	39	60	80	25
Lait	48	126	31	27	30	23	30	19	18
Cultures	1	4	16	27	48	12	26	59	4
Viande	8	14	25	7	5	4	4	2	3
Déjections	0	16	4	0	0	0	0	0	0
Excédent du bilan (kg N/ha SAU)	225	381	117	93	155	84	119	93	29
<i>Excédent du bilan (kg N/1 000 l)</i>	26	15	22	19	26	21	22	29	9
<i>Taux efficacité** (%)</i>	20	30	39	40	35	32	34	46	46
Bilan du phosphore (kg P₂O₅/ha SAU)									
Excédent du bilan (kg P₂O₅/ha SAU)	12	56	16	9	22	7	12	6	-1
<i>Excédent du bilan (kg P₂O₅/ 1000 l)</i>	1	2	3	2	4	2	2	2	0
<i>Taux efficacité** (%)</i>	52	35	47	57	43	53	50	74	100

* exploitations x année ; ** sorties/entrées ; -- : données manquantes

Les entrées d'azote et de phosphore par les engrais et les aliments sont donc les deux principaux leviers pour réduire les excédents à l'échelle de l'exploitation. Ainsi, en France, au cours de la dernière décennie, l'évolution des pratiques de fertilisation, le remplacement des graminées pures très fertilisées par des associations ray-grass anglais - trèfle blanc ainsi que la réduction des concentrés ont entraîné une diminution des excédents (tableau 3). Au début des années 1990, les études menées sur les exploitations laitières spécialisées de Bretagne et des Pays-de-la-Loire montraient des consommations d'engrais minéral de 200 kg N/ha SAU et des excédents du même ordre (SIMON *et al.*, 2000). Depuis, les références disponibles indiquent une nette réduction de la fertilisation et des excédents, qui ont été divisés par deux, pour des sorties assez proches. Toutefois, cette évolution est quelque peu favorisée par une plus grande proportion de cultures dans l'échantillon le plus récent.

Dans les autres régions du projet Green Dairy, des progrès importants sont possibles pour réduire la fertilisation sans pénaliser les productions fourragères et laitières, mais cet objectif se heurte souvent à la nécessité d'accroître les ouvrages de stockage des déjections pour permettre une valorisation optimale des déjections animales (dose et date d'apport au plus près des besoins des plantes) et réduire ainsi le recours aux engrais de synthèse.

TABLEAU 3 – Evolution des excédents d'azote dans les exploitations laitières de Bretagne et des Pays-de-la-Loire.

Régions	Bretagne et Pays de la Loire	Bretagne		Bretagne et Pays de la Loire	
	Lait	Lait	Lait et hors sol	Lait	Lait et hors sol
Années d'études	1989-1994	1995-1996		2000-2005	
Nombre d'exploitations	48	128	11	27*	7*
Source	SIMON <i>et al.</i> , 2000	LE GALL, 2000		RÉSEAUX D'ÉLEVAGE BOVINS LAIT	
Chargement (UGB/ha SFP)	1,8	1,8	1,8	1,8	1,6
Maïs /SFP (%)	46	33	28	39	30
Lait produit (kg/ha SAU)	6 400	5 650	5 800	5 000	4 100
Culture/SAU (%)	12	19	15	25	31
Entrées (kg N/ha SAU)	276	196	471	155	250
dont fertilisation minérale	200	100	101	78	60
dont concentrés	72	49	327	43	170
Sorties (kg N/ha SAU)	59	54	180	63	99
Excédent du bilan (kg N/ha SAU)	217	142	291	92	151
Taux efficacité sorties/entrées (%)	21	27	38	40	39

* Nb d'exploitations moyen par an

3. Devenir des excédents d'azote et de phosphore dans l'environnement

Les études réalisées en fermes expérimentales permettent d'analyser le devenir de l'excédent dans l'environnement et d'évaluer les pertes vers l'eau. Cette démarche demande de mesurer précisément les flux d'azote et de phosphore entre les différents compartiments de l'exploitation (bâtiment/stockage, parcelle, animal). Des études de ce type ont été conduites dans le cadre du projet Green Dairy sur neuf sites de l'Espace Atlantique. Nous disposons également d'un suivi de moyenne durée sur plusieurs sites de l'ouest de la France, ce qui permet d'intégrer davantage de variabilité climatique et de consolider les résultats.

3.1. Les pertes d'azote par lessivage

- Dans les systèmes de cultures fourragères de l'ouest de la France, des pertes par lessivage comprises entre 40 et 60 kg N/ha

Quatre sites français ont fait l'objet d'un suivi (tableau 4). Les pertes d'azote par lessivage ont été estimées grâce à des mesures de reliquats azotés pendant la période hivernale, couplées à l'utilisation du programme Lixim (MARY *et al.*, 1999), sauf à Ognos (Landes) où les concentrations en nitrates ont été mesurées dans les eaux de drainage. Les systèmes étudiés présentent un chargement compris entre 1,4 et 2,2 UGB/ha SFP, avec une proportion variable de maïs dans la SFP

(entre 18 et 80%). Ils sont conduits avec des pratiques permettant une bonne gestion de l'azote (plus de 6 mois de capacité de stockage du lisier, cultures intermédiaires, raisonnement de la fertilisation). Certains dispositifs ont permis de comparer deux niveaux d'intensification sur le même site. Les excédents d'azote à l'échelle de l'exploitation varient de 95 à 150 kg N/ha SAU.

Dans les fermes expérimentales de Bretagne et des Pays-de-la-Loire, les pertes d'azote nitrique par lessivage sont proches de 50 kg N/ha SAU, ce qui représente 1/3 à 50% de l'excédent d'azote. Elles sont un peu plus faibles à Ognoas. Les concentrations en nitrates sous les racines sont généralement proches de 50 mg NO₃/litre et bien au-delà lorsque la lame drainante est faible. Les mesures réalisées sur une période de 7 ans sur la ferme de Trévarez font apparaître des pertes relativement stables d'une année sur l'autre, comprises entre 40 et 45 kg N/ha SAU. Au Pays-Bas, les pertes mesurées sur le système de cultures fourragères de De Marke sont proches de celles des fermes françaises, avec une productivité à l'hectare supérieure (près de 13 000 l/ha) et des pratiques optimisées (83 kg N minéral/ha SAU).

Par ailleurs, les comparaisons de systèmes réalisées à Crécom (Bretagne) et à Ognoas montrent que la part de maïs ou de prairies a assez peu d'incidence sur les pertes par lessivage. Il faut néanmoins préciser que, dans ces comparaisons, les systèmes ont des chargements et des niveaux d'excédent assez proches et mettent en œuvre des pratiques optimisées (fertilisation, interculture), pour limiter les pertes par lessivage.

Au niveau des différentes parcelles de l'exploitation, des situations plus risquées pour le lessivage sont identifiées. Il s'agit d'une part des retournements de prairie, dont l'effet sur la minéralisation de l'azote et le lessivage ont fait l'objet de différentes études (DECAU et SALETTE, 1993 ; VERTÈS *et al.*, 1999 ; MORVAN *et al.*, 1999 ; LAURENT *et al.*, 1999). Toutefois, l'absence de fertilisation et l'implantation de couverts végétaux d'interculture permettent de limiter les fuites d'azote. Les prairies situées à proximité des bâtiments constituent l'autre situation à risque lorsque les animaux y séjournent longtemps, alors que l'offre d'herbe au pâturage est faible et qu'ils sont complétés. Il y a donc un transfert d'azote et de phosphore de l'étable vers la prairie pâturée.

- Dans les systèmes herbagers britanniques et irlandais, des excédents importants mais moins de pertes par lessivage

Dans les systèmes herbagers du Royaume-Uni et de l'Irlande, basés sur des prairies de longue durée, les excédents sont compris entre 70 et 270 kg N/ha SAU (tableau 4). Les plus faibles excédents sont obtenus dans des systèmes en agrobiologie, sans fertilisation minérale. Les pertes par lessivage sont mesurées grâce un dispositif de bougies poreuses ou de piézomètres. Les concentrations moyennes en nitrates observées varient de 17 à 35 mg NO₃/l ce qui, compte tenu de la lame drainante, induit des pertes de 16 à 30 kg N/ha SAU. Ces niveaux de lessivage sont nettement inférieurs à ceux relevés sur les sites de l'ouest de la France. Plusieurs niveaux de fertilisation azotée ont été testés dans les 2 sites irlandais (Solohead et Hillsborough), mais aucun effet n'a été observé sur les pertes d'azote par lessivage.

- Des risques de pertes différents selon les systèmes et les contextes pédoclimatiques

Les résultats présentés précédemment, complétés par d'autres références bibliographiques, montrent une différence de comportement assez nette par rapport aux risques de pertes vers l'eau selon les systèmes (figure 3).

Ainsi, dans les systèmes de cultures fourragères, avec des sols filtrants favorables aux lessivages, les pertes sont comprises entre 30 et 60 kg N/ha SAU pour des excédents de 100 à 180 kg N/ha SAU. Elles représentent donc 1/3 à 50% de l'excédent. En revanche, les systèmes herbagers, avec beaucoup de pâturage et basés sur des prairies de longue durée, perdent seulement entre 10 à 20 kg N/ha malgré des excédents 1,5 à 2 fois plus élevés. Ces différences peuvent s'expliquer par la combinaison du **système de production, des pratiques et des conditions pédoclimatiques**. Plusieurs éléments explicatifs peuvent ainsi être avancés :

- Un potentiel d'organisation/minéralisation de l'azote différent. Ainsi, les systèmes herbagers, avec de la prairie de longue durée, organiseraient de l'azote tandis que les systèmes de cultures fourragères, avec de la prairie et du maïs en rotation, seraient plutôt dans une situation de minéralisa-

TABLEAU 4 – Pertes d'azote par lessivage dans différents systèmes laitiers européens.

Site	Systèmes de cultures fourragères du Nord Ouest de l'Europe								Systèmes herbagers du Nord-Ouest de l'Europe						
	Crécom (22)		Trévarez (29)		Derval (44)	Ognoas(40)		De Marke (NL)	Hillsborough (Ir)		Solohead (Ir)			Ty Gwyn (PG)	
Source	LE GALL et CABARET, 2002		LE MEUR, 2006 non publié	BOSSUET <i>et al.</i> , 2006	BOSSUET <i>et al.</i> , 2006	LEGARTO et LE GALL, 1999 et com. personnelle		HILHORST <i>et al.</i> , 2001 ; AARTS <i>et al.</i> , 2001	BOSSUET <i>et al.</i> , 2006		BOSSUET <i>et al.</i> , 2006			BOSSUET <i>et al.</i> , 2006	
Systèmes	Herbe+	Maïs+	30% maïs/SFP		40% maïs/SFP	Herbe+	Maïs+	40% maïs/SFP	Intensif 262 N	Intensif 226 N	Intensif 230 N	Intensif 90 N + TB	Intensif 100 N + TB	Agrobiologie	Agrobiologie + achat aliment
Années d'étude	1996 -1998		1999 - 2001	2003 - 2005	2003 - 2005	1993-2001		1993-1998	2004-2005						
Type de sols*	LSA	LSA	LA	LA	LA	S	S	S	LA	LA	AL	AL	AL	AL	AL
SAU (ha)	35	35	150	150	103	31	31	56							
Cultures de vente/SAU (%)	24	22	11	9	15	30	45	0	0	0	0	0	0	0	0
Chargement (UGB/ha SFP)	1,78	1,75	1,66	1,55	1,4	1,8	2,2	1,8	2,8	2,8	2,2	2,2	2	1,3	1,5
Maïs/SFP (%)	18	38	29	31	39	35	81	40	0	0	0	0	0	0	0
Lait (l/ha SAU)	6 910	7 030	6 080	5 933	7 270	9 200	9 300	12 865	12 019	12 180	11 500	11 566	10 534	4 367	6 555
Bilan de l'azote (kg N/ha SAU)															
Entrées	244	230	182	144	141	193	223	235	357	321	282	221	187	93	143
Dont fertilisation minérale	121	93	118	85	52	121	122	83	262	226	221	87	100	0	0
Sorties	94	140	41	42	49	85	103	77	85	80	73	73	67	23	34
Excédent du bilan	150	140	141	102	95	108	120	158	272	241	209	148	120	70	110
Pertes d'azote nitrique (kg N-NO₃/ha SAU)															
Lame drainante (mm)	388	400	450	317	109	419	490	475	394	394	405	405	405	655	655
Maïs fourrage	53	38	61	59	87	44	47	--	-	-	-	-	-	-	-
Prairies	49	55	46	56	41	24	14	--	31	25	17	16	20	16	17
Total (kg N/ha SAU)	49	55	52	54	54	30	45	59	31	25	17	16	20	16	17
Concentrations nitrates (mg NO ₃ /litre)	56	60	51	74	> 200	31	41	55	35	28	20	17	21	10	11
Pertes d'azote gazeux (kg N-NH₃/ha SAU) - (kg/1000l)															
Ammoniac (kg N-NH ₃ /ha SAU) - (kg/1000l)	--	--	--	25 (4,1)	27 (3,7)	--	--	--	60 (4,8)	60 (4,8)	47 (3,9)	44 (3,7)	41 (3,8)	20 (4,4)	28 (4,1)
Protoxyde azote (kg N-N ₂ O/haSAU) - (kg/1000l)	--	--	--	4 (0,7)	2 (0,3)	--	--	--	8 (0,7)	9 (0,7)	11 (0,9)	10 (0,9)	9 (0,8)	4 (0,8)	5 (0,7)
Total (kg N/ha) - (kg N/1000l)	--	--	--	40 (6,5)	46 (6,5)	--	--	--	92 (7,4)	92 (7,3)	88 (7,4)	84 (7,0)	77 (7,0)	31 (6,8)	43 (6,4)

* LSA : limono-sablo-argileux ; LA : limono-argileux, S : sableux ; AL : argilo-limoneux.

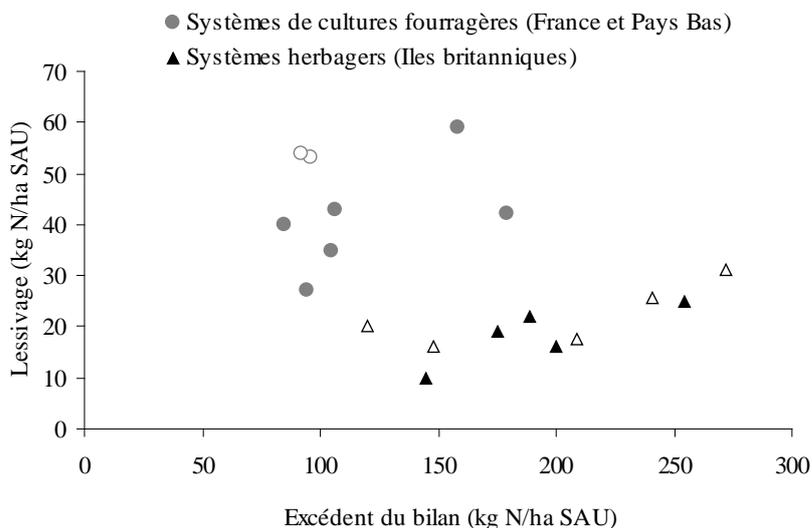
tion nette de l'azote du sol favorisée par les retournements de prairies. Cette hypothèse est assez conforme aux taux de matière organique des sols qui sont supérieurs à 15% dans les systèmes herbagers, mais dans une fourchette de 2 à 6% dans les systèmes de cultures fourragères étudiés.

- Dans les systèmes herbagers étudiés, la croissance de l'herbe est plus régulière et sans arrêt net en périodes estivale et hivernale, sans sénescence marquée des organes prairiaux, ce qui limite les risques de fuite en période de lessivage.

- Des pertes d'azote vers l'air par dénitrification plus importantes dans les systèmes herbagers compte tenu des conditions pédoclimatiques (sol argileux et humide).

FIGURE 3 – Pertes d'azote dans différents systèmes laitiers européens.

Les triangles et cercles blancs représentent les fermes expérimentales suivies dans le projet Green Dairy.



Les résultats cités portent sur les systèmes de cultures fourragères où les prairies sont plus ou moins en rotation avec du maïs fourrage et des céréales. Comparativement aux systèmes herbagers basés sur des prairies de longue durée, les processus de minéralisation/organisation sont davantage stimulés dans les systèmes de cultures fourragères comportant un pool important de matières organiques (fumier, compost, prairies) avec des conséquences significatives sur les pertes d'azote nitrique. Afin de limiter ces flux d'azote vers l'eau et de favoriser le stockage du carbone, il apparaît important de préciser les successions culturales à mettre en œuvre et les durées de vie des prairies à privilégier (TAUBE et CONIJN, 2007 ; VERTÈS *et al.*, 2007). **Faut-il favoriser les rotations entre les cultures et les prairies temporaires de 3 à 6 ans ou faut-il tendre vers la spatialisation des parcelles**, avec d'un côté les prairies de longue durée, renouvelées tous les 8 à 10 ans, et de l'autre les cultures (maïs, céréales, colza) ? Naturellement, ces approfondissements doivent être cohérents avec l'organisation du parcellaire et la nécessaire accessibilité au pâturage qui peuvent conduire à une spécialisation des parcelles.

– Répartition de l'excédent d'azote et discussion sur les pertes

Afin de compléter l'analyse sur les pertes d'azote dans les systèmes laitiers, les émissions d'azote gazeux d'origine anthropique ont également été calculées. La méthode de calcul utilise des coefficients d'émission issus de la bibliographie appliqués sur les flux d'azote au niveau des différents compartiments de l'exploitation (animal, bâtiment, pâturage). De la confrontation entre l'excédent du bilan et les pertes d'azote vers l'eau et l'air (tableau 4), il ressort **des comportements assez différents entre les systèmes de cultures fourragères avec de la prairie temporaire en rotation avec des cultures et les systèmes herbagers de prairie de longue durée**. Ces derniers perdent en effet entre 10 et 20 kg N/ha SAU par lessivage soit 10 à 25% de l'excédent. Les pertes par voie gazeuse sont nettement plus élevées (supérieures à 80 kg N/ha SAU). Toutefois, les pertes totales d'azote restent faibles par rapport à l'excédent : environ 50% de l'excédent est perdu vers l'eau et l'air. Il reste donc un écart significatif entre l'excédent d'azote et les pertes, qui pourrait être imputé à l'incertitude liée aux méthodes de calcul et de mesures, mais principalement à de l'organisation de l'azote dans les sols et à la dénitrification des sols. Les sols argileux et humides de ces systèmes sont favorables aux émissions d'azote par dénitrification.

A l'inverse, dans les systèmes de cultures fourragères français, avec de la prairie en rotation, les pertes d'azote nitrique vers l'eau sont relativement importantes au regard de l'excédent. Elles représentent entre 30 et 60% de l'excédent selon la lame drainante. Les pertes par voie gazeuse sont légèrement plus faibles (entre 40 et 50 kg N/ha). La différence entre l'excédent du bilan et les pertes totales est plus modérée que dans les systèmes herbagers. Dans les conditions d'élevage de l'Ouest, on serait plutôt dans une situation de minéralisation de l'azote du sol ou de faible organisation, plus favorable au lessivage.

Ces résultats acquis en stations expérimentales sur le lessivage de l'azote ont été discutés plus largement à l'échelle du bassin versant pour évaluer de façon plus globale l'impact des systèmes laitiers sur la qualité des eaux. La confrontation des différentes situations observées sur l'Espace Atlantique montre que la qualité de l'eau à l'exutoire du bassin versant dépend outre des pratiques agronomiques, de la pression agricole sur la zone, de la surface non cultivée, des pratiques antérieures et du contexte pédoclimatique. Ainsi, l'ouest de la France qui affiche les teneurs en nitrates les plus élevées, combine une forte densité d'élevages, une surface agricole occupant plus de 75% de surface totale, une lame drainante moyenne, tandis que les régions du nord de l'Espagne ou du Portugal avec plus de 50% de la surface en bois et parcours, une forte lame drainante (800 mm) et une moindre densité d'élevages, sont très peu touchées par les problèmes de qualité de l'eau.

3.2. Les pertes de phosphore

Dans les fermes laitières, les excédents de phosphore sont très variables et proviennent d'apports excessifs par les engrais et, dans une moindre mesure, les aliments. Ils sont compris entre 9 kg P/ha SAU dans les Pays-de-la-Loire et 56 kg dans les régions du sud (tableaux 2 et 5). Le bilan type Corpen² suit la même tendance et d'une situation globalement équilibrée dans l'ouest de la France, on passe à un solde très excédentaire dans les régions du sud de l'Europe, des Pyrénées au Portugal. Cet excédent est très lié aux entrées de phosphore minéral utilisé principalement sur maïs.

TABLEAU 5 – Bilan du phosphore à l'échelle de l'exploitation et solde Corpen dans quelques systèmes laitiers contrastés (RAISON *et al.*, 2006).

Région	Irlande (Sud) Angleterre (Sud Ouest) Ecosse	Bretagne	Pays de la Loire	Aquitaine	Galice Portugal (Nord) Pays Basque
Chargement (UGB/ha SAU)	2	1,4	1,3	1,2	4,1
% prairies/SAU	100	55	48	20	77
% maïs/SFP	0	30	35	61	60
Phosphore minéral (kg P/ha)	12	4	6	22	30
Bilan phosphore (kg P/ha)	12	16	9	22	56
Solde Corpen ² (kg/ha)	10	3	0	7	31

Le phosphore en excès se stocke dans les sols de l'exploitation, comme l'ont montré COPPENET *et al.* (1993). Il pourra ensuite être transféré par ruissellement, érosion ou drainage vers la ressource en eau. VERTÈS *et al.* (2005) précisent que le stockage, proportionnel aux apports cumulés de lisier, s'accompagne d'une augmentation de phosphore soluble, susceptible d'être entraîné par les eaux de drainage. Les pertes de phosphore n'ont pas fait l'objet de mesures sur les sites expérimentaux, mais les études conduites sur ce sujet font état de pertes variant entre 0,05 et 2,5 kg P/ha/an selon le couvert en place (DORIOZ, 1997). D'une façon générale, les pertes de phosphore par ruissellement sont plus importantes sous cultures que sous prairies, mais plus fréquentes sur les sols en pente. Sous prairie (de pâture ou de fauche), le couvert végétal permet de réduire le ruissellement et l'érosion et les flux se situent alors généralement en dessous de 0,4 kg P/ha/an (DORIOZ, 1997). Toutefois, la présence de déjections en surface et les zones de piétinement peuvent favoriser les transferts ; les pertes peuvent alors être plus élevées (supérieures à 1 kg P/ha/an). D'autre part, sur prairie, le phosphore est principalement transféré sous forme soluble (HART *et al.*, 2004) directement assimilable par les végétaux aquatiques. Les flux de migration du phosphore par lessivage sont généralement faibles et les mesures réalisées dans différents contextes mettent en évidence des pertes variables, de moins de 0,5 à 1,5 kg

² Le bilan type Corpen correspond à la différence entre les apports de phosphore pour la fertilisation sur les parcelles de l'exploitation et les exportations par les plantes. Les apports prennent en compte les engrais minéraux, les épandages de déjections et les restitutions directes au pâturage.

P/ha/an (TURNER et HAYGARTH, 2000 ; TOOR *et al.*, 2004). Les concentrations en phosphore dans les eaux de ruissellement et de drainage varient de quelques µg à 5 mg de P total par litre pour les plus élevées selon les situations. Le lien avec la qualité de l'eau reste cependant difficile à établir, car il dépend notamment de la forme du phosphore transféré, du milieu récepteur et des conditions climatiques.

Si on se réfère à ces observations, les quantités de phosphore perdues par ruissellement et drainage sur une exploitation laitière avec une part significative de prairies et des couverts d'intercultures sont probablement inférieures à 2 kg P/ha/an. Les excédents de phosphore augmentent cependant les risques pour la qualité de l'eau à long terme. Les pertes mesurées sous prairies apparaissent généralement plus faibles que sous cultures, mais la présence de couverts végétaux d'interculture et les aménagements (haies, talus, bandes enherbées) permettent de réduire les transferts.

Conclusion

De cette analyse de données recueillies dans une grande diversité de systèmes de production laitière et de milieux, on peut tirer quelques enseignements :

- Les marges de progrès pour réduire les excédents passent prioritairement par la gestion des déjections qui permet de diminuer le recours aux engrais minéraux. En France, des exemples concrets montrent qu'il est possible de réduire les excédents sans pénaliser les rendements ni la production laitière.

- Dans les exploitations laitières, les pertes d'azote vers l'eau dépendent à la fois du milieu et du niveau d'intensification et donc des excédents d'azote, du système fourrager et des pratiques agricoles. La comparaison de différentes situations dans le cadre du projet Green Dairy montre que les systèmes herbagers basés sur la prairie de longue durée, même avec beaucoup de pâturage, présentent moins de risques pour la qualité de l'eau que les systèmes de cultures fourragères avec des rotations prairies-cultures impliquant une part de labour plus importante. La part de maïs et de prairie semble avoir assez peu d'incidence sur le lessivage de nitrates, à chargement équivalent, si les systèmes sont optimisés sur le plan environnemental.

- A l'échelle du bassin versant, les conclusions du projet Green Dairy montrent que la contribution de la production laitière est difficile à évaluer, compte tenu de la multiplicité des facteurs mis en jeu. La qualité de l'eau dépend en effet de la pression agricole toutes productions confondues, des pratiques agricoles, de l'occupation du sol, des conditions pédoclimatiques... C'est la prise en compte de tous ces éléments qu'il faut intégrer pour proposer des mesures pertinentes permettant de rétablir et préserver une eau de bonne qualité et atteindre les objectifs de la directive cadre sur l'eau.

- D'autre part, l'évaluation environnementale des systèmes laitiers ne peut se limiter au seul problème de la qualité de l'eau et des nitrates en particulier. Il est essentiel d'élargir à d'autres domaines tels que les consommations d'énergie et produits phytosanitaires, les émissions de gaz à effet de serre, la biodiversité... Ainsi, des informations complémentaires collectées dans les fermes laitières suivies montrent que les systèmes herbagers utilisent très peu de produits phytosanitaires et ont une moindre dépendance énergétique. Une analyse environnementale plus globale s'impose donc pour mettre au point des systèmes laitiers durables et respectueux de l'environnement.

Références bibliographiques

- AARTS H.F.M., CONIN J.G., CORRE W.J. (2001) : Nitrogen fluxes in the plant component of the "De Marke" farming system, related to groundwater nitrate content. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 49, 153-162.
- BOSSUET I., CHAMBAUT H., LE GALL A., RAISON C. (2006). Etude de la répartition de l'excédent d'azote dans des fermes expérimentales laitières européennes. Actes du colloque Green Dairy - Systèmes laitiers et environnement. Mieux prendre en compte la diversité régionale grâce aux résultats du projet Green Dairy. *Séminaire final, Rennes 13 et 14 décembre 2006*, 69-98.
- COPPENET M. (1975). Bilan des éléments fertilisants sur les exploitations d'élevage, *Fourrages*, 62, 119-132.
- COPPENET M., GOLVEN J., SIMON J.C., LE CORRE L., LE ROY M., (1993). Evolution chimique des sols en exploitation d'élevage intensif : exemple du Finistère. *Agronomie*. 13:77-83.
- DECAU M.L., SALETTE J. (1993). Retournements de prairie et évolution consécutive de l'azote minéral du sol, matières organiques et agriculture. *GEMAS-COMIFER*, 71-81.
- DORIOZ J.M., TREVISAN D., VANSTEELANT J.Y. (1997). Transferts de phosphore des bassins versants agricoles vers les lacs : impacts, ordre de grandeur, mécanismes, *L'eau dans l'espace rural : agriculture et qualité de l'eau*, INRA Ed., 250-264.

- HART M., QUIN B.F., LONG NGUYEN M. (2004). Phosphorus runoff from agricultural land and direct fertiliser effect : A review. *Journal of Environmental Quality*, 33, 1954-1972.
- HILHORST G.J., OENEMA J., VANKEULEN H. (2001) : Nitrogen management on experimental dairy farm "De Marke" : farming system, objectives and results. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 49, 135-151.
- HUMPREYS J., CASEY I.A., CARTON O.T. (2005). Case of Irlande - Nutrient management at farm. In *Nutrient Management at farm scale. How to attain policy objectives in regions with intensive dairy farming. First workshop of the EGF Working Group "Dairy Farming Systems and Environment". Quimper France, 23-25 June 2003*, 145-164.
- LAURENT F., FARRUGIA A., VERTES F., KERVEILLANT P. (1999). Effets des modes de conduite de la prairie sur les pertes d'azote par lessivage. Propositions pour une maîtrise du risque à la parcelle in *Recueil des communications de la journée technique "Fertilisation azotée des prairies de l'Ouest"*, 113-132.
- LE GALL A. (2000). Bilans des minéraux dans les exploitations laitières Bretonnes. *Compte-Rendu EDE-CA de Bretagne – Institut de l'Élevage*.
- LE GALL A., CABARET M.M. (2002). Mise au point de systèmes laitiers productifs et respectueux de l'environnement. *Compte rendu de l'expérimentation conduite à Crécom, CR n°2023301. 170 pages*.
- LEGARTO J., LE GALL A. (1999). Les incidences de la part de maïs et de la prairie sur la qualité en nitrate de l'eau. Etude de deux systèmes de production laitière au Domaine d'Ognoas. *Recueil des communications de la journée "Systèmes laitiers productifs et qualité de l'eau"*, 17-31.
- MARY B., BEAUDOUIN N., JUSTES E., MACHET J. (1999). Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. *European Journal of Soil Science*, 50, 549-566.
- MORVAN T., ALARD V., RUIZ L. (1999). Evolution comparée des risques de pollution azotée en rotation de type herbager. *Actes du colloque « Programme Systèmes Terre et Eau : Systèmes d'élevage herbagers autonomes en Centre Bretagne »*, 167-176.
- RAISON C., PFLIMLIN A., LE GALL A. (2006). Optimisation des pratiques environnementales dans un réseau de fermes laitières de l'Espace Atlantique. Actes du colloque Green Dairy - Systèmes laitiers et environnement. Mieux prendre en compte la diversité régionale grâce aux résultats du projet Green Dairy. *Séminaire final, Rennes 13 et 14 décembre 2006*, 45-67.
- SIMON J.C., LE CORRE L. (1992). Le bilan apparent à l'échelle de l'exploitation agricole. *Fourrages*, 129, 79-94.
- SIMON J.C., VERTES F., LE CORRE L. (1994). Nitrogen balances on a farm scale : results from dairy farms in north west France in *Proceedings of the 15th General Meeting of the European Grassland Federation*, 429-433.
- SIMON J.C. (1995). Les exploitations herbagères de Basse Normandie et l'environnement : estimation de l'excédent d'azote par la méthode du bilan apparent. *Colloque APEX*, avril 1995, 37 pages et annexes.
- SIMON J.C., GRIGNANY C., JACQUET A., LE CORRE L., PAGES J. (2000). Typologie des bilans d'azote de divers types d'exploitations agricoles : recherche d'indicateurs de fonctionnement. *Agronomie*, 20, 175-195.
- TAUBE F., CONIJN J.G (2007). Grassland renovation in Northwest Europe : current practices and main agronomic and environmental questions. In *"Grassland resowing and grass-arable crop rotations", third and fourth workshop of EGF-Working Group "Grassland Resowing and Grass-arable rotations". Luzern Switzerland, 21-24 June 2004. Maastricht, the Netherlands, 24-26 October 2005*.35-37
- TURNER B.L., HAYGARTH P.M. (2000). Phosphorus forms and concentrations in leachate under four grassland soil types. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 1090-1099.
- TOOR G., CONDRON L.M., DI H.J., CAMERON K.C., SIMS T. (2004). Assessment of phosphorus leaching losses from a free draining grassland soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 69, 167-184.
- VÉRON J. ET LE GALL A. (1997). Bilan des minéraux N-P-K dans les exploitations laitières en Pays de la Loire. In *Résultats de la recherche en production laitière 1997*, 36-39.
- VERBRUGEN I., CARLIER L., VAN BOCKSTAELE E. (1994). Surplus on nitrogen on dairy farms in Belgium. In *Proceeding of the 15th General meeting of the European Grassland Federation*, 463-465.
- VERSTRATEN F. (1995). La production laitière aux Pays-Bas face aux nouvelles contraintes d'environnement. *Fourrages*, 144, 169-180.
- VERTES F., LAURENT F., RECOUS S., LETERME P., MARY B. (1999). Nitrogen mineralization after destruction of grazed pastures. Congrès BSSS "Sustainable management of soil organic matter"-Edinburgh 15-17 septembre 1999.
- VERTES, F.; LEMERCIER, B.; MOREL, C. (2005). Evolution of phosphorus status during 30 years in soils receiving high amounts of slurries in a farm monitoring network : description of the temporal trend. *International workshop on Green Pork Production "Porcherie Verte" a research initiative on environment-friendly pig production. 25-27 mai 2005, Paris, FR.*, 77-78
- VERTES F., HATCH D., VELTHOF G., TAUBE F., LAURENT F., LOISEAU P., RECOUS S. (2007) Short-term and cumulative effects of grassland cultivation on nitrogen and carbon cycling in ley-arable rotations. In *"Permanent and temporary grassland : Plant, Environment, Economy"*, 14th EGF Meeting, Ghent (B) De Vliegher A. and Carlier L. (eds), *Grassland Science in Europe*, 12, 227-247.