



HAL
open science

Bouclage des cycles de nutriments au sein d'un système d'élevage herbager biologique

El-Hadi Zenboudji

► **To cite this version:**

El-Hadi Zenboudji. Bouclage des cycles de nutriments au sein d'un système d'élevage herbager biologique. Sciences du Vivant [q-bio]. 2012. hal-02803190

HAL Id: hal-02803190

<https://hal.inrae.fr/hal-02803190v1>

Submitted on 5 Jun 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.



UNIVERSITÉ
DE LORRAINE



Institut National de la Recherche Agronomique

2011-2012

MASTER FAGE
Biologie et Ecologie pour la Forêt, l'Agronomie
et l'Environnement

Spécialité BASE
Biologie Animale et Systèmes d'Elevage Aquatiques et Terrestres

**Bouclage des cycles de nutriments au sein d'un système
d'élevage herbager biologique**

El-Hadi ZENBOUDJI

Mémoire de stage, soutenu à Nancy le 04/09/2012

Maître de stage : Jean-Louis FIORELLI, Ingénieur de Recherche

Tuteur universitaire : Guido RYCHEN, Professeur ; ENSAIA, 2 Avenue de la forêt de Haye, 54500 Vandoeuvre les Nancy

Structure d'accueil : Institut National de la Recherche Agronomique ; Département SAD ; Unité ASTER, 662 Avenue Louis Buffet, 88500 Mirecourt

Remerciements

En préambule à ce rapport, je souhaitais adresser mes remerciements les plus sincères à mon Maître de Stage, Monsieur Jean-Louis Fiorelli, qui m'a dirigé, conseillé et apporté son aide durant toute la durée du stage.

Je tiens à remercier également Monsieur Jean-Marie Trommenschlager qui s'est chargé de mettre à ma disposition toutes les données qui m'ont permis de mener à bien mon travail.

Aussi, je tiens à remercier mes colocataires du « local stagiaire » avec lesquels j'ai partagé plus qu'un rythme de vie.

Mes remerciements s'adressent à l'ensemble du personnel de l'INRA de Mirecourt qui m'a permis de vivre une période de stage très agréable dans un cadre de travail à la fois scientifique et humain.

Je n'oublie pas mes chers parents ainsi que toute ma famille pour leur soutien et leur patience.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis qui m'ont toujours soutenu et encouragé afin d'aller jusqu'au bout de mes efforts.

Merci à toutes et à tous.

Liste des abréviations

ADL : Lignine aux détergents acides
Bov : Bovin
C : Carbone
CO₂ : Dioxyde de carbone
CORPEN : Comité d'Orientation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'Environnement
EE : Extrait Ethéré
EMEP : European Monitoring and Evaluation Programme
GES : Gaz à Effet de Serre
Gg : Gigagramme
Gn : Génisse
ha : Hectare
Hn : Holstein
JP : Journée de pâturage
K : Potassium
Kg : Kilogramme
L : Litre
MAD : Matière Azotée Digestible
MAT : Matière Azotée Totale
mg : Milligramme
mm : Millimètre
Mo : Montbéliarde
MO : Matière Organique
MS : Matière Sèche
N : Azote
N₂ : Diazote
N₂O : Protoxyde d'azote
NH₃ : Ammoniac
NH₄⁺ : Ammonium
P : Phosphore
P₂O₅ : Pentoxyde de phosphore
SH : Système Herbager
SPCE : Système Polyculture-Elevage
T : Tonne
TB : Taux Butyreux
TP : Taux Protéique
VL : Vache laitière
VI : Vache en lactation
Vta : Vache en tarissement
Vx : Veaux
ZF : Zone de fertilité
UGB : Unité Gros Bétail

Sommaire

Introduction

I. Partie bibliographique

1. Présentation de l'Installation Expérimentale INRA de Mirecourt
 - a) Missions
 - b) Contexte
 - c) Objectif du stage
2. Systèmes agricoles à bas-intrants
 - a) L'agriculture à bas-intrants
 - b) Pratiques et traits de fonctionnement du Système d'élevage Herbager de l'INRA Mirecourt
3. Gestion des flux de matières et de nutriments
 - a) Flux de matières dans une exploitation agricole
 - b) Cascade de l'azote dans une exploitation agricole
 - c) Séquestration de carbone dans une exploitation agricole
 - d) Flux de phosphore dans une exploitation agricole
 - e) Flux de potassium dans une exploitation agricole
4. Bilans des nutriments
 - a) Définition
 - b) Types de bilans
 - c) Modèles de calcul des bilans

II. Partie expérimentale

1. Matériel et méthode
 - a) Matériel
 - b) Méthode
 - Modèle retenu
 - Estimation des termes du bilan
 - b-1 Les entrées
 - b-2 Les sorties
2. Résultats et discussion
 - a) Bilan Azote
 - b) Bilan Phosphore
 - c) Bilan Potassium
 - d) Bilan Carbone

Conclusion

Références

bibliographique

Introduction

L'agriculture d'aujourd'hui cherche, autant que possible, à intégrer la protection de l'environnement qui commence à occuper une place importante dans toutes les sociétés. De la lutte contre le réchauffement climatique à celle de l'eutrophisation des milieux aquatiques et édaphiques, en passant par la préservation des ressources naturelles, les gouvernements agissent activement en tentant de mettre en œuvre des politiques incitant un meilleur respect de l'environnement.

Ce respect commence par une meilleure économie d'utilisation des nutriments, qui doit elle-même s'accompagner d'une meilleure efficacité de ces nutriments, notamment ceux pouvant constituer un risque pour l'environnement. Aussi, une meilleure gestion des flux de matière, et donc des flux de nutriments, revêt un enjeu considérable.

De longue date, les scientifiques se sont intéressés aux flux des éléments et aux cycles biogéochimiques mais l'urgence de maîtriser les multiples impacts environnementaux de l'intensification agricole et les interactions avec le changement climatique ont renouvelé et globalisé ces travaux. Les exploitations agricoles en général, et les élevages en particulier consomment souvent beaucoup d'intrants (aliments, fertilisants,...) avec une efficacité parfois très faible et peu acceptable aux plans économique et écologique..

C'est à partir de là que la notion de Bilan s'est imposée afin d'estimer les entrées de nutriments et leurs sorties, de l'échelle de l'animal à celle de l'exploitation, et déduire ainsi ce qui n'est pas valorisé, voire ce qui est perdu. Plusieurs modèles ont été élaborés afin de renseigner ces bilans et de les utiliser en tant qu'indicateurs de risques pour l'environnement. Les acteurs agricoles sont également concernés puisque c'est en adaptant leurs pratiques que les exigences environnementales actuelles pourront être atteintes.

Le travail que nous nous proposons d'effectuer consiste en une estimation du « degré de bouclage » des cycles des éléments N, P, K et C pour apprécier la dynamique de fertilité des sols et les pertes associées au fonctionnement du système herbager biologique de l'installation expérimentale de l'unité INRA SAD ASTER de Mirecourt. Afin de mener à bien ce travail, nous cherchons à répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont les principales composantes, pratiques et traits de fonctionnement du système qui sont les plus en cause dans la dynamique des flux de matières au sein de l'Installation Expérimentale (I.E.) ?
- Quels nutriments composant la matière peuvent être considérés dans le cadre de calculs de bilans ?
- Quelle méthode retenir afin d'évaluer les bilans des nutriments dans le cas du système herbager de l'I.E. ?

I. Partie bibliographique

1. Présentation de l'Installation Expérimentale INRA de Mirecourt

L'unité ASTER (AgroSystèmes TErritoires Ressources) est une Unité propre de Recherche du Département SAD (Sciences pour l'Action et le Développement) de l'INRA. Elle comprend une Installation Expérimentale constituée d'une exploitation intégrant deux systèmes d'élevage bovin laitier, l'un de polyculture-élevage (SPCE) l'autre herbager (SH). Elle est localisée sur le site de Mirecourt et fait partie du Centre INRA de Nancy.

Le territoire de l'installation expérimentale comprend 110 ha de surfaces cultivables et 130 ha de surfaces non cultivables. Ce territoire a été configuré *(i)* en 4 blocs de culture considérant l'hétérogénéité des parcelles cultivables, et *(ii)* en îlots de prairie permanente pour les parcelles non cultivables (Coquil et al, 2010). L'exploitation comporte une salle de traite unique.

a) Missions

La thématique centrale de l'unité ASTER est organisée autour du triptyque activités agricoles, territoires et environnement dans le cadre d'un projet initié en 2004. Elle vise à comprendre les dynamiques de changement des systèmes techniques agricoles dans les territoires dans le but d'accompagner les transitions de ces systèmes vers une meilleure prise en compte des ressources territoriales. Au sein du Centre de Nancy, le projet de l'unité contribue à la thématique « Agriculture économe et autonome pour un développement durable des territoires ».

Les deux premières missions de l'unité sont à destination du monde de la recherche, visant à *(i)* produire des connaissances scientifiques et des méthodes sur l'innovation et les dynamiques de changement en agriculture dans les territoires ruraux et à *(ii)* développer des instruments mis à la disposition de communautés scientifiques. La troisième mission est à destination des partenaires socio-économiques et des pouvoirs publics ; elle vise à produire des connaissances opérationnelles et des outils pour guider l'action dans le cadre de partenariats diversifiés avec des agriculteurs, des acteurs des milieux agricoles et ruraux (organismes de développement agricole, gestionnaires de ressources naturelles) et des pouvoirs publics (ministères, collectivités territoriales).

b) Contexte

Le contexte de ce sujet de stage s'est dessiné autour des enjeux du développement durable. Les enjeux environnementaux caractérisés par la lutte contre : les pollution des nappes aquifères, des sols et de l'air (liées principalement à N et P), l'eutrophisation des milieux aquatiques (notamment par le P) ; les enjeux agronomiques englobant les modalités de gestion de la fertilisation organique, l'optimisation de l'efficacité des nutriments, les activités assurant la séquestration de carbone dans le sol, etc. ainsi que les enjeux socio-économiques autour de la question de l'autonomie en intrants et des pratiques à favoriser pour concilier production agricole et préservation/valorisation de l'environnement.

c) Objectif du stage

A court terme, l'objectif de ce travail est d'arriver à concevoir une méthode de calcul du bilan de nutriments, adaptée aux conditions de l'expérimentation système, au niveau des parcelles de prairie puis sur le parcellaire du système herbager ; la finalité étant de mettre en exergue la dynamique de fertilité du territoire SH sur la période allant de 2005 à 2011 (sept campagnes).

A moyen et long terme, rendre accessibles ces résultats et les connaissances issues de ce travail aux acteurs de la filière, à commencer par les éleveurs eux-mêmes, afin qu'ils prennent la mesure de leurs pratiques. On pourrait imaginer qu'il puisse en résulter une amélioration de leurs pratiques et à tout le moins que les éleveurs s'approprient tout ou partie des enjeux du développement durable ainsi que de la protection de l'environnement.

2. Systèmes agricoles à bas-intrants

a) L'agriculture à bas intrants

Depuis l'avènement de l'Agriculture Biologique, les termes de préservation des agrosystèmes et de la biodiversité, le respect des cycles des éléments, penser l'agriculture durable, sont de plus en plus récurrents dans les sociétés, mais souvent mal renseignés ou utilisées à des fins de marketing. Initialement, le mouvement de l'agriculture biologique s'est constitué en réaction à l'avènement de l'agrochimie, au milieu du XX^e siècle, et notamment au développement de l'usage des engrais minéraux industriels (Années 1970).

L'agriculture conventionnelle utilise en grande partie des intrants achetés et souvent onéreux (engrais industriels et produits phytosanitaires) alors que l'AB s'appuie sur le recyclage de la matière organique qu'elle a produite (effluents d'élevage par exemple). L'objectif d'une agriculture plus autonome est de chercher à valoriser au mieux les ressources présentes sur l'exploitation avant d'envisager des achats de l'extérieur.

Au-delà des fertilisants industriels (qui fournissent de l'azote, de l'acide phosphorique et de la potasse), les aliments achetés par la ferme représentent une source majeure de carbone intrant. Aussi, une grande autonomie fourragère au sein de l'exploitation doit passer par une meilleure gestion des flux de matière en général, du carbone et de l'azote en particulier. Dans certains cas, cette plus forte autonomie fourragère s'accompagnera d'une réduction du cheptel.

b) Pratiques et traits de fonctionnement du Système d'élevage Herbager de l'INRA Mirecourt

Au niveau de l'installation expérimentale, chaque système assure son autonomie fourragère. Le SPCE assure l'autonomie en paille et en concentrés des deux systèmes, le SH lui rétrocède du fumier.

Les objectifs généraux du SH (configuré en 2004) consistent à assurer la pérennité d'un troupeau laitier très économe. Pour ce faire, son alimentation est fondée sur une maximisation du pâturage et une absence du recours aux aliments concentrés (excepté pour les veaux). Certaines installations ont été spécialement réalisées (logettes équipées de matelas pour le couchage des vaches laitières, fosse à lisier) de manière à limiter l'utilisation de paille. Les principales pratiques mises en place au fur et à mesure des campagnes ainsi que les traits de fonctionnement en cause dans la dynamique des flux de matière sont :

Effectifs animaux :

Le troupeau SH est composé d'environ 40 vaches laitières (VL) et sa suite, de races Montbéliarde (Mo) et Holstein (Hn). Il a été conduit en vêlages groupés sur 3 mois, d'abord de mi-février à mi-mai de 2005 à 2007, puis la période de vêlages a été avancée d'un mois depuis 2008 (de mi-janvier à mi-avril). Durant les sept campagnes considérées, les effectifs animaux

entre les différentes catégories¹ ont varié. Outre les variations des effectifs entre les catégories pouvant se retrouver d'une campagne à une autre, il y eut aussi des catégories animales créées ponctuellement par choix expérimental. Ce fut le cas pendant deux années (d'octobre 2008 à novembre 2010) où, pour résorber un excédent de stock de foin, des bœufs ont été élevés et engraisés. Cette catégorie a disparu sitôt les bœufs vendus après leur engraissement au pâturage.

Mouvements fonciers :

Depuis la conversion de 2004-2005, le territoire du SH comprend un jeu de parcelles réparties en quelques îlots, distribués suivant la diversité des conditions de milieu (Joly, Murget, Etang, Domvallier, etc.). Les composantes de ce foncier n'ont pas changé excepté pour deux parcelles très productives qui sont passées au système polyculture-élevage depuis l'automne 2009 : Joly 8-9 bas et Joly 8-9 haut (pour une superficie cumulée de 3,16 ha).

Parcelles et fonctions particulières :

Le SH comporte un ensemble de 42 parcelles de prairies permanentes relativement groupées (75,5 ha depuis 2010), progressivement désintensifiées au cours des 20 dernières années (Fiorelli et al., 2010). Ces parcelles sont globalement affectées à trois catégories d'animaux : les vaches laitières, les veaux et les génisses. La surface moyenne des parcelles est de 1.6 ha (plus de 80% d'entre elles se situant entre 1 et 2 ha). Leur portance est réputée satisfaisante pour 75% d'entre elles, la même proportion présentant un abri naturel (haies) ; par ailleurs, 85% des parcelles comporte un point d'abreuvement.

La sectorisation du parcellaire simplifie la conduite des multiples lots en limitant les déplacements d'animaux au cours de la campagne de pâturage, et permet la mise en œuvre d'une conduite en alternance fauche/pâturage dans l'ensemble des îlots (pâturage tournant facilité par l'existence d'un secteur de fauche permettant une extension estivale de la surface pâturée).

Certaines parcelles du système herbager (comme du SPCE) comportent une ou plusieurs zones de prélèvement à des fins d'analyses diverses (sol, flore, biomasse,...), ce sont les Zones de Fertilité (ZF). Elles sont au nombre de 17 sur l'ensemble du SH et occupent une surface de 900m².

Modes d'exploitation des parcelles :

Le pâturage des vaches laitières est à faible durée de séjour par parcelle (de l'ordre de quelques jours). La mise à l'herbe est précoce (en général à partir de la seconde quinzaine de mars) si les conditions de portance et d'ambiance le permettent, y compris en cas de faible disponibilité d'herbe. Une complémentation en foin est distribuée durant la période de transition printanière au cours de laquelle le troupeau passe la nuit à l'étable, mais peut se poursuivre jusqu'au début du mois de juin (cas des vaches et génisses en période de reproduction). En été et en début d'automne, un déficit hydrique peut également conduire à distribuer une complémentation en foin pour sécuriser l'alimentation des vaches laitières et des génisses. A l'automne, une complémentation en foin reprend généralement au cours du mois d'octobre, environ un mois avant la rentrée en stabulation. La durée totale du pâturage s'est étendue de 230 à 250 jours avec au moins 200 jours de pâturage jour et nuit.

La conduite des récoltes a souvent recours au déprimage. Ce premier pâturage (souvent précoce) consiste, pour ce système d'élevage, à sortir les animaux afin de réduire leur séjour en

¹ Vaches (lactantes/taries), Génisses, Taureaux, Bœufs et Veaux.

stabulation, diminuant ainsi le recours aux fourrages stockés (par prélèvement de l'herbe d'hiver) et limitant le volume des effluents produits (capacité de stockage limitée). Le déprimage est réalisé sur les parcelles considérées portantes quand les conditions d'ambiance le permettent. Les récoltes concernent le foin (généralement entre fin mai et début juillet) ainsi que le regain (généralement entre début août et fin septembre). Elles sont réalisées le plus souvent deux à trois jours après la fauche. Les parcelles récoltées le sont soit exclusivement (July 15) soit en alternance avec le pâturage (Domvalier 4, Haut de Vigne 1, ...). Concernant le secteur VL, il a été retenu le choix de récolter les parcelles qui sont les plus éloignées de la salle de traite comparées à celles principalement pâturées qui sont les plus proches (74% des parcelles VL s'en trouvent à moins de 600m).

Epanchages des effluents d'élevage :

Au cours des sept campagnes 2005 à 2011, la fertilisation des prairies au sein de l'expérimentation-système a consisté en i) une suppression des apports d'effluents pour les prairies uniquement pâturées, sur la base du principe que l'essentiel des prélèvements d'éléments minéraux était compensé par les déjections animales émises au pâturage, ii) un apport d'effluents d'élevage sur les prairies fauchées, dans la limite des quantités disponibles, en privilégiant les prairies les plus fréquemment fauchées pour entretenir leur niveau de fertilité. Le SH génère principalement du lisier (stabulation des vaches laitières), ainsi que du fumier produit par les génisses (mais également les vaches et les veaux). Les effluents englobent également du purin ainsi que les eaux blanches, vertes et brunes.

Les épanchages des effluents d'élevage peuvent être réalisés durant plusieurs périodes de l'année en fonction de la réglementation, des capacités de stockage des effluents, de la nature de ces effluents, des conditions climatiques, des parcelles sur lesquelles ils sont réalisés et des choix adoptés. Dans un souci de cohérence expérimentale, une parcelle fertilisée au niveau du SH l'est entièrement ou pas du tout.

3. Gestion des flux de matières et de nutriments

a) Flux de matières dans une exploitation agricole

Les systèmes laitiers consomment de l'azote et du phosphore, principalement sous forme d'engrais et d'aliments pour assurer leur production (Raison et al., 2008). Cependant, ces intrants sont souvent (très) excédentaires par rapport aux exportations par le lait, la viande et les cultures. Il en résulte des pertes parfois importantes 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 économiques ; il faut donc rechercher la meilleure efficacité des intrants. Aussi, ces derniers peuvent être réduits considérablement, surtout en matière d'aliments, notamment en « réhabilitant » les prairies.

De plus, les prairies participent grandement à la régulation des cycles biogéochimiques, contribuant notamment à l'accumulation de la matière organique dans les sols, à la séquestration de C atmosphérique et à l'atténuation des risques d'entraînement de l'azote vers les hydrosystèmes (Chabbi et Lemaire, 2007).

b) Cascade de l'azote dans une exploitation agricole

La notion de cascade de l'azote (Figure 1) traduit le cheminement de l'azote réactif à travers les gains, les pertes, les transferts entre milieux et les différents impacts sur la biosphère, la pédosphère et l'atmosphère (INRA, 2012). Cet azote réactif est initialement introduit dans un territoire par des processus naturels ou par l'action de l'homme (ou conjointement).

Le cycle de l'azote est particulièrement complexe dans les exploitations d'élevage (en particulier en production laitière) en raison de la diversité et de l'importance des flux mis en jeu, des phénomènes de recyclage, des interactions entre facteurs, très divers et variables : pratiques de fertilisation, types de couverts végétaux, caractéristiques des sols et des climats, impacts des animaux au pâturage, etc. (Vertès et al., 2008). Chaque année, en climat tempéré, 1 à 2% des réserves d'azote organique passent à l'état nitrique disponible pour la plante : c'est la minéralisation (INRA, 2012). L'acidification du milieu (accumulation de NH_4^+) permet de réduire les émissions de NH_3 (gaz toxique), et donc diminue les pertes d'azote (CORPEN, 2006).

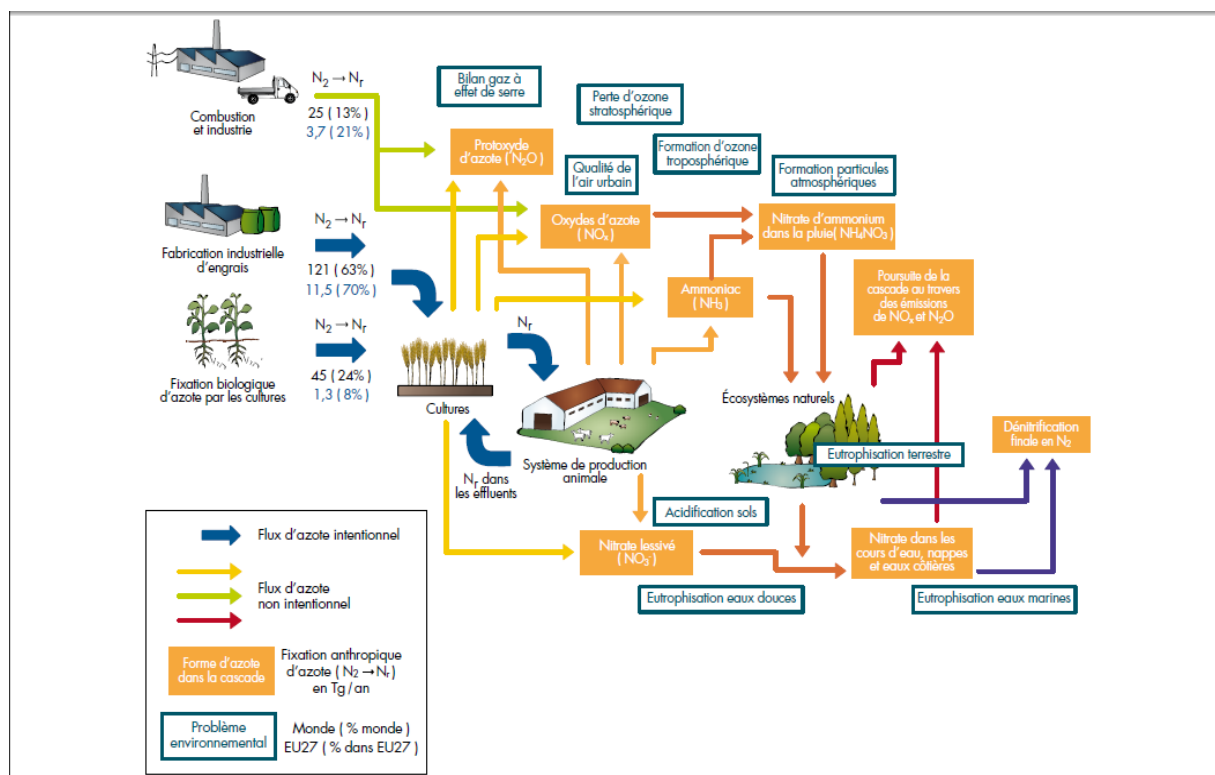


Figure 1 : Schéma général de la cascade d'azote

L'efficacité alimentaire de l'azote est beaucoup plus réduite chez les animaux d'élevage que chez les végétaux (INRA, 2012). La faible valorisation de l'azote ingéré par les animaux se traduit par un très haut niveau de recyclage à l'échelle de la parcelle (restitution par les déjections de 75 à 90% de l'azote ingéré pour des prairies pâturées) et de l'exploitation (Delaby et al., 1997). La diversité et l'importance des flux d'azote mis en jeu dans une exploitation multiplient les risques de pertes, sous diverses formes : nitrique par lixiviation, ammoniacale par volatilisation à partir des déjections au pâturage ou en stabulation, ou gazeuse (N_2 , NO_x) par dénitrification (Vertès et al., 2007).

Les déjections du bétail constituent les effluents d'élevage. L'azote contenu dans les effluents bovins constitue les 2/3 de l'azote excrété par l'élevage français (CORPEN, 2006). L'azote des restitutions (animales et/ou végétales) va constituer le stock d'azote du sol. Ce

dernier a tendance à augmenter sous prairie et à diminuer sous cultures (Kelln et al., 2012). Dans le cas de la prairie, ce stock est libéré lors d'un retournement (prairies temporaires, prairies artificielles,...).

L'objectif recherché est d'accroître l'efficacité du N au sein des systèmes de production animale, en clair utiliser moins et mieux l'azote, que ce soit en agriculture conventionnelle (limitation des fuites vers l'environnement) ou en agriculture bio (valoriser au mieux des ressources souvent limitées).

c) Séquestration de carbone dans une exploitation agricole

L'élevage contribue à l'émission d'environ 9% du total des gaz à effet de serre dont le CO₂ d'origine anthropique (Gill et al, 2009). Le CO₂ est utilisé par les organismes autotrophes (notamment les plantes) pour constituer la biomasse grâce à la photosynthèse. Cette biomasse est ensuite transférée au sol et va constituer sa matière organique (Arrouays et al., 2002). Cette dernière est le principal du stock de carbone dans le sol.

Le pouvoir stockant (de carbone) des prairies (notamment pâturées) doit être exploité afin de réduire l'émission des GES d'origine animale (Soussana et al., 2009). Cependant, dans certains cas de systèmes d'élevage ou polyculture-élevage, l'épandage de fumier ou de lisier améliore le stock de C de certaines parcelles au détriment d'autres qui n'en reçoivent pas (surfaces éloignées, en pente, interdiction réglementaire).

Notons que la minéralisation nette des nutriments est plus importante pour les effluents d'élevage que pour les résidus végétaux ; d'où l'introduction d'engrais verts envisagée comme technique de fertilisation pour maintenir la cinétique de stockage de C. La plupart des mécanismes impliqués dans la formation de l'azote stable participent aussi à la stabilisation du carbone dans le sol (Chabbi et Lemaire, 2007)

Stocker plus de carbone dans le sol doit passer par certaines modifications des usages du sol (Arrouays et al., 2002) notamment en revenant à l'exploitation des prairies (avec désintensification pour celles qui sont très fertiles). Aussi, différentes pratiques d'élevage peuvent accompagner ces modifications, la maximisation du pâturage et la limitation des concentrés en l'occurrence.

Le stockage du C dans le sol ne constitue pas une solution à long terme car les terres agricoles mobilisables sont en quantité finie ; aussi, il y a une limite à la cinétique de stockage : après quelques dizaines d'années, le stock de carbone n'augmente plus, cependant et, de plus, sa conservation nécessite obligatoirement le maintien des mêmes pratiques qui ont assuré son accumulation (Arrouays et al., 2002).

Le réchauffement climatique à un effet paradoxal : d'une part, par l'accumulation de CO₂ puis photosynthèse, il permet la production de biomasse, qui va constituer par la suite la matière organique du sol donc une activité « stockante » ; et d'autre part, l'élévation de la température provoquée par ce réchauffement induit une cinétique de minéralisation de la matière organique présente dans le sol et donc une activité « déstockante » (Soussana et al., 2009). Le bilan entre ces deux phénomènes doit impérativement être favorable au stockage de carbone dans le sol si l'on souhaite limiter l'ampleur du réchauffement. Il est à préciser que la cinétique de stockage du C dans le sol est beaucoup moins rapide que celle de son déstockage.

d) Flux de Phosphore dans une exploitation agricole

La quantité de phosphore minéral présente dans un sol est une conséquence directe de la richesse de la roche mère. Le phosphore organique est l'objet d'une lente minéralisation qui le rend progressivement disponible pour les végétaux (Möller, 2009). Les prélèvements de P_2O_5 par les plantes entraînent un épuisement relativement rapide des formes solubles.

Le phosphore est fortement retenu dans le sol, à la différence de l'azote nitrique. Aussi, les risques de pertes de phosphore sont beaucoup plus faibles que pour l'azote. Celles-ci sont essentiellement dues au ruissellement et à l'érosion, le phosphore étant entraîné avec les fines particules du sol (Kelln et al., 2012). Quand elles se produisent, ces pertes peuvent, en combinaison avec l'azote, générer des phénomènes d'eutrophisation des milieux situés en aval (milieux aquatiques par exemple).

e) Flux de potassium dans une exploitation agricole

Il se trouve en abondance dans le sol car toutes les roches en contiennent, surtout les roches cristallines et les minéraux argileux. Il peut se trouver dans le sol sous deux formes (Nesme, 2012) :

- Potassium échangeable, libre dans la solution du sol ou fixé sur les surfaces externes des argiles,
- Potassium fixé à l'intérieur des feuillets d'argile (mobilisable à plus long terme).

Les fourrages récoltés sur prairies sont bien pourvus en azote ainsi qu'en potassium, tandis que le phosphore est moins bien représenté (Möller, 2009). La question du bouclage du cycle de potassium, en particulier dans le cas des prairies permanentes, est moins préoccupante que celui de l'azote ou encore du phosphore.

4. Bilans des nutriments

a) Définition

Le bilan des nutriments prend en compte les entrées et les sorties d'éléments nutritifs au sein d'une surface (parcelle, agrosystème, ...) connue et sur une période définie. Les agrosystèmes, par leur nature, leurs fonctions et leur complexité imposent la construction de bilans de nutriments « personnalisés » (Scholefield, 1991). Cette construction prend également en compte le niveau de précision qu'on se fixe pour renseigner les différents termes du bilan.

Le solde du bilan (excédent de minéraux) permet d'évaluer l'efficacité du système d'exploitation du point de vue de la valorisation des minéraux et mesure son potentiel polluant, sans toutefois présumer du devenir de l'excédent. En réduisant les pertes, on va réduire les intrants et les coûts et au final gagner en autonomie. On réduit aussi les fuites vers l'environnement, donc certains risques de pollution. Le bilan des minéraux est utilisable individuellement sur une exploitation pour mesurer d'année en année les progrès accomplis.

b) Types de bilans

Le bilan apparent à l'exploitation

Aussi appelé « bilan des minéraux » considère l'exploitation comme une boîte noire et comptabilise toutes les entrées (achats d'engrais, aliments du bétail, effluents importés) et les sorties (produits de vente, effluents). Le solde du bilan intègre donc toutes les pertes d'un nutriment donné sans toutefois permettre de distinguer ces différentes formes de perte (INRA, 2012). Ce bilan ne fait aucune hypothèse sur les flux internes au système. Il permet, dans le cas de

l'azote (et également pour les autres nutriments), d'évaluer de façon robuste à l'échelle de l'exploitation toute innovation introduite se traduisant par des changements d'entrées ou sorties (Simon et al., 1997).

Le bilan « sol-surface »

Egalement appelé « sol-culture » ou « sol-végétation » calcule un solde entre les apports de nutriments sur les surfaces incluant les engrais organiques ou de synthèse et les exports par les cultures récoltées ou pâturées. Si on s'intéresse à l'azote, ce solde correspond aux différentes pertes vers l'eau, aux pertes gazeuses liées à l'épandage ainsi qu'aux différences de stock d'azote du sol (CORPEN, 2006). Dans un système conventionnel n'intégrant pas d'élevage, ce bilan se confond avec le bilan apparent (Küstermann et al., 2010). Quand il y a de l'élevage, ce bilan ne va concerner qu'une partie de l'exploitation et n'intégrera pas toutes les sources d'entrées et de pertes au niveau de l'exploitation (INRA, 2012).

Le bilan « sol-système »

Selon la définition donnée par l'expertise collective (INRA, 2012) sur l'azote, ce bilan prend en compte tous les flux d'origine externes auxquels sont ajoutés les flux d'azote issus des transformations de la matière organique et de l'azote dans le sol ainsi que les flux internes (effluents d'élevage notamment). Un exemple typique est le bilan de masse à la parcelle, qui met la fertilisation azotée au cœur du raisonnement des enjeux liés à la culture.

c) Modèles de calcul des bilans

Les modèles présentés ci-après concernent le calcul du bilan d'azote. Néanmoins ils restent relativement transposables aux autres nutriments. Ces modèles jouent sur le fait que les composantes d'un agrosystème sont liées par les flux de nutriments (Küstermann et al., 2010) ; l'élevage intégré à une exploitation de polyculture (avec éventuellement une production fourragère, exploitation des prairies,...) en est un parfait exemple.

Bascule : Ce modèle proposé par Marc Benoît (1992) est inspiré de la méthode sol-surface. Il considère la ferme comme une somme de parcelles ; il s'agira en quelque sorte de la somme des bilans à la parcelle, de toutes les parcelles exploitées de la ferme (entrées sous forme de déjections et apports de fertilisants et sorties calculées en fonction du rendement). Les excédents de chaque bilan parcelle sont additionnés en prenant soin d'exclure les éventuels soldes négatifs (Benoît, 1992) sous prétexte que les parcelles qui présentent ces soldes négatifs viennent abaisser « artificiellement » le résultat du bilan total. Ce type de démarche a le mérite de faire un tour d'horizon exhaustif de la fertilisation pour chaque parcelle pour une année considérée. Cependant, il présente l'inconvénient de demander beaucoup de temps et de se baser sur une description des pratiques au dire de l'agriculteur, sans moyen de préciser l'information. Aussi, il ne donne pas un point de vue global sur l'ensemble du système de production et il appréhende difficilement le pâturage. Pour Benoît, la difficulté de prise en compte du pâturage réside dans la quantification des déjections animales plus que dans le prélèvement d'herbe du troupeau.

Azopât : Est un modèle qui s'intéresse au bilan de l'azote en conditions de pâturage. Bien que représenté différemment selon les auteurs, le cycle de l'azote en prairie pâturée se résume systématiquement à un ensemble de flux entre les trois pools du système : le sol, la plante et l'animal (Delaby et al., 1997). La parcelle pâturée, qui englobe ces trois pools, se caractérise alors par des entrées et des sorties d'azote bien définies, suivant le système qu'elle intègre et les modes d'exploitation qu'elle subit. Il est à noter que ce modèle est l'un des rares à prendre en considération les apports atmosphériques.

Modèle « Farruggia » : Ce modèle (dérivé d'Azopât) a été envisagé par Farruggia, Delaby et Decau. Il consiste en un calcul du bilan au niveau du couvert tel qu'il est exploité (Farruggia et al., 1997). Ces auteurs préconisent ainsi l'estimation des apports fertilisants et des aliments complémentaires (sans oublier la fixation symbiotique et les dépôts atmosphériques) au titre des entrées; et en terme de sorties, la prise en compte des récoltes, des produits animaux et les déjections hors parcelle.

III. Partie bibliographique

4. Présentation de l'Installation Expérimentale INRA de Mirecourt

L'unité ASTER (AgroSystèmes TERRitoires Ressources) est une Unité propre de Recherche du Département SAD (Sciences pour l'Action et le Développement) de l'INRA. Elle comprend une Installation Expérimentale constituée d'une exploitation intégrant deux systèmes d'élevage bovin laitier, l'un de polyculture-élevage (SPCE) l'autre herbager (SH). Elle est localisée sur le site de Mirecourt et fait partie du Centre INRA de Nancy.

Le territoire de l'installation expérimentale comprend 110 ha de surfaces cultivables et 130 ha de surfaces non cultivables. Ce territoire a été configuré (*i*) en 4 blocs de culture considérant l'hétérogénéité des parcelles cultivables, et (*ii*) en îlots de prairie permanente pour les parcelles non cultivables (Coquil et al, 2010). L'exploitation comporte une salle de traite unique.

d) Missions

La thématique centrale de l'unité ASTER est organisée autour du triptyque activités agricoles, territoires et environnement dans le cadre d'un projet initié en 2004. Elle vise à comprendre les dynamiques de changement des systèmes techniques agricoles dans les territoires dans le but d'accompagner les transitions de ces systèmes vers une meilleure prise en compte des ressources territoriales. Au sein du Centre de Nancy, le projet de l'unité contribue à la thématique « Agriculture économe et autonome pour un développement durable des territoires ».

Les deux premières missions de l'unité sont à destination du monde de la recherche, visant à (*i*) produire des connaissances scientifiques et des méthodes sur l'innovation et les dynamiques de changement en agriculture dans les territoires ruraux et à (*ii*) développer des instruments mis à la disposition de communautés scientifiques. La troisième mission est à destination des partenaires socio-économiques et des pouvoirs publics ; elle vise à produire des connaissances opérationnelles et des outils pour guider l'action dans le cadre de partenariats diversifiés avec des agriculteurs, des acteurs des milieux agricoles et ruraux (organismes de développement agricole, gestionnaires de ressources naturelles) et des pouvoirs publics (ministères, collectivités territoriales).

e) Contexte

Le contexte de ce sujet de stage s'est dessiné autour des enjeux du développement durable. Les enjeux environnementaux caractérisés par la lutte contre : les pollution des nappes aquifères, des sols et de l'air (liées principalement à N et P), l'eutrophisation des milieux aquatiques (notamment par le P) ; les enjeux agronomiques englobant les modalités de gestion de la fertilisation organique, l'optimisation de l'efficacité des nutriments, les activités assurant la séquestration de carbone dans le sol, etc. ainsi que les enjeux socio-économiques autour de la question de l'autonomie en intrants et des pratiques à favoriser pour concilier production agricole et préservation/valorisation de l'environnement.

f) Objectif du stage

A court terme, l'objectif de ce travail est d'arriver à concevoir une méthode de calcul du bilan de nutriments, adaptée aux conditions de l'expérimentation système, au niveau des parcelles de prairie puis sur le parcellaire du système herbager ; la finalité étant de mettre en exergue la dynamique de fertilité du territoire SH sur la période allant de 2005 à 2011 (sept campagnes).

A moyen et long terme, rendre accessibles ces résultats et les connaissances issues de ce travail aux acteurs de la filière, à commencer par les éleveurs eux-mêmes, afin qu'ils prennent la mesure de leurs pratiques. On pourrait imaginer qu'il puisse en résulter une amélioration de leurs pratiques et à tout le moins que les éleveurs s'approprient tout ou partie des enjeux du développement durable ainsi que de la protection de l'environnement.

5. Systèmes agricoles à bas-intrants

c) L'agriculture à bas intrants

Depuis l'avènement de l'Agriculture Biologique, les termes de préservation des agrosystèmes et de la biodiversité, le respect des cycles des éléments, penser l'agriculture durable, sont de plus en plus récurrents dans les sociétés, mais souvent mal renseignés ou utilisées à des fins de marketing. Initialement, le mouvement de l'agriculture biologique s'est constitué en réaction à l'avènement de l'agrochimie, au milieu du XX^e siècle, et notamment au développement de l'usage des engrais minéraux industriels (Années 1970).

L'agriculture conventionnelle utilise en grande partie des intrants achetés et souvent onéreux (engrais industriels et produits phytosanitaires) alors que l'AB s'appuie sur le recyclage de la matière organique qu'elle a produite (effluents d'élevage par exemple). L'objectif d'une agriculture plus autonome est de chercher à valoriser au mieux les ressources présentes sur l'exploitation avant d'envisager des achats de l'extérieur.

Au-delà des fertilisants industriels (qui fournissent de l'azote, de l'acide phosphorique et de la potasse), les aliments achetés par la ferme représentent une source majeure de carbone intrant. Aussi, une grande autonomie fourragère au sein de l'exploitation doit passer par une meilleure gestion des flux de matière en général, du carbone et de l'azote en particulier. Dans certains cas, cette plus forte autonomie fourragère s'accompagnera d'une réduction du cheptel.

d) Pratiques et traits de fonctionnement du Système d'élevage Herbager de l'INRA Mirecourt

Au niveau de l'installation expérimentale, chaque système assure son autonomie fourragère. Le SPCE assure l'autonomie en paille et en concentrés des deux systèmes, le SH lui rétrocède du fumier.

Les objectifs généraux du SH (configuré en 2004) consistent à assurer la pérennité d'un troupeau laitier très économe. Pour ce faire, son alimentation est fondée sur une maximisation du pâturage et une absence du recours aux aliments concentrés (excepté pour les veaux). Certaines installations ont été spécialement réalisées (logettes équipées de matelas pour le couchage des vaches laitières, fosse à lisier) de manière à limiter l'utilisation de paille. Les principales pratiques mises en place au fur et à mesure des campagnes ainsi que les traits de fonctionnement en cause dans la dynamique des flux de matière sont :

Effectifs animaux :

Le troupeau SH est composé d'environ 40 vaches laitières (VL) et sa suite, de races Montbéliarde (Mo) et Holstein (Hn). Il a été conduit en vêlages groupés sur 3 mois, d'abord de mi-février à mi-mai de 2005 à 2007, puis la période de vêlages a été avancée d'un mois depuis 2008 (de mi-janvier à mi-avril). Durant les sept campagnes considérées, les effectifs animaux

entre les différentes catégories² ont varié. Outre les variations des effectifs entre les catégories pouvant se retrouver d'une campagne à une autre, il y eut aussi des catégories animales créées ponctuellement par choix expérimental. Ce fut le cas pendant deux années (d'octobre 2008 à novembre 2010) où, pour résorber un excédent de stock de foin, des bœufs ont été élevés et engraisés. Cette catégorie a disparu sitôt les bœufs vendus après leur engraissement au pâturage.

Mouvements fonciers :

Depuis la conversion de 2004-2005, le territoire du SH comprend un jeu de parcelles réparties en quelques îlots, distribués suivant la diversité des conditions de milieu (Joly, Murget, Etang, Domvallier, etc.). Les composantes de ce foncier n'ont pas changé excepté pour deux parcelles très productives qui sont passées au système polyculture-élevage depuis l'automne 2009 : Joly 8-9 bas et Joly 8-9 haut (pour une superficie cumulée de 3,16 ha).

Parcelles et fonctions particulières :

Le SH comporte un ensemble de 42 parcelles de prairies permanentes relativement groupées (75,5 ha depuis 2010), progressivement désintensifiées au cours des 20 dernières années (Fiorelli et al., 2010). Ces parcelles sont globalement affectées à trois catégories d'animaux : les vaches laitières, les veaux et les génisses. La surface moyenne des parcelles est de 1.6 ha (plus de 80% d'entre elles se situant entre 1 et 2 ha). Leur portance est réputée satisfaisante pour 75% d'entre elles, la même proportion présentant un abri naturel (haies) ; par ailleurs, 85% des parcelles comporte un point d'abreuvement.

La sectorisation du parcellaire simplifie la conduite des multiples lots en limitant les déplacements d'animaux au cours de la campagne de pâturage, et permet la mise en œuvre d'une conduite en alternance fauche/pâturage dans l'ensemble des îlots (pâturage tournant facilité par l'existence d'un secteur de fauche permettant une extension estivale de la surface pâturée).

Certaines parcelles du système herbager (comme du SPCE) comportent une ou plusieurs zones de prélèvement à des fins d'analyses diverses (sol, flore, biomasse,...), ce sont les Zones de Fertilité (ZF). Elles sont au nombre de 17 sur l'ensemble du SH et occupent une surface de 900m².

Modes d'exploitation des parcelles :

Le pâturage des vaches laitières est à faible durée de séjour par parcelle (de l'ordre de quelques jours). La mise à l'herbe est précoce (en général à partir de la seconde quinzaine de mars) si les conditions de portance et d'ambiance le permettent, y compris en cas de faible disponibilité d'herbe. Une complémentation en foin est distribuée durant la période de transition printanière au cours de laquelle le troupeau passe la nuit à l'étable, mais peut se poursuivre jusqu'au début du mois de juin (cas des vaches et génisses en période de reproduction). En été et en début d'automne, un déficit hydrique peut également conduire à distribuer une complémentation en foin pour sécuriser l'alimentation des vaches laitières et des génisses. A l'automne, une complémentation en foin reprend généralement au cours du mois d'octobre, environ un mois avant la rentrée en stabulation. La durée totale du pâturage s'est étendue de 230 à 250 jours avec au moins 200 jours de pâturage jour et nuit.

La conduite des récoltes a souvent recours au déprimage. Ce premier pâturage (souvent précoce) consiste, pour ce système d'élevage, à sortir les animaux afin de réduire leur séjour en

² Vaches (lactantes/taries), Génisses, Taureaux, Bœufs et Veaux.

stabulation, diminuant ainsi le recours aux fourrages stockés (par prélèvement de l'herbe d'hiver) et limitant le volume des effluents produits (capacité de stockage limitée). Le déprimage est réalisé sur les parcelles considérées portantes quand les conditions d'ambiance le permettent. Les récoltes concernent le foin (généralement entre fin mai et début juillet) ainsi que le regain (généralement entre début août et fin septembre). Elles sont réalisées le plus souvent deux à trois jours après la fauche. Les parcelles récoltées le sont soit exclusivement (July 15) soit en alternance avec le pâturage (Domvalier 4, Haut de Vigne 1, ...). Concernant le secteur VL, il a été retenu le choix de récolter les parcelles qui sont les plus éloignées de la salle de traite comparées à celles principalement pâturées qui sont les plus proches (74% des parcelles VL s'en trouvent à moins de 600m).

Epandages des effluents d'élevage :

Au cours des sept campagnes 2005 à 2011, la fertilisation des prairies au sein de l'expérimentation-système a consisté en i) une suppression des apports d'effluents pour les prairies uniquement pâturées, sur la base du principe que l'essentiel des prélèvements d'éléments minéraux était compensé par les déjections animales émises au pâturage, ii) un apport d'effluents d'élevage sur les prairies fauchées, dans la limite des quantités disponibles, en privilégiant les prairies les plus fréquemment fauchées pour entretenir leur niveau de fertilité. Le SH génère principalement du lisier (stabulation des vaches laitières), ainsi que du fumier produit par les génisses (mais également les vaches et les veaux). Les effluents englobent également du purin ainsi que les eaux blanches, vertes et brunes.

Les épandages des effluents d'élevage peuvent être réalisés durant plusieurs périodes de l'année en fonction de la réglementation, des capacités de stockage des effluents, de la nature de ces effluents, des conditions climatiques, des parcelles sur lesquelles ils sont réalisés et des choix adoptés. Dans un souci de cohérence expérimentale, une parcelle fertilisée au niveau du SH l'est entièrement ou pas du tout.

6. Gestion des flux de matières et de nutriments

f) Flux de matières dans une exploitation agricole

Les systèmes laitiers consomment de l'azote et du phosphore, principalement sous forme d'engrais et d'aliments pour assurer leur production (Raison et al., 2008). Cependant, ces intrants sont souvent (très) excédentaires par rapport aux exportations par le lait, la viande et les cultures. Il en résulte des pertes parfois importantes 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 économiques ; il faut donc rechercher la meilleure efficacité des intrants. Aussi, ces derniers peuvent être réduits considérablement, surtout en matière d'aliments, notamment en « réhabilitant » les prairies.

De plus, les prairies participent grandement à la régulation des cycles biogéochimiques, contribuant notamment à l'accumulation de la matière organique dans les sols, à la séquestration de C atmosphérique et à l'atténuation des risques d'entraînement de l'azote vers les hydrosystèmes (Chabbi et Lemaire, 2007).

g) Cascade de l'azote dans une exploitation agricole

La notion de cascade de l'azote (Figure 1) traduit le cheminement de l'azote réactif à travers les gains, les pertes, les transferts entre milieux et les différents impacts sur la biosphère, la pédosphère et l'atmosphère (INRA, 2012). Cet azote réactif est initialement introduit dans un territoire par des processus naturels ou par l'action de l'homme (ou conjointement).

Le cycle de l'azote est particulièrement complexe dans les exploitations d'élevage (en particulier en production laitière) en raison de la diversité et de l'importance des flux mis en jeu, des phénomènes de recyclage, des interactions entre facteurs, très divers et variables : pratiques de fertilisation, types de couverts végétaux, caractéristiques des sols et des climats, impacts des animaux au pâturage, etc. (Vertès et al., 2008). Chaque année, en climat tempéré, 1 à 2% des réserves d'azote organique passent à l'état nitrique disponible pour la plante : c'est la minéralisation (INRA, 2012). L'acidification du milieu (accumulation de NH_4^+) permet de réduire les émissions de NH_3 (gaz toxique), et donc diminue les pertes d'azote (CORPEN, 2006).

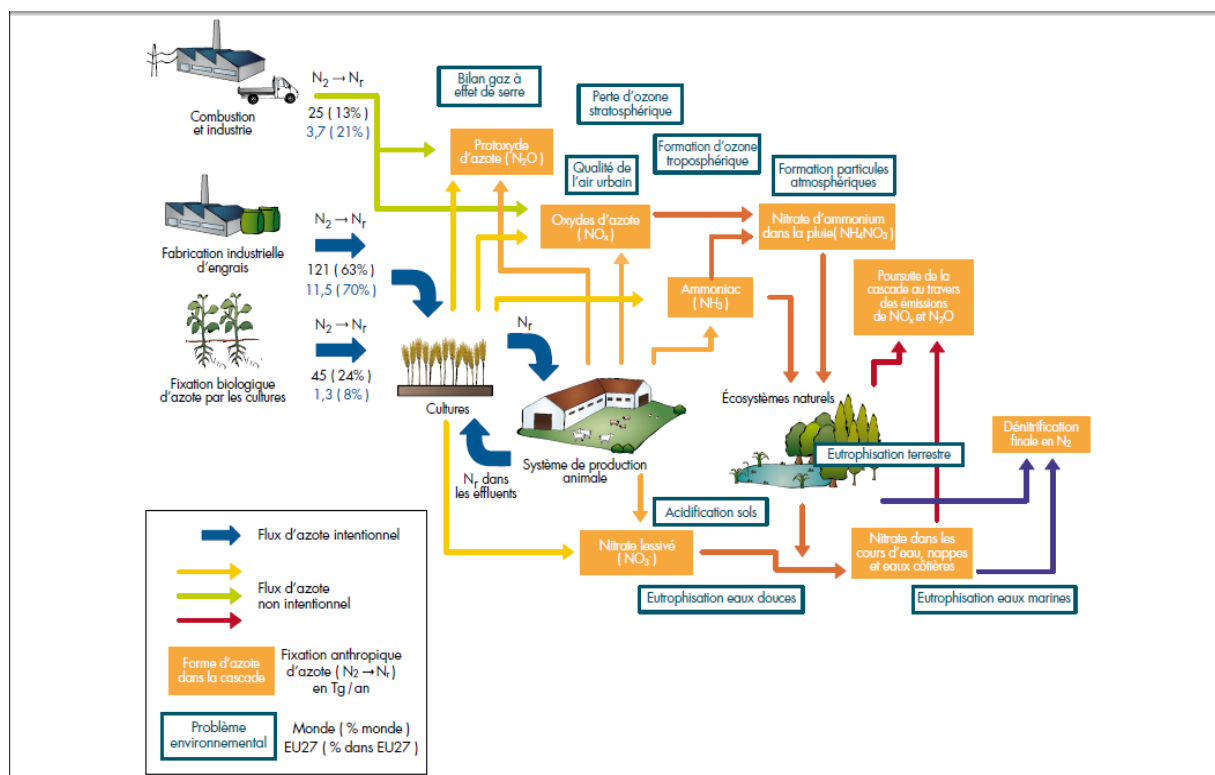


Figure 1 : Schéma général de la cascade d'azote

L'efficacité alimentaire de l'azote est beaucoup plus réduite chez les animaux d'élevage que chez les végétaux (INRA, 2012). La faible valorisation de l'azote ingéré par les animaux se traduit par un très haut niveau de recyclage à l'échelle de la parcelle (restitution par les déjections de 75 à 90% de l'azote ingéré pour des prairies pâturées) et de l'exploitation (Delaby et al., 1997). La diversité et l'importance des flux d'azote mis en jeu dans une exploitation multiplient les risques de pertes, sous diverses formes : nitrique par lixiviation, ammoniacale par volatilisation à partir des déjections au pâturage ou en stabulation, ou gazeuse (N_2 , NO_x) par dénitrification (Vertès et al., 2007).

Les déjections du bétail constituent les effluents d'élevage. L'azote contenu dans les effluents bovins constitue les 2/3 de l'azote excrété par l'élevage français (CORPEN, 2006). L'azote des restitutions (animales et/ou végétales) va constituer le stock d'azote du sol. Ce

dernier a tendance à augmenter sous prairie et à diminuer sous cultures (Kelln et al., 2012). Dans le cas de la prairie, ce stock est libéré lors d'un retournement (prairies temporaires, prairies artificielles,...).

L'objectif recherché est d'accroître l'efficacité du N au sein des systèmes de production animale, en clair utiliser moins et mieux l'azote, que ce soit en agriculture conventionnelle (limitation des fuites vers l'environnement) ou en agriculture bio (valoriser au mieux des ressources souvent limitées).

h) Séquestration de carbone dans une exploitation agricole

L'élevage contribue à l'émission d'environ 9% du total des gaz à effet de serre dont le CO₂ d'origine anthropique (Gill et al, 2009). Le CO₂ est utilisé par les organismes autotrophes (notamment les plantes) pour constituer la biomasse grâce à la photosynthèse. Cette biomasse est ensuite transférée au sol et va constituer sa matière organique (Arrouays et al., 2002). Cette dernière est le principal du stock de carbone dans le sol.

Le pouvoir stockant (de carbone) des prairies (notamment pâturées) doit être exploité afin de réduire l'émission des GES d'origine animale (Soussana et al., 2009). Cependant, dans certains cas de systèmes d'élevage ou polyculture-élevage, l'épandage de fumier ou de lisier améliore le stock de C de certaines parcelles au détriment d'autres qui n'en reçoivent pas (surfaces éloignées, en pente, interdiction réglementaire).

Notons que la minéralisation nette des nutriments est plus importante pour les effluents d'élevage que pour les résidus végétaux ; d'où l'introduction d'engrais verts envisagée comme technique de fertilisation pour maintenir la cinétique de stockage de C. La plupart des mécanismes impliqués dans la formation de l'azote stable participent aussi à la stabilisation du carbone dans le sol (Chabbi et Lemaire, 2007)

Stocker plus de carbone dans le sol doit passer par certaines modifications des usages du sol (Arrouays et al., 2002) notamment en revenant à l'exploitation des prairies (avec désintensification pour celles qui sont très fertiles). Aussi, différentes pratiques d'élevage peuvent accompagner ces modifications, la maximisation du pâturage et la limitation des concentrés en l'occurrence.

Le stockage du C dans le sol ne constitue pas une solution à long terme car les terres agricoles mobilisables sont en quantité finie ; aussi, il y a une limite à la cinétique de stockage : après quelques dizaines d'années, le stock de carbone n'augmente plus, cependant et, de plus, sa conservation nécessite obligatoirement le maintien des mêmes pratiques qui ont assuré son accumulation (Arrouays et al., 2002).

Le réchauffement climatique à un effet paradoxal : d'une part, par l'accumulation de CO₂ puis photosynthèse, il permet la production de biomasse, qui va constituer par la suite la matière organique du sol donc une activité « stockante » ; et d'autre part, l'élévation de la température provoquée par ce réchauffement induit une cinétique de minéralisation de la matière organique présente dans le sol et donc une activité « déstockante » (Soussana et al., 2009). Le bilan entre ces deux phénomènes doit impérativement être favorable au stockage de carbone dans le sol si l'on souhaite limiter l'ampleur du réchauffement. Il est à préciser que la cinétique de stockage du C dans le sol est beaucoup moins rapide que celle de son déstockage. Flux de phosphore dans une exploitation agricole

i) Flux de Phosphore dans une exploitation agricole

La quantité de phosphore minéral présente dans un sol est une conséquence directe de la richesse de la roche mère. Le phosphore organique est l'objet d'une lente minéralisation qui le rend progressivement disponible pour les végétaux (Möller, 2009). Les prélèvements de P_2O_5 par les plantes entraînent un épuisement relativement rapide des formes solubles.

Le phosphore est fortement retenu dans le sol, à la différence de l'azote nitrique. Aussi, les risques de pertes de phosphore sont beaucoup plus faibles que pour l'azote. Celles-ci sont essentiellement dues au ruissellement et à l'érosion, le phosphore étant entraîné avec les fines particules du sol (Kelln et al., 2012). Quand elles se produisent, ces pertes peuvent, en combinaison avec l'azote, générer des phénomènes d'eutrophisation des milieux situés en aval (milieux aquatiques par exemple).

j) Flux de potassium dans une exploitation agricole

Il se trouve en abondance dans le sol car toutes les roches en contiennent, surtout les roches cristallines et les minéraux argileux. Il peut se trouver dans le sol sous deux formes (Nesme, 2012) :

- Potassium échangeable, libre dans la solution du sol ou fixé sur les surfaces externes des argiles,
- Potassium fixé à l'intérieur des feuillets d'argile (mobilisable à plus long terme).

Les fourrages récoltés sur prairies sont bien pourvus en azote ainsi qu'en potassium, tandis que le phosphore est moins bien représenté (Möller, 2009). La question du bouclage du cycle de potassium, en particulier dans le cas des prairies permanentes, est moins préoccupante que celui de l'azote ou encore du phosphore.

11. Bilans des nutriments

d) Définition

Le bilan des nutriments prend en compte les entrées et les sorties d'éléments nutritifs au sein d'une surface (parcelle, agrosystème, ...) connue et sur une période définie. Les agrosystèmes, par leur nature, leurs fonctions et leur complexité imposent la construction de bilans de nutriments « personnalisés » (Scholefield, 1991). Cette construction prend également en compte le niveau de précision qu'on se fixe pour renseigner les différents termes du bilan.

Le solde du bilan (excédent de minéraux) permet d'évaluer l'efficacité du système d'exploitation du point de vue de la valorisation des minéraux et mesure son potentiel polluant, sans toutefois présumer du devenir de l'excédent. En réduisant les pertes, on va réduire les intrants et les coûts et au final gagner en autonomie. On réduit aussi les fuites vers l'environnement, donc certains risques de pollution. Le bilan des minéraux est utilisable individuellement sur une exploitation pour mesurer d'année en année les progrès accomplis.

e) Types de bilans

Le bilan apparent à l'exploitation

Aussi appelé « bilan des minéraux » considère l'exploitation comme une boîte noire et comptabilise toutes les entrées (achats d'engrais, aliments du bétail, effluents importés) et les sorties (produits de vente, effluents). Le solde du bilan intègre donc toutes les pertes d'un nutriment donné sans toutefois permettre de distinguer ces différentes formes de perte (INRA, 2012). Ce bilan ne fait aucune hypothèse sur les flux internes au système. Il permet, dans le cas de l'azote (et également pour les autres nutriments), d'évaluer de façon robuste à l'échelle de

l'exploitation toute innovation introduite se traduisant par des changements d'entrées ou sorties (Simon et al., 1997).

Le bilan « sol-surface »

Egalement appelé « sol-culture » ou « sol-végétation » calcule un solde entre les apports de nutriments sur les surfaces incluant les engrais organiques ou de synthèse et les exports par les cultures récoltées ou pâturées. Si on s'intéresse à l'azote, ce solde correspond aux différentes pertes vers l'eau, aux pertes gazeuses liées à l'épandage ainsi qu'aux différences de stock d'azote du sol (CORPEN, 2006). Dans un système conventionnel n'intégrant pas d'élevage, ce bilan se confond avec le bilan apparent (Küstermann et al., 2010). Quand il y a de l'élevage, ce bilan ne va concerner qu'une partie de l'exploitation et n'intégrera pas toutes les sources d'entrées et de pertes au niveau de l'exploitation (INRA, 2012).

Le bilan « sol-système »

Selon la définition donnée par l'expertise collective (INRA, 2012) sur l'azote, ce bilan prend en compte tous les flux d'origine externes auxquels sont ajoutés les flux d'azote issus des transformations de la matière organique et de l'azote dans le sol ainsi que les flux internes (effluents d'élevage notamment). Un exemple typique est le bilan de masse à la parcelle, qui met la fertilisation azotée au cœur du raisonnement des enjeux liés à la culture.

f) Modèles de calcul des bilans

Les modèles présentés ci-après concernent le calcul du bilan d'azote. Néanmoins ils restent relativement transposables aux autres nutriments. Ces modèles jouent sur le fait que les composantes d'un agrosystème sont liées par les flux de nutriments (Küstermann et al., 2010) ; l'élevage intégré à une exploitation de polyculture (avec éventuellement une production fourragère, exploitation des prairies,...) en est un parfait exemple.

Bascule : Ce modèle proposé par Marc Benoît (1992) est inspiré de la méthode sol-surface. Il considère la ferme comme une somme de parcelles ; il s'agira en quelque sorte de la somme des bilans à la parcelle, de toutes les parcelles exploitées de la ferme (entrées sous forme de déjections et apports de fertilisants et sorties calculées en fonction du rendement). Les excédents de chaque bilan parcelle sont additionnés en prenant soin d'exclure les éventuels soldes négatifs (Benoît, 1992) sous prétexte que les parcelles qui présentent ces soldes négatifs viennent abaisser « artificiellement » le résultat du bilan total. Ce type de démarche a le mérite de faire un tour d'horizon exhaustif de la fertilisation pour chaque parcelle pour une année considérée. Cependant, il présente l'inconvénient de demander beaucoup de temps et de se baser sur une description des pratiques au dire de l'agriculteur, sans moyen de préciser l'information. Aussi, il ne donne pas un point de vue global sur l'ensemble du système de production et il appréhende difficilement le pâturage. Pour Benoît, la difficulté de prise en compte du pâturage réside dans la quantification des déjections animales plus que dans le prélèvement d'herbe du troupeau.

Azopât : Est un modèle qui s'intéresse au bilan de l'azote en conditions de pâturage. Bien que représenté différemment selon les auteurs, le cycle de l'azote en prairie pâturée se résume systématiquement à un ensemble de flux entre les trois pools du système : le sol, la plante et l'animal (Delaby et al., 1997). La parcelle pâturée, qui englobe ces trois pools, se caractérise alors par des entrées et des sorties d'azote bien définies, suivant le système qu'elle intègre et les modes

d'exploitation qu'elle subit. Il est à noter que ce modèle est l'un des rares à prendre en considération les apports atmosphériques.

Modèle « Farruggia » : Ce modèle (dérivé d'Azopât) a été envisagé par Farruggia, Delaby et Decau. Il consiste en un calcul du bilan au niveau du couvert tel qu'il est exploité (Farruggia et al., 1997). Ces auteurs préconisent ainsi l'estimation des apports fertilisants et des aliments complémentaires (sans oublier la fixation symbiotique et les dépôts atmosphériques) au titre des entrées; et en terme de sorties, la prise en compte des récoltes, des produits animaux et les déjections hors parcelle.

I. Partie expérimentale

1. Matériel et méthode

Pour les besoins de notre étude, nous avons eu recours à des données consignées dans différentes bases conçues et gérées par l'unité ASTER. Nous avons par ailleurs élaboré un cheminement méthodologique permettant d'atteindre l'objectif fixé.

a) Matériel

Afin de mener à bien ce travail, nous avons puisé dans le corpus d'informations et de données détenu par l'installation expérimentale de l'unité ASTER. Les données relatives aux pratiques agricoles mises en œuvre ainsi que les diverses informations collectées sur le dispositif sont consignées dans des bases de données spécialisées :

Base de données ASTERix : Englobe les données agronomiques relatives à tous les itinéraires techniques (épandage des effluents, récoltes de foin,...)

Base de données ALADIN : Rassemble les données zootechniques relatives à la conduite des animaux (pesées, fourrages consommés,...)

Base de données PATURix : Permet de renseigner toutes les activités liées à la conduite du pâturage.

Pour valoriser ces données, nous avons principalement utilisé le tableur Microsoft Excel. Il a été utilisé pour mener à bien les divers calculs nécessaires permettant l'estimation de chaque terme du bilan des nutriments, pour chaque parcelle et sur l'ensemble des sept campagnes, à partir d'extractions réalisées au préalable sous Microsoft Access.

b) Méthode

Notre étude a été menée selon la construction méthodologique suivante :

- Identification des pratiques et traits de fonctionnement du système qui influent sur les flux de matières (variations des effectifs animaux, calendriers de pâturages, mouvements fonciers et fonctions particulières des parcelles, gestion des épandages d'effluents),
- Choix des éléments sur la base desquels le bilan des nutriments est calculé (N, P, K, C),
- Choix des dates de début et fin de la période pour laquelle le calcul des bilans est établi (2005-2011),
- Choix des échelles spatiale et temporelle : l'échelle géographique envisagée est celle de la parcelle. L'échelle temporelle retenue est un compromis entre la campagne (qui est propre à chaque parcelle du système) et l'année civile, du fait des particularités de conduite du troupeau (vêlages groupés de janvier à avril),
- Choix de la méthode de calcul du bilan des nutriments qui nous correspond au mieux,
- Décomposition des variables constituant chacun des postes du bilan en données élémentaires, et leur instruction pour vérifier leur pertinence par rapport au contenu des bases de données,
- Identification des différents cas de figure (cas extrêmes) ainsi que les limites de calculs pouvant être rencontrés et proposition de solutions en cas de manque d'informations dans les bases de données,
- Extraction des données permettant de calculer les termes du bilan définis,

- Analyse sommaire des résultats parcellaires et considérations sur l'ensemble du territoire du système herbager.

Modèle retenu

Le modèle sur lequel nous avons basé nos calculs est celui proposé par Delaby, Decau, Vertès et Farruggia dans Fourrages (1997) et qui concerne plus spécialement le bilan de l'azote sur les prairies pâturées. Ce modèle, en effet, permet d'éviter la quantification systématique des postes de prélèvement et de restitution par les animaux au pâturage, ce qui, d'après les auteurs, améliore grandement la fiabilité du calcul (Figure 2). Ainsi, la relation initiale du bilan (ne concernant que l'azote) se présente comme suit (Farruggia et al., 1997) :

Bilan = (fixation N₂ + déposition atmosphérique + fertilisation + aliments complémentaires) - (produits animaux + déjections hors parcelle + récoltes)

Les bilans de P, K et C n'intègrent en tant qu'entrées que la fertilisation et les aliments complémentaires. Le solde du bilan correspond ainsi au cumul des pertes gazeuses, des pertes par lessivage ou ruissellement, de la variation des stocks de nutriments du sol (organisation ou minéralisation) et des erreurs d'appréciation des différents termes. On considère ainsi la parcelle de prairie (avec son couvert végétal et l'animal y pâturant) comme une « boîte noire » négligeant ces variations de stocks des nutriments souvent complexes à renseigner. Dans notre cas d'étude, la fixation de C par les plantes via la photosynthèse ne pourrait être renseignée qu'au moyen de la biomasse aérienne des couverts, qui ne correspond cependant qu'à une fraction de la productivité primaire nette des prairies. Dès lors, nous ne chercherons pas à quantifier ce poste.

A la différence avec les auteurs dans l'utilisation du modèle, qui ont considéré l'échelle annuelle comme la plus adaptée aux calculs, nous avons pris le parti de retenir la campagne agricole en tant qu'échelle temporelle (le temps nécessaire à toutes les actions qui sont réalisées chaque année sur chaque parcelle). L'échelle annuelle ne permet pas, selon ces mêmes auteurs, de tirer des conclusions satisfaisantes. Aussi, notre étude a concerné une période de sept campagnes agricoles (de 2005 à 2011 inclus) afin de renseigner la dynamique des flux en nutriments du SH car il faut plusieurs années pour mettre en relief des relations significatives (Farrugia et al., 1997). Comme la diversité des parcelles constitue une des propriétés singulière du système de production, nous avons fait le choix d'établir des bilans élémentaires sur toutes les parcelles du système herbager.

Estimation des termes du bilan

b-1 Les entrées

b-1-1 La déposition atmosphérique :

Cette entrée ne concerne que l'azote transporté à plus ou moins longue distance par les courants atmosphériques et qui précipite principalement avec les pluies. Deux sources d'information ont été rapprochées afin de renseigner ce poste : celles issues du site EMEP (Programme coopératif pour le suivi et l'évaluation des transferts à longue distance des polluants atmosphériques en Europe) d'une part, et des analyses de la teneur en N des précipitations collectées à Mirecourt, sur le site de la station météo automatique d'autre part.

Les informations obtenues sur site à Mirecourt couvrent la période s'étendant de juin 2009 à mai 2010. Elles s'inscrivent dans une gamme de variation de 1 à 3 mg/L à l'exception de la valeur du mois de mai (près de 8 mg/L). Cette dernière valeur est vraisemblablement en relation avec les pratiques d'épandage d'engrais (minéraux et organiques) qui concernent à cette période de l'année tant les grandes cultures (céréales) que les prairies intensifiées (pâturées ou

récoltées) dans les régions environnantes, à courte et longue distance. Par ailleurs, la période d'un an sur laquelle portent les analyses est caractérisée par un cumul de précipitations nettement inférieur à celui de la moyenne des années 2005 à 2011 (respectivement 769mm et 852mm). On peut en escompter que les concentrations constatées sont vraisemblablement plus élevées (moindre dilution) que ce qu'elles sont en année moyenne. Nous retenons le principe de projeter sur les valeurs mensuelles de précipitations des différentes années, la valeur moyenne pondérée des 11 mois les moins variables (soit 1.59 mg/L) et celle observée en mai 2010 pour l'ensemble des autres mois de mai (7.91 mg/L).

Pour l'année de mesures, le cumul des observations fait apparaître un total de 16.74 kg N/ha déposés par voie atmosphérique. En projetant ces éléments sur les différentes campagnes, on obtient des valeurs annuelles s'étendant de 14.3 à 23.2 Kg N/ha, soit en moyenne pondérée des quantités de précipitations une valeur moyenne annuelle de 19.1 Kg/ha.

Le site EMEP fournit une estimation nationale moyenne des dépôts atmosphériques à hauteur de 588.3020 Gg en 2009. Si l'on retient la superficie de 543965 km² pour la France métropolitaine, les dépôts azotés calculés s'élèvent à 10.82 kg N/ha en moyenne nationale, tandis que notre estimation pour cette année-là est de 16.4 kg N/ha. Il est à noter qu'au regard des cartes du territoire national français, les dépositions de notre région se situe en haut de l'échelle des valeurs pour les formes oxydées (350 à 500 mg/m²) ainsi que pour les formes réduites (800 à 1000mg/m²), soit quasiment autant qu'en Bretagne, ce qui rend crédible la valeur élevée de nos observations.

b-1-2 La fixation azotée :

Pour tenir compte de la fixation d'azote dans les parties aériennes et dans les racines des légumineuses prairiales, il a été convenu de retenir la formule suivante, établie à partir de mesures sur la fixation symbiotique par le trèfle blanc réalisées au Royaume-Uni et en Bretagne (F. Vertès, 2004, communication personnelle) :

$$\text{Kg N fixé/ha} = \text{Rendement prairies (t MS/ha)} * \% \text{ trèfle} * 35 \text{ kg N fixé/t MS} * 1.3$$

La connaissance de la biomasse pâturée ou récoltée est nécessaire pour estimer la fixation d'azote par les Légumineuses. La biomasse récoltée est renseignée notamment au niveau du poste de sortie des récoltes. Les biomasses sont calculables à l'échelle des parcelles pour l'ensemble des 7 campagnes.

Concernant la biomasse produite et valorisée lors des séquences de pâturage, l'affectation des lots aux parcelles a permis de transformer les données d'effectifs et de durées de séjour des différentes catégories d'animaux en journées de pâturage UGB (JP ugb). Pour une estimation de la biomasse offerte en pâturage, il est référé aux capacités d'ingestion (maximisées) respectives des catégories suivantes : V1 =18 kg MS, Vta=14, Bov (mâle ou femelle) 2-3ans=14, Bov (mâle ou femelle) 1-2ans=10, Bov<1an=6. En fait cette conversion minimise l'herbe offerte qui est le plus souvent (assez largement mais de façon variable selon les circonstances...) supérieure au prélèvement effectivement réalisé par les animaux qui pâturent.

Par contre, la proportion de Légumineuses n'est disponible que pour les campagnes 2010 et 2011, et uniquement pour les ZF. En parcelle récoltée, cette proportion résulte d'un tri pondéral, en termes de poids sec. Pour les parcelles pâturées, il s'agit d'une estimation par notation (1 à 6) réalisée par poignées sur placettes prélevées au sein des ZF ou des parcelles prélevées sans ZF.

La question se pose de retenir des proportions de Légumineuses pour les situations non caractérisées, c'est-à-dire (i) pour toutes les parcelles de 2005 à 2009 inclus, (ii) pour les parcelles sans données des années 2010 et 2011. Nous nous proposons de « projeter » sur les parcelles non renseignées un taux de Légumineuses correspondant à ce qui a été observé lors des années avec observations.

b-1-3 Les fourrages complémentaires distribués aux animaux qui pâturent

Le parti a été retenu de considérer ces aliments distribués pour chaque parcelle en appliquant un coefficient journalier ainsi qu'un coefficient parcellaire (part de la complémentation pour chaque parcelle dans le cas où plusieurs parcelles sont pâturées durant la journée). Cette démarche est conditionnée par l'existence de périodes de pâturage à temps partiel qui caractérisent plus spécialement les phases de transition du troupeau de vaches laitières.

Il est à noter que les teneurs des aliments distribués ne sont pas toutes connues. Aussi, pour la campagne de pâturage 2005, il y a une grande diversité des aliments distribués (année d'installation du SH). De nombreux aliments n'ont pas été analysés, mais certains foins notamment ont pu être renseignés pour leur composition en azote (foins de SPCE, concentrés,...). Entre 2006 et 2010 il a été possible de renseigner l'azote de pratiquement tous les aliments. Pour les autres années où on ne disposait pas de valeurs d'analyses, le parti a été pris d'affecter une valeur de N moyenne (pour le même type de fourrage, pour la même coupe et issu de la même parcelle) aux fourrages non renseignés.

Le phosphore et le potassium de tous les aliments (excepté les foins et regains (F/R)) ont été extraits des tables de l'INRA (2007). Concernant les F/R, nous avons retenu les teneurs de référence suivantes : 20.00 g de K / kgMS et 3.00 g de P / kgMS, en accord avec les valeurs de la table des valeurs alimentaires des foins de plaine (prairie normande dont les conditions pédologiques sont voisines de celles de Mirecourt) (INRA, 2007). En ce qui concerne les valeurs en C des céréales et des graines, Maxin (2006) a proposé l'équation suivante que nous avons retenue :

$$C \text{ total} = 0.49 * MAT + 0.80 * EE + 0.44 * (MO - (MAT + EE + ADL)) + 0.62 * ADL$$

Les teneurs en N, P, K et C des pailles utilisées de 2007 à 2011 (toutes espèces et mélanges confondus) résultent des analyses réalisées à Mirecourt et sont consignés dans le Tableau 1 :

Tableau 1. Composition des pailles en azote, phosphore, potassium et carbone selon les analyses effectuées entre 2007 et 2011

Année	N g/kgMS	P g/kgMS	K g/kgMS	C g/kgMS
2007	7.30	1.59	11.22	463
2008	5.06	1.40	11.30	466
2009	4.32	1.37	11.71	457
2010	5.04	0.98	9.30	469
2011	5.77	1.25	8.30	463

On peut noter que la proportion de protéagineux a vraisemblablement impacté la teneur moyenne en N de la paille de 2007. La teneur en C ressort de façon très stable à 464 g/kgMS. De la même façon que pour l'azote, il est probable que les variations de proportion des protéagineux aient affecté les teneurs en P et K.

Concernant les ensilages d'herbe et de maïs utilisés en 2005 et 2006 (années de conversion à l'AB), les teneurs en P et K proviennent de la table INRA(2007) tandis que la teneur en C résulte de l'équation de Maxin (2006) pour les fourrages.

b-1-4 La fertilisation

La stabulation à logettes et la fosse à lisier ont été réalisées en 2005 et ont été mises en production à partir de l'hiver 2005-06, ce qui induit que les effluents produits lors de l'hiver 2004-2005 ont été composés pour l'essentiel de fumier pailleux issu de la litière et de fumier de raclage déversé dans la même fumière que l'autre système (SPCE). La première campagne d'épandage de lisier a donc été celle de 2006 (lisier produit en hiver 2005-2006).

Sur la base des analyses réalisées des différents produits épandus, les apports réalisés ont pu donner lieu à une quantification des éléments restitués avec deux procédures différentes : Pour les campagnes 2007 à 2011, les teneurs manquantes ont été remplacées par la moyenne des valeurs disponibles du produit considéré de la même année. Pour les campagnes 2005 et 2006, faute de teneurs disponibles pour l'ensemble des effluents, une valeur moyenne des produits équivalents utilisés dans la période 2007 à 2011 a été retenue.

b-2 Les sorties

b-2-1 Les récoltes d'herbe :

A l'échelle des parcelles, l'info sur les biomasses récoltées est disponible pour la totalité des campagnes 2005 à 2011. En revanche, les ZF renseignent la biomasse récoltée ainsi que les analyses des teneurs en nutriments pour les campagnes 2007 à 2011 (pas en 2005 et 2006). Cependant, les teneurs disponibles intègrent une utilisation éventuelle en pâturage, ce qui rend non accessibles les teneurs des seules récoltes. Les informations sur les ZF des suivis de pâturage (VL et Ge) ne sont disponibles (dans la base de données) que pour les campagnes 2010 et 2011 (premières années Patur-ix).

Ainsi, afin de renseigner les exportations d'azote par les récoltes, on prend le parti d'utiliser les valeurs des analyses sur les fourrages consommés quand ils sont analysés et utiliser la valeur moyenne de ces fourrages (produits la même année) afin de renseigner la teneur en azote de ceux qui ne sont pas analysés.

Concernant P et K, l'analyse des données de composition chimique de l'herbe pâturée dans un jeu de parcelles du secteur des VL (en 2009, 2010 et 2011 soit 70 échantillons) fait apparaître des teneurs à 29.90 g de K / kgMS et 4.25 g de P / kgMS (dont le diagnostic *via* les indices de nutrition phosphatée et potassique les qualifie de satisfaisantes ou excédentaires). Par ailleurs, les teneurs des échantillons analysés issus des ZF ayant été récoltées (2007 à 2011, 73 échantillons) font apparaître des valeurs moyennes à 22.49 g de K / kgMS et de 3.18 g de P / kgMS. On se propose donc de retenir pour les récoltes les mêmes teneurs de référence que celles utilisées pour les fourrages consommés : 20.00 g de K / kgMS et 3.00 g de P / kgMS.

La teneur en C organique des fourrages récoltés peut être approchée par les analyses des échantillons constitués sur les ZF ayant été récoltées (2007 à 2011, 73 échantillons) : sa valeur moyenne s'établit à 450.11 g de C/kgMS. Maxin (2006) a proposé également une équation permettant d'estimer le carbone des fourrages récoltés en fonction de la matière azotée totale (MAT), de la matière organique (MO) et de l'extrait éthéré (EE) selon :

$$C \text{ (g/kg)} = 0.49 \cdot \text{MAT} + 0.80 \cdot \text{EE} + ((\text{MO} - (\text{MAT} + \text{EE})) \cdot 0.46)$$

Connaissant les deux termes MAT et MO, il faut néanmoins estimer EE qui est donné par les tables de valeur des aliments (INRA, 2007) : nous retenons la valeur de 12 g/kgMS. La valeur moyenne ainsi calculée du C contenu dans les fourrages s'établit à 423.48 g/kgMS, soit sensiblement en dessous des valeurs d'analyse.

De la même manière que pour les teneurs en P et K, la prise en considération des teneurs en C calculées au moyen de l'équation de Maxin (2006) pour les échantillons d'herbe pâturée (en 2009, 2010 et 2011 soit 70 échantillons) fait apparaître une teneur moyenne à 428.09 g de C / kgMS, soit sensiblement plus élevée que celle correspondant au même calcul réalisé pour les ZF. On peut donc supposer que la prise en compte de prélèvements réalisés avant pâturage dans les analyses de ZF a pu conduire à surestimer sensiblement la teneur en carbone des fourrages récoltés que nous proposons de fixer par défaut à 445 g de C/kgMS.

b-2-2 Les déjections hors parcelle

Ce poste ne concerne que les vaches en lactation, déplacées 2 ou 4 fois par jour pour les besoins de la traite, voire pour une complémentation alimentaire qui peut notamment correspondre aux nuits passées en stabulation lors des périodes de transition printanière et automnale.

L'estimation des déjections émises hors des parcelles pâturées nécessite de quantifier la masse et la composition de ces déjections qui rassemblent l'urine et les fèces. Un certain nombre d'hypothèses sont retenues quant au rythme d'excrétion des animaux d'une part, quant aux durées de séjour hors des parcelles pâturées d'autre part. Un modèle simplifié de prévision des quantités totales d'azote émises au pâturage à l'échelle de la parcelle, pour une campagne, a été proposé par Farruggia et al. (1997) :

$$N \text{ rejets totaux} = -138 + 0,72 \times \text{JP/ha/an} \quad (n=27, R^2=0,95, S_{yx}=23,7)$$

Ce modèle repose sur la prise en compte de la durée de pâturage et de l'effectif du troupeau considéré, à partir d'expérimentations conduites au Pin-au-Haras et de données bibliographiques. Son domaine de validité est limité aux prairies pâturées entre 400 et 1000 JP/ha/an, ce qui pose un problème de transposition aux parcelles du système herbager de Mirecourt. En effet, certaines parcelles ne présentent pas cette intensité de pâturage, notamment dès qu'elles sont l'objet d'une récolte. Il conviendrait donc, pour ces parcelles, de procéder à un calcul plus analytique, fondé sur l'estimation de l'azote ingéré par le troupeau lors de son séjour sur ces parcelles dont on déduirait l'azote exporté dans le lait et celui retenu pour la gestation (Delaby et al., 1997) :

$$N_{\text{déjections}}(T) = N_{\text{urine}}(T) + N_{\text{fèces}}(T) = N_{\text{ing}}(T) - (N_{\text{lait}} + N_{\text{gestation}})$$

Si ces deux grandeurs (N_{lait} et N_{gestation}) sont établies, la valeur des quantités d'azote ingérées ne l'est pas. Elle réclame de plus d'estimer les quantités d'herbe ingérées. Pour cela, nous nous sommes basés sur le niveau d'ingestion des vaches au pâturage ; les quantités de matière sèche ingérées varient essentiellement de 15 à 17 Kg (Fiorelli et Trommschlagel, comm.pers.). Nous retenons une quantité moyenne de matière sèche ingérée de 16 Kg durant la période de pâturage afin de pouvoir estimer les teneurs en éléments de l'herbe ingérée.

Dans notre cas, un échantillon de parcelles pâturées a donné lieu à une analyse de valeur nutritive pour les campagnes 2009, 2010 et 2011 et permet de situer la teneur en azote de l'herbe (NH) offerte en pâturage. Il a été retenu d'utiliser une valeur du N ingéré basée sur le N ingéré de l'herbe couplée au N ingéré de la complémentation (Ning C) : $Ning = Ning H + Ning C$ avec

$$Ning H = (16 - Compl Kg MS) \times NH \quad \text{et} \quad Ning C = Compl \times NC$$

Pour le Ning H, nous avons retenu la valeur moyenne du NH (analysé) de l'année (pour les trois années renseignées 2009-2011), et la moyenne des valeurs de N de ces trois années pour renseigner l'azote de l'herbe des années non renseignées (2005 à 2008). Il en est de même pour le phosphore et le potassium (également analysés). La complémentation (Compl en Kg de MS) est une donnée extraite des bases et sa teneur en N est estimée au niveau du poste des complémentations.

Concernant le phosphore total rejeté (principalement dans les urines), il a été retenu la méthode de calcul proposée par Maxin (2006) : $P \text{ total rejeté} = P \text{ urinaire} + P \text{ fécal}$ (en sachant que $P \text{ absorbé} = 0,7 \times P \text{ ingéré}$, INRA, 2007) :

- $P \text{ urinaire} = 0,168 \times \exp(0,0364 \times (P \text{ absorbé} - P \text{ lait}))$
- $P \text{ fécal} = (P \text{ ingéré} - P \text{ absorbé}) + (P \text{ absorbé} - P \text{ lait} - P \text{ gestation} - P \text{ urine})$

Le potassium (principalement rejeté dans les déjections) est calculé grâce à une méthode proposée également par Maxin (2006) : $K \text{ total rejeté} = K \text{ urinaire} + K \text{ fécal}$ (en sachant que $K \text{ absorbé} = 0,85 \times K \text{ ingéré}$, INRA, 2007) :

- $K \text{ urinaire} = K \text{ absorbé} - (K \text{ lait} + K \text{ gestation})$
- $K \text{ fécal} = K \text{ ingéré} - K \text{ absorbé}$

Pour le carbone total rejeté, nous ne disposons pas de toutes les données pour pouvoir le quantifier : il est ainsi nécessaire d'établir des valeurs expertes permettant l'utilisation des équations proposées par Maxin (2006). Le calcul de la teneur en C des déjections est proposé en additionnant le C urinaire et celui des fèces sur les bases suivantes :

$C \text{ urinaire (g/j)} = 0.425 * N \text{ urée (g/j)} + 0.96 * Nnu \text{ (g/j)}$ Après avoir posé que l'azote urinaire total est calculable par la relation suivante :

$N \text{ urinaire} = N \text{ ingéré} - N \text{ lait} - N \text{ gestation} - N \text{ croissance} - N \text{ fèces} - \text{bilan } N$ et en supposant le bilan N équilibré à l'échelle de l'animal (valeur nulle), alors nous n'avons qu'à établir les 3 termes suivants :

- L'azote urinaire non uréique, soit

$$Nnu = 0.011 * MAT F - 0.0098 * MAT C + 5.6 * 10^{-6} * (MAT C)^2 + 33.48 \quad (n=86, R^2=.66, \text{etr}=9g)$$

telle que proposé par Maxin (2006), et en tenant compte de l'absence de concentrés dans l'alimentation, une équation dont la seule complexité réside dans la prise en compte de l'association éventuelle d'herbe pâturée et de fourrages complémentaires distribués.

- L'azote urinaire uréique, soit $N \text{ urée} = N \text{ urinaire} - Nnu \text{ le tout en g/j/vache}$
- L'azote des fèces en reprenant une autre équation proposée par Maxin (2006), soit

$N_{f\acute{e}ces} = 4.248*MSI + 0.698*(MAND/6.25) - 25.53$ (n=202, $R^2=0.87$, $etr=18.12g$) ; dans cette équation, nous avons fixé la MSI à 16kgMS/j/VL et la seule difficulté réside dans la prise en compte des digestibilités de l'azote (dMA) pertinentes pour l'herbe et les éventuels fourrages distribués en complément.

La teneur en carbone des fèces est ensuite établie sur la base proposée par Maxin (2006) :

C fèces = 0.56*MO fèces, le tout en g/j

Les régimes à base d'herbe se distinguent des autres régimes en ce qui concerne l'établissement de la MO des fèces ; cette dernière se calcule selon l'équation :

MO fèces (kg/j) = 0.18*MOND - 0.00013*%Conc² + 0.015*%Conc + 0.096*MSI + 0.67
avec n=175, $R^2=0.95$ et $ETR=0.401$ kg

Comme aucun concentré n'a été distribué aux vaches laitières de ce système au cours de la période de pâturage (sauf très ponctuellement en 2005 et 2006, ce que nous négligeons), l'équation se simplifie notablement et ne présente plus que la difficulté de prendre en compte la variété éventuelle des fourrages distribués en plus de l'herbe. Les teneurs en nutriments des différents aliments sont les mêmes que celle utilisées dans le calcul des entrées en terme de complémentation.

La question des durées de séjour hors des parcelles peut être tranchée en retenant quelques valeurs-cibles correspondant aux différentes phases de la période de pâturage :

- transitions printanière et automnale avec séjour nocturne à l'étable plus ou moins important (suivant la quantité d'herbe à pâturer) ; on retient une durée totale hors parcelle de 18 heures par jour (en considérant le séjour sur la parcelle pâturée de 10h à 16h).
- plein pâturage plus ou moins fortement complétement, pour diverses raisons (≥ 2 KgMS/VL/jour de fourrage distribué) ; on retient une durée totale hors parcelle de : 1h30 minutes (en moyenne passées sur les chemins, deux aller-retours) + 1h 30 minutes (traites) + 1h (complémentation), soit 4 heures par jour.
- plein pâturage très peu ou non complétement, cette dernière situation correspondant à une durée de séjour hors parcelle strictement réduite au déplacement du troupeau et à la traite, soit 3 heures par jour.

Pour établir les quantités de nutriments émises hors des parcelles, nous nous basons sur la simple relation suivante (Farruggia, 1997) :

(N, P, K, C) hors parcelle = (N, P, K, C) rejets totaux x [temps séjour hors parcelle / (JP/ha/an)]

b-2-3 Les exportations animales

Ce dernier poste est composé de trois grandeurs selon les catégories d'animaux : la production de lait et la gestation pour les vaches en lactation ; la croissance seule pour toutes les autres catégories, y compris les génisses gestantes dont les besoins de gestation sont considérées comme pris en compte dans le gain de poids vif.

- La production laitière est affectée à une parcelle à compter de la 3^e traite qui suit l'entrée du troupeau dans cette parcelle. Cela a permis de répartir la production de lait entre les parcelles

pâturées. Les minéraux exportés dans le lait sont renseignés comme suit : 1,5 g de potassium/Kg de lait et 0,9 g de phosphore/Kg de lait (CEPIL, 1987).

L'azote du lait est calculé par la relation suivante :

$$\mathbf{N(g) = MP(g) (Matières Protéiques)/6,38}$$
 en sachant que $\mathbf{MP(g) = TP(g/kg) \times PL(kg)}$

Concernant le carbone, Maxin (2006) propose une équation qui nous permet, au regard des données dont nous disposons, d'estimer les exportations carbonées du lait :

$$\mathbf{C\ lait(g) = (0,55 \times TP(g/Kg) + 0,0772 \times TB(g/Kg) + 20,58) \times PL(Kg)}$$

- La gestation des vaches laitières est prise en compte pour les trois derniers mois de gestation, au moins quant aux besoins azotés qu'ils génèrent. La gestation des génisses de 2-3 ans n'est par contre pas retenue, en considérant qu'elle est intégrée dans l'augmentation de leur poids vif. Afin d'estimer les quantités de nutriments exportés, on réalise le produit de la rétention journalière (besoin journalier) et du nombre de journées de pâturage – effectif (étant donné que 1 VL= 1UGB).

Pour la sortie de phosphore liée à la gestation, nous avons opté pour l'équation de House et Bell (1993) modifiée par Faverdin (2005, non publié) et utilisée par Maxin (2006). Ce besoin en phosphore qui correspond à la minéralisation du squelette du fœtus n'est significatif qu'à partir de la 26^{ème} semaine de gestation :

$$\mathbf{P\ gestation(g/j) = 7,38 / 1 + \exp(19,1 - (5,46 \times LN))}$$

où LN est le numéro de la semaine de gestation (nous retenons la semaine médiane pour représenter la période, soit pour le septième mois, de 26 à 30 semaines de gestation, la semaine 28).

Concernant le potassium, 1,027g/j sont nécessaires à la minéralisation du fœtus pendant le dernier tiers de la gestation (Maxin, 2006).

L'exportation d'azote par la gestation correspond, dans notre cas, à la quantité de protéines déposées dans le fœtus au cours de cette période. Cependant, l'équation que nous proposons d'utiliser (proposée par INRA, 1988 ; Maxin, 2006) intègre également les protéines fixées dans l'utérus de la vache.

$$\mathbf{N\ gestation(g/j) = (0,7 \times Besoins\ PDI) / 6,25}$$
 en sachant que : $\mathbf{Besoins\ PDI(g/j) = 0,07 \times PV\ veau\ naissance(Kg) \times \exp(0,111 \times LN)}$ en notant que 0,7 correspond au rendement de conversion des protéines métabolisables en protéines réellement déposées (Maxin, 2006).

Concernant l'exportation du carbone par la gestation, nous retenons l'équation utilisée par Maxin (2006) qui exprime ces exportations en termes de carbone fixé sur le fœtus :

$$\mathbf{C\ fœtus(g/j) = 0,115 \times GMQ\ fœtus(g/j)}$$
 le GMQ du fœtus (durant les trois derniers mois de gestation) est de 500g/j pour des veaux pesant en moyenne 40 kg à la naissance (INRA, 1978) ce qui correspond bien à la situation du SH de Mirecourt.

- Le gain de poids vif est comptabilisé pour chaque parcelle, à partir des gains de poids individuels (traduits en GMQ individuels), des effectifs des lots et de leurs durées de séjour sur les parcelles. La fixation de l'azote à travers le gain de poids (GPV) vif est calculée en utilisant l'équation proposée par Farruggia et al. (1997) :

$$N_{\text{fixé}} \text{ (kg/j)} = 0,024 \times \text{GPV}$$

Maxin (2006) a proposé différentes équations permettant d'estimer la fixation de P et K liée à la croissance des bovins laitiers. Celles-ci réclament plus ou moins d'informations :
le GMQ (g/j) dans le cas du potassium :

$$K_{\text{fixé}} \text{ (g/j)} = 1,6 * \text{GMQ} \text{ (g/j)}$$

le poids vif adulte concernant le phosphore :

$$P_{\text{fixé}} \text{ (g/j)} = (1,2 + (4,655 * \text{PVad}^{0,22} * \text{PV}^{-0,22})) * \text{GMQ}$$

La quantité de carbone fixée par la croissance des bovins correspond au carbone des lipides et des protéines fixés dans le croît, les quantités de glucides fixées étant négligeables. La composition des tissus adipeux (78% de C) et des protéines musculaires (52.5% de C) est connue (Bas et Sauvart, 2001 ; Lehninger, 1979). Il en résulte que le C fixé est calculable comme suit :

$$C_{\text{fixé}} = 0.78 * \text{gain lipides} + 0.53 * \text{gain protéines}$$

Il réclame de décomposer le gain de poids vif observé en ses deux composantes, lipidique et protéique, ce qu'a modélisé Robelin (1990). En se fondant sur ces travaux, nous retenons les valeurs suivantes adaptées à des animaux de type Pie Noir, d'un poids vif vide de 400Kg : 29.2% de lipides et 16.3% de protéines dans le croît. L'équation précédente devient donc :

$$C_{\text{fixé}} \text{ (kg)} = 0.314 * \text{GPV}$$

Elle est en cohérence avec les valeurs proposées par Maxin (2006) mais dont le domaine de validité (0.4 à 1.2 kg/j de GMQ pour des classes d'âge de 180 à 700 jours) ne contient pas un certain nombre de situations pourtant présentes dans le système SH : animaux plus âgés, croissance compensatrice très élevée, etc.

3. Résultats et discussion

Nous présenterons dans ce chapitre les bilans annuels des éléments N, P, K, et C de l'année 2008 où les données renseignant tous les postes ont été les plus complètes. Ce choix tient aussi au fait que 2008 est une année médiane de la période d'étude considérée. Concernant l'azote exclusivement, nous discuterons aussi du bilan interannuel, cet élément étant le mieux renseigné dans les bases de données de l'unité.

a) Bilan Azote

Le Tableau 2 présente le bilan annuel sur un échantillon de parcelles des deux secteurs du SH, celui des vaches laitières et celui des génisses, ainsi que le bilan global sur les deux secteurs. Il en ressort que les entrées d'azote par hectare sont pratiquement les mêmes pour le secteur VL et le secteur Gn, respectivement 91,8 et 90,4 kg/ha. Outre la fixation azotée et les dépositions atmosphériques qui sont des apports non anthropiques, il apparaît clairement que l'entrée la plus

importante reste la fertilisation organique par les effluents d'élevage. On peut noter également que la complémentation au pâturage est bien plus importante pour les vaches laitières que pour les autres catégories animales. Ceci est dû au fait que les VL sortent précocement en pâturage et sont longuement complémentées : environ 2 mois au printemps et 1,5 mois à l'automne 2008.

En ce qui concerne les sorties d'azote, le secteur VL exporte 67,7 kg de N/ha, soit davantage que le secteur Gn (57,3 kg/ha) ; cela tient principalement au fait que les VL exportent plus de N par les productions animales (le lait) en plus d'une restitution d'une quantité non négligeable d'azote hors de la parcelle. En terme de valorisation de l'azote, le secteur VL exporte presque autant en produits animaux qu'en récoltes, respectivement 806,7 et 1092,6 kg/ha ; alors le secteur Gn exporte l'azote principalement par le biais des récoltes (2198 kg/ha comparés aux 194,3 kg/ha des productions animales). L'efficacité de l'azote est de l'ordre de 60% pour les deux secteurs cette année là. Les valeurs du bilan au niveau de la parcelle varient entre -30 et 85 kg/ha tous secteurs confondus. Les valeurs négatives sont souvent dues à des niveaux d'entrées faibles (peu ou pas de fertilisation dans le cas des prairies pâturées du secteur VL ; faible complémentation et contraintes réglementaires liées à la fertilisation dans le cas du secteur Gn) ou à des niveaux de sortie élevés (récoltes dans le cas du secteur Gn ; produits animaux et notamment le lait, dans le secteur des VL) ou les deux. Quand le bilan est excédentaire, les entrées (souvent la fertilisation) sont importantes et les sorties (récoltes) très faibles ; ce cas de figure est plus marqué dans le secteur Gn. Le bilan global de l'azote à l'échelle du parcellaire du SH apparaît légèrement excédentaire en cette année 2008 (24,1 kg/ha dans le secteur VL contre 33,1 kg/ha concernant le secteur Gn) mais reste modéré en comparaison des bilans établis sur des exploitations conventionnelles plus intensives où souvent le niveau d'excédent dépasse les 100kgN/ha/an.

Concernant le bilan interannuel de l'azote, le Tableau 3 illustre la dynamique des flux de N pour quelques parcelles en considérant les deux secteurs sur toute la période d'étude. Il en ressort une tendance du secteur VL à présenter de fortes variations de l'excédent du bilan selon les années, avec une amplitude de 170,2 kg en 2005 à plus de 1700kg en 2011. Cette accumulation de l'azote sur ce secteur est due au fait que les parcelles le composant, et notamment celles permettant la fauche, ont été plus fertilisées sans que les exportations n'augmentent du fait des conditions particulièrement sèches de 2010 et 2011. Le secteur Gn ne connaît pas une dynamique aussi brutale, affichant néanmoins une fluctuation des excédents d'azote d'une année à l'autre. Cette irrégularité interannuelle est due au fait que les excédents sont tributaires des quantités de biomasse récoltées, elles-mêmes dépendantes des conditions climatiques de l'année. Le bilan moyen annuel au niveau des parcelles du secteur VL varie de 0,5 à 50,5 kg/ha alors que pour le secteur Gn il va de - 11 à plus de 76 kg de N/ha : cela peut être expliqué par le fait que les parcelles VL sont moins diverses et arrivent toujours à équilibrer des entrées avec des sorties relativement constantes (Production laitière) alors que les parcelles de l'autre secteur sont soit « fortement » fertilisées car productives (Petite Fin 32, Haut des Vignes,...) soit ne le sont pas du tout du fait de choix expérimentaux (Joly 15). Le bilan moyen interannuel au niveau du secteur VL présente un excédent assez nettement inférieur à celui du secteur Gn, respectivement 24,2 et 41,7 kg/ha, cet écart variant cependant selon les années davantage pour le secteur des Gn ; au niveau des parcelles VL, il y a une certaine permanence des pratiques qui permet de maintenir stable l'excédent d'azote tandis qu'au niveau des parcelles Gn, les variations d'effectif et de composition du troupeau ont pu faire varier de façon plus ou moins marquée l'excédent d'azote. Globalement, concernant l'azote, le bilan au niveau du système herbager présente un excédent tout à fait acceptable eu égard à l'extensivité de sa gestion.

b) Bilan Phosphore

Le Tableau 4 présente le bilan annuel du P durant l'année 2008 sur un échantillon de parcelles ainsi que sur l'ensemble des secteurs du SH. Globalement, les entrées/ha sur le secteur VL présentent un peu plus de phosphore que celles du secteur Gn, respectivement 8,2 et 7,4 Kg/ha même si les entrées totales sont pratiquement les mêmes sur les deux secteurs. Il est à noter également la part de la complémentation, relativement importante dans le cas des VL (33,4 kg contre 11,4 kg pour les Gn) alors que l'écart concernant la fertilisation reste plus marqué en faveur du secteur des génisses (268,4 et 295,5 kg respectivement pour les secteurs VL et Gn).

Les sorties de P dans le secteur des VL sont réparties sur les récoltes (198 kg), les productions animales (146,9 kg) et les déjections hors parcelles qui représentent une sortie considérable de phosphore (101,3 kg). Le secteur Gn quant à lui, n'exporte que du phosphore valorisé, soit sous forme de récoltes principalement (451,4 kg) ou par les produits animaux (49,5 kg), les déjections hors parcelles ne concernant que les vaches laitières. Le phosphore exporté par hectare est globalement le même dans les deux secteurs (12 kg/ha) avec une efficacité très importante (allant de 110 à 160% respectivement dans le secteur VL et Gn) conduisant vraisemblablement à un appauvrissement du stock de phosphore du sol. Cet appauvrissement est la conséquence de teneurs faibles des entrées en P (en l'occurrence la fertilisation) couplées à des sorties relativement fortes que ce soit par les exportations animales (lait) dans le secteur VL ou les récoltes dans le secteur Gn. Les bilans (par hectare) des parcelles sur les deux secteurs sont souvent déficitaires, parfois fortement (jusqu'à -15,8 kg/ha) mais peuvent dans certains cas atteindre des valeurs fortement positives, notamment sur le secteur VL (22,5 kg/ha). Le SH dans sa globalité tend à perdre de la fertilité concernant le P durant cette année 2008, et probablement durant toute la période de notre étude eu égard aux pratiques et traits de fonctionnements qui ont peu changé depuis.

c) Bilan Potassium

Le bilan annuel de Potassium pour quelques parcelles du SH ainsi que pour les deux secteurs VL et Gn est consigné dans le Tableau 5. Contrairement au phosphore, les entrées de potassium sont beaucoup plus importantes dans le secteur des génisses que dans celui des VL, respectivement 48,4 et 39,2 kg/ha, du fait que les effluents d'élevage, plus utilisés dans le secteur Gn, sont bien pourvus en K. Ainsi la part de la fertilisation dans les entrées de K est considérable pour les deux secteurs.

Les sorties de K dans le secteur Gn reviennent pratiquement aux seules récoltes (plus de 3 tonnes exportées) alors que la part des exportations animales est particulièrement faible (11,5 kg). L'explication peut venir du fait que la biomasse végétale a une teneur appréciable en K alors que les produits animaux (et notamment le gain de poids vif, dans le cas des catégories autres que les VL) en sont moins bien pourvus. Concernant le secteur VL, les sorties de K par les récoltes sont nettement moins importantes que celles de l'autre secteur (1319,8 kg) du fait de la moindre surface récoltée de ce secteur ; *a contrario*, les exportations animales (principalement *via* la production de lait) sont bien plus importantes même si le lait a une teneur en K relativement faible. Il est à noter également la part importante (supérieure aux sorties par les exportations

animales !) qu'occupe le poste des déjections hors parcelles dans l'exportation de potassium (920 kg).

L'exportation de K/ha est bien plus importante dans le secteur Gn (72,3 kg/ha) et revient principalement aux récoltes, alors que dans le secteur VL, le K exporté atteint 67 kg/ha dans lesquels la part des déjections HP est forte négligeable. Il en ressort une relative « meilleure » efficacité de l'utilisation de K dans le secteur Gn (150% contre 110 dans le secteur VL) étant donné le niveau important des sorties comparé à celui des entrées. Le bilan de la plupart des parcelles pour les deux secteurs affiche un déficit de bilan en potassium allant jusqu'à -105,8 kg/ha (Joly 7 dont les exportations sont importantes aussi bien pour les récoltes que pour la production laitière alors que les importations de K sont très faibles) mais également quelques cas de parcelles excédentaires pouvant atteindre 57,5 kg/ha, notamment quand le niveau des entrées est conséquent. Le système herbager ressort globalement déficitaire en K, de façon plus marquée dans le secteur des VL sur lequel les entrées (en l'occurrence par la fertilisation) sont plus faibles comparées à celles dont bénéficient le secteur Gn.

d) Bilan Carbone

Le Tableau 6 présente le bilan annuel du carbone de l'année 2008 pour quelques parcelles ainsi que pour les deux secteurs VL et Gn. Nous constatons qu'en termes d'entrées, les deux secteurs reçoivent pratiquement la même quantité de carbone rapportée à l'hectare (432,5 kg/ha pour le secteur VL contre 421 kg/ha pour le secteur Gn). Les proportions des différents postes d'entrées sont les mêmes dans les deux secteurs : la complémentation est beaucoup plus prononcée dans le cas des VL alors que c'est la fertilisation par les effluents d'élevage qui constitue la principale entrée carbonées dans le secteur Gn.

Les sorties de carbone dans le secteur VL correspondent pour une part importante aux récoltes (plus de 29 tonnes) mais également aux productions animales (principalement le lait, avec un peu plus de 11 tonnes). Les déjections hors parcelles exportent aussi du C mais de façon moindre que le K. Concernant le secteur Gn, les exportations de C se font principalement par les récoltes (près de 7 tonnes), la part des produits animaux ne s'élevant qu'à 2 tonnes. Globalement, les sorties de C des deux secteurs sont importantes comparées aux entrées ; cependant, le secteur VL exporte moins de C que le secteur Gn, respectivement 1189,4 kg/ha et 1655,9 kg/ha.

Si on se penche sur le bilan à la parcelle, on observe un déficit de carbone sur les deux secteurs (bien que le déficit soit plus prononcé dans le secteur Gn). Ce déficit tient au fait que l'entrée de carbone par la photosynthèse n'a pas été prise en compte. Il en résulte des bilans dont les déficits tous secteurs confondus varient entre -77 kg/ha et -2077 kg/ha ; les excédents (très rares) n'atteignent que 19,1 kg/h dans le cas de la parcelle du Murget 3 qui est très productive mais reçoit également une abondante fertilisation.

La prise en compte de la photosynthèse nette, c'est-à-dire la production prairiale primaire diminuée de la respiration des plantes, augmenterait les entrées et donc le bilan d'environ 5000 kgC/ha (Schulze et al., 2009) : le solde du bilan apparent ressortirait alors comme largement positif et serait plus conforme à la séquestration de carbone que ces prairies doivent vraisemblablement permettre.

Conclusion

L'objectif premier de notre travail a été de mettre en lumière la dynamique de fertilité du territoire SH sur la période allant de 2005 à 2011 par le biais de calculs des balances des nutriments. Réaliser une balance sur une parcelle de prairie, c'est d'abord simplifier le système tout en gardant tous les paramètres qui font sa complexité (Farruggia et al., 1997) ; c'est porter à la fois un regard agronomique (sol - plante) et zootechnique (animal).

Les pratiques et traits de fonctionnement du SH nous ont permis de mieux apprécier les flux de matière en général et ceux des éléments retenus (N, P, K et C) en particulier, et pouvoir répondre de manière précise aux différents résultats des calculs de bilans. La méthode proposée par Delaby et al. (1997) semble avoir été satisfaisante dans l'estimation des bilans de N, P et K. Cependant, concernant le carbone, cette méthode a présenté ses limites en ce qui concerne l'entrée par la photosynthèse ; cette méthode fut développée initialement pour le calcul de la balance azotée.

L'estimation des bilans sur les quatre éléments nous a permis d'apprécier de manière tangible l'effet des pratiques sur le troupeau du SH et des différents modes d'exploitation (pâturage et récoltes) sur la dynamique de fertilité de ce système. Concernant l'azote, le sol du territoire SH connaît une accumulation de l'ordre de 33 kg/ha/an durant les sept campagnes. Il n'en va pas de même pour le phosphore et le potassium, dont les stocks du sol ont tendance à s'épuiser notamment du fait que les entrées n'arrivent pas à compenser les exportations. Le bilan de carbone tel qu'il a été estimé ne nous permet vraisemblablement pas de conclure quant à sa dynamique de stockage/déstockage au sein du SH.

En termes de connaissances actionnables, autant pour le technicien que pour le praticien, le bilan va permettre:

- de hiérarchiser les flux à l'échelle de la parcelle, en mettant notamment l'accent sur les sorties des nutriments par le biais de l'animal (en particulier les déjections hors parcelles en période de pâturage) ;
- de réfléchir à des stratégies globales de fertilisation (valorisation des effluents d'élevage) des prairies ainsi qu'à des modes d'exploitation favorisant la meilleure efficacité de ces effluents.
- de connaître les processus, d'innover et de mesurer l'impact effectif des changements de pratiques.

Enfin, ce travail a permis de faire une exploration plus détaillée des bases de données ASTERix et ALADIN, de ce qu'elles renferment comme informations (et leur valorisation) et quelques fois de rectifier certaines erreurs. Ces bases sont de plus en plus enrichies en données qui permettront de continuer ce travail de suivi de la dynamique de fertilité au sein du SH. Ce suivi pourrait développer des critères validant ou pas des pratiques ou modes d'exploitations.

Références bibliographiques

1. Arrouays, D., Balesdent, J., Germon, J.C., Jayet, P.A., Soussana, J.F., Stengel, P. 2002. « Contribution à la lutte contre l'effet de serre : Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? ». *Synthèse du rapport d'expertise réalisé par l'INRA à la demande du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable*. 32p.
2. Bas, P., Sauvant, D. 2001. « Variation of lipid composition of adipose tissues and muscles in cattle ». *INRA Productions Animales* 14, n°:5: 312-322.
3. Beek, C. L., M. Pleijter, et P. J. Kuikman. 2010. « Nitrous oxide emissions from fertilized and unfertilized grasslands on peat soil ». *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 89, n° 3: 453-461.
4. Benoît, M. 1992. « Un indicateur des risques de pollution azotée nommé "Bascule" (Balance Azotée Spatialisée des systèmes de Culture de l'Exploitation) ». *Fourrages* 129 : 95 – 110.
5. Bolland, M. D. A., I. F. Guthridge, et G. Blincow. 2011. « Response of intensively grazed ryegrass dairy pastures to fertiliser phosphorus and potassium ». *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 90, n° 2: 281-298.
6. Centre de Formation Permanente et de Perfectionnement des Cadres des Industries du Lait (CEPIL). 1987. « Le lait matière première de l'industrie laitière ». *Ed. Institut National de la Recherche Agronomique*. 394p.
7. Chabbi, A., Lemaire, G. 2007. « Rôle des matières organiques des prairies dans le cycle de l'azote et impacts sur la qualité de l'eau ». *Fourrages* 192 : 441 – 452.
8. Coquil, X., Fiorelli, J.L., Blouet, A., Trommenschlager, J.M., Bazard, C., Mignolet, C. 2010. « Conception de systèmes de polyculture élevage laitiers en agriculture biologique : Synthèse de la démarche pas à pas centrée sur le dispositif expérimental INRA ASTER-Mirecourt ». *Non publié*.
9. Comité d'Orientation pour des Pratiques Agricoles Respectueuses de l'Environnement (CORPEN). 2006. « Des indicateurs azote pour gérer des actions de maîtrise des pollutions à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation et du territoire ». *CORPEN, Groupe Azote/Indicateurs*. 112p.
10. Decau, M.L., Delaby, L., Roche, B. 1997. « AzoPât : une description quantifiée des flux annuels d'azote en prairie pâturée par les vaches laitières. 11-Les flux du système sol – plante ». *Fourrages* 151 : 313 – 330.
11. Delaby, L., Decau, M.L., Peyraud, J. L., Accarie, P. 1997. « AzoPât : une description quantifiée des flux annuels d'azote en prairie pâturée par les vaches laitières. 1-Les flux associés à l'animal ». *Fourrages* 151 : 297 – 311.
12. Delagarde, R., et M. O Donovan. 2005. « Les modèles de prévision de l'ingestion journalière d'herbe et de la production laitière des vaches au pâturage ». *Productions Animales-Paris-Institut National de la Recherche Agronomique* 18, n° 4: 241.
13. Farruggia, A., Decau, M.L., Vertès, F., Delaby, L. 1997. « En prairie, la balance azotée à l'échelle de la parcelle ». *Fourrages* 151 :281 – 296.
14. Fiorelli, J.L., Coquil, X., Trommenschlager, J.M., Bazard, C., Blouet, A. 2010. « Des prairies permanentes, unique ressource d'un système laitier biologique en Lorraine ». *Renc. Rech. Ruminants* 17: 45 – 48.
15. Gill, M., P. Smith, et J. M. Wilkinson. 2009. « Mitigating climate change: the role of domestic livestock ». *animal* 4, n° 03: 323.

16. Institut National de la Recherche Agronomique. 2007. « Alimentation des bovins, ovins et caprins : Tables INRA 2007 ». *Ed. Quae*. 307p.
17. Institut National de la Recherche Agronomique. 2012. « Les flux d'azote liés à l'élevage : réduire les pertes, rétablir les équilibres ». *Synthèse de l'expertise scientifique collective réalisée par l'INRA à la demande des ministères en charge de l'Agriculture et de l'Écologie*. 67p.
18. Jarrige, R. 1978. « Alimentation des ruminants ». *Ed. Institut National de la Recherche Agronomique*. 597p.
19. Kelln, Breeanna, Herbert Lardner, Jeff Schoenau, et Tom King. 2012. « Effects of beef cow winter feeding systems, pen manure and compost on soil nitrogen and phosphorous amounts and distribution, soil density, and crop biomass ». *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 92, n° 2: 183-194.
20. Küstermann, Björn, Olaf Christen, et Kurt-Jürgen Hülsbergen. 2010. « Modelling nitrogen cycles of farming systems as basis of site- and farm-specific nitrogen management ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 135, n° 1-2: 70-80.
21. Lehninger, A.L. 1979. « Biochimie ». *Ed. Flammarion Médecine-Science*.
22. Liu, Tianzeng, Zhibiao Nan, et Fujiang Hou. 2011. « Grazing intensity effects on soil nitrogen mineralization in semi-arid grassland on the Loess Plateau of northern China ». *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 91, n° 1: 67-75.
23. Maxin, G. 2006. « Modélisation des bilans entrées/sorties des éléments carbone, azote, eau et minéraux chez la vache laitière ». *Mémoire d'Ingénieur en Agriculture de l'Esitpa*. 52p.
24. Messiga, Aimé J., Noura Ziadi, Gilles Bélanger, et Christian Morel. 2012. « Process-based mass-balance modeling of soil phosphorus availability in a grassland fertilized with N and P ». *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 92, n° 3: 273-287.
25. Möller, Kurt. 2009. « Inner farm nutrient flows between arable land and permanent grassland via the stable in organic cropping systems ». *European Journal of Agronomy* 31, n° 4: 204-212.
26. Nesme, Thomas, Maxime Toublant, Alain Mollier, Christian Morel, et Sylvain Pellerin. 2012. « Assessing phosphorus management among organic farming systems: a farm input, output and budget analysis in southwestern France ». *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 92, n° 2: 225-236.
27. Obour, Augustine K., Maria L. Silveira, Joao M. B. Vendramini, Lynn E. Sollenberger, George A. O'Connor, et James W. Jawitz. 2010. Agronomic and environmental impacts of phosphorus fertilization of low input bahiagrass systems in Florida. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 89, n° 2: 281-290.
28. Oenema, Oene, Hans Kros, et Wim de Vries. 2003. « Approaches and uncertainties in nutrient budgets: implications for nutrient management and environmental policies ». *European Journal of Agronomy* 20, n° 1-2: 3-16.
29. Peyraud, J. L., et L. Delaby. 2008. « Maîtrise des flux d'azote dans la gestion des prairies et du pâturage en systèmes laitiers intensifs ». *INRA Prod. Anim* 21, n° 2: 167-180.
30. Raison, C., Chambaut, H., Le Gall, A., Pflimlin, A. 2008. « Impact du système fourrager sur la qualité de l'eau. Enseignements issus du projet Green Dairy ». *Fourrages du 193* : 3 – 18.
31. Robelin J., 1990. A model for the prediction of daily lipid and protein deposition in cattle. *Reproduction, Nutrition, Development* 30 (suppl.2), 245s-246s
32. Scholefield, D., D. R. Lockyer, D. C. Whitehead, et K. C. Tyson. 1991. A model to predict transformations and losses of nitrogen in UK pastures grazed by beef cattle. *Plant and soil* 132, n° 2: 165-177.

33. Simon, J.C., Vertès, F., Decau, M.L., Le Corre, L. 1997. « Les flux d'azote au pâturage.1- Bilans à l'exploitation et lessivage du nitrate sous prairies ». *Fourrages du* 151 : 249 – 262.
34. Schulze E.D., Luysaert S., Ciais P., Freibauer A., Janssens I.A. 2009. « Importance of methane and nitrous oxide for Europe's terrestrial greenhouse-gas balance. *Nature Geoscience*, 2: 842-850.
35. Soussana, J. F., T. Tallec, et V. Blanfort. 2009. « Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands ». *animal* 4, n°. 03: 334.
36. Van Keulen, H., H. F. M. Aarts, B. Habekotté, H. G. Van der Meer, et J. H. J. Spiertz. 2000. « Soil-plant-animal relations in nutrient cycling: the case of dairy farming system [] De Marke' ». *European Journal of Agronomy* 13, n°. 2-3: 245–261.
37. Vertès, F., J. C. Simon, R. Giovanni, C. Grignani, M. Corson, P. Durand, et J. L. Peyraud. 2008. « Flux de nitrate dans les élevages bovins et qualité de l'eau: variabilité des phénomènes et diversité des conditions ». *Académie d'agriculture de France—séance du* 14: 6–26.

Résumé

Le bilan des nutriments sur prairies permanentes a été envisagé pour renseigner la dynamique de fertilité et les pertes vers l'environnement du système laitier herbager de l'INRA Mirecourt. Le bilan a été calculé pour l'azote, le phosphore, le potassium et le carbone. La méthode retenue prend en compte en termes d'entrées la complémentation au pâturage et la fertilisation par les effluents d'élevage (plus la fixation symbiotique et les dépôts atmosphériques dans le cas de l'azote). Les sorties comprennent les récoltes, les exportations dans les produits animaux et les déjections animales hors parcelles (vaches en lactation). L'année 2008 a été retenue afin de présenter les résultats des bilans annuels de N, P, K et C ; le bilan interannuel n'a concerné que l'azote. Le territoire du SH présente un excédent d'azote moyen de l'ordre de 33 kg/ha/an durant les sept campagnes. Il n'en va pas de même pour le phosphore et le potassium, pour lesquels les entrées n'arrivent pas à compenser les exportations. Le bilan de carbone (largement déficitaire) tel qu'il a été estimé ne nous permet pas de conclure quant à la dynamique de stockage/déstockage au sein du SH, ceci résultant de la non prise en compte de son entrée principale, la photosynthèse.

Mots clés : Nutriments, bilan, système d'élevage herbager, pâturage

Nutrient cycle looping within organic grazer dairy system

Abstract

Nutrient budget on permanent grassland was established in order to assess fertility kinetic and environmental losses within the grazing dairy system of INRA Mirecourt. The nutrients concerned were nitrogen, phosphorus, potassium and carbon. The method used considers as inputs the supplementation at pasture and the fertilization by livestock manure (in addition to symbiotic fixation and atmospheric deposition concerning nitrogen). Outputs include harvests, exports in livestock products and droppings emitted off-plot (for lactating cows only). Year 2008 was chosen to present results of annual budgets for N, P, K and C; interannual budget involved only nitrogen. Grazing system territory shows a surplus of nitrogen of about 33 kg/ha/year during the whole period of study. Per contra, phosphorus and potassium soil stocks tend to wear off especially because most of time inputs fail to balance outputs. Carbon budget (amply deficient) does not allow us to conclude as to its stoking/destocking kinetic within grazing system, this amounts mainly to the fact of principal input negligence, photosynthesis.

FIGURE 2: SCHÉMA GLOBAL DU BILAN DES NUTRIMENTS

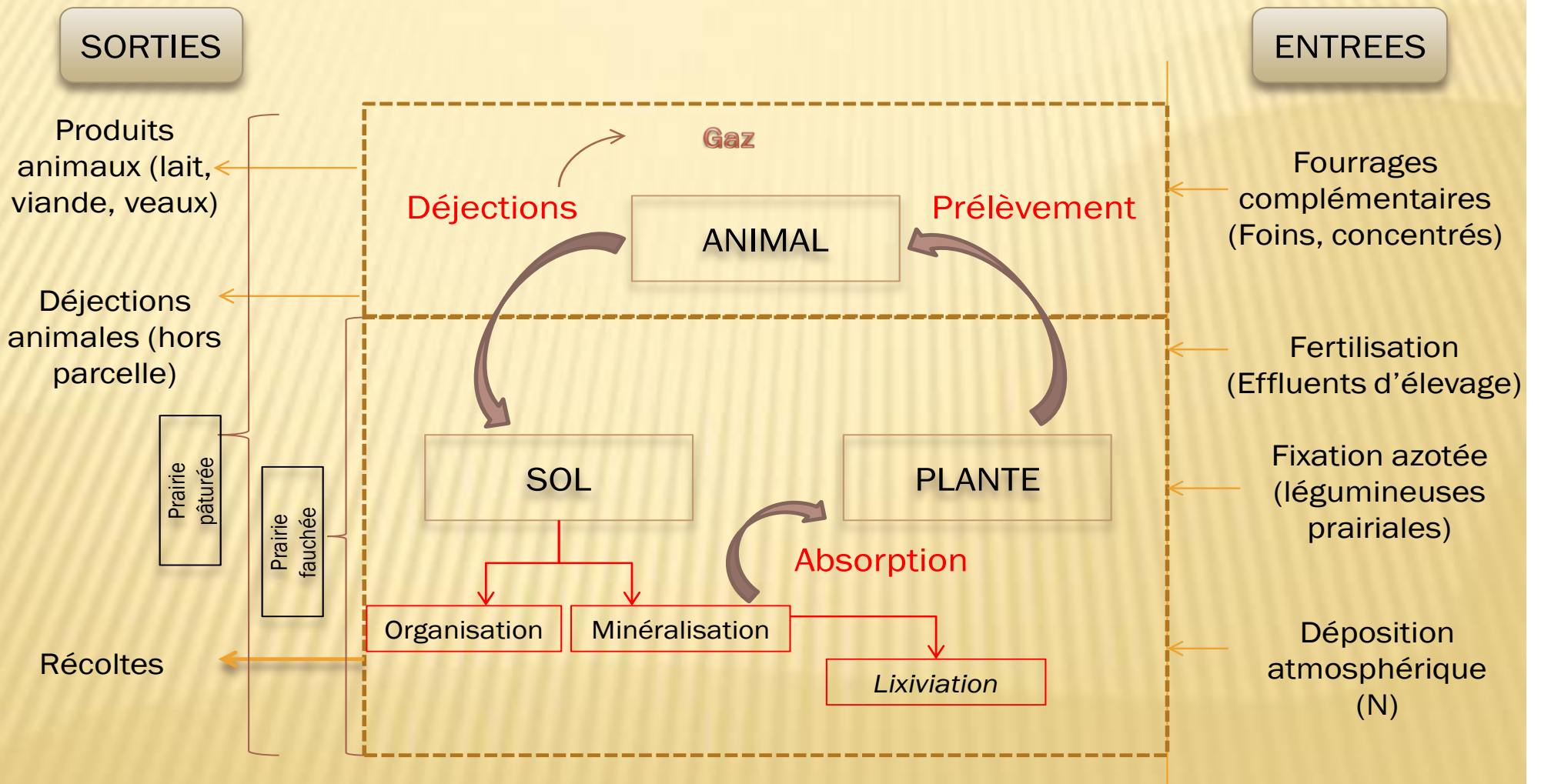


Tableau 2. Bilan annuel (2008) de l'Azote (kg) sur un échantillon de parcelles des secteurs vaches laitières et génisses

		ENTREES				SORTIES						
Parcelles secteur VL	surface	Comp	Ferti	DépAtm	FixLég	SommeE/ha	Réc	ProdAnx	Déj_hp	SommeS/ha	Bilan/ha	Efficienc
July 6	2,3	6,4	0,0	51,3	121,2	79,0	151,7	72,5	23,1	109,1	-30,1	1,3
Justice 11	2,4	30,6	159,1	53,8	102,1	145,5	111,2	28,7	23,9	68,9	76,5	0,4
Murget 11	0,8	4,6	0,0	19,1	40,5	76,1	48,7	15,7	11,5	90,0	-13,8	1,0
Murget 42	2,6	6,4	231,4	58,9	142,4	168,8	118,0	56,3	54,4	87,9	80,9	0,4
Total secteur VL	36,9	156,3	751,2	835,3	1642,5	91,8	1092,6	806,7	597,8	67,7	24,1	0,6
Parcelles secteur Gn	surface	Comp	Ferti	DépAtm	FixLég	SommeE_ha	Réc	ProdAnx	Déj_hp	SommeS/ha	Bilan/ha	Efficienc
Domvallier 0	1,5	3,5	0,4	34,1	58,9	64,3	133,4	5,4	0,0	92,1	-27,8	1,4
Domvallier 5	3,2	2,7	77,7	72,0	171,8	102,0	427,1	10,3	0,0	137,6	-35,6	1,3
Haut des Vignes 1	1,5	0,0	97,1	34,7	44,2	115,0	61,2	2,7	0,0	41,8	73,2	0,4
Marchande 20	1,8	2,9	124,4	40,0	70,0	134,4	81,7	5,4	0,0	49,3	85,1	0,4
Total secteur Gn	41,8	64,7	1080,7	945,6	1683,5	90,4	2198,1	194,3	0,0	57,3	33,1	0,6

Tableau 3. Bilan interannuel (2005-2011) de l'Azote (kg) sur un échantillon de parcelles des secteurs vaches laitières et génisses

Parcelles secteur VL	surface	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	min	Max	Moyenne	Moyenne/ha
July 7	2,1	33,7	3,4	-68,5	-63,8	75,2	17,1	75,8	-68,5	75,8	10,4	4,9
Justice 11	2,4	-85,9	150,6	-5,5	181,8	16,2	289,6	159,0	-85,9	289,6	100,8	42,4
Manège	0,6	19,9	21,2	27,2	16,3	40,6	14,0	56,0	14,0	56,0	27,9	50,5
Murget 11	0,8	-4,7	-3,4	-9,0	-11,7	10,6	3,4	17,8	-11,7	17,8	0,4	0,5
Murget 3	2,0	-29,2	122,2	-20,3	127,9	69,5	109,2	305,1	-29,2	305,1	97,8	50,0
P Etang 12	1,2	-28,6	-23,3	4,8	-2,2	4,9	17,9	42,9	-28,6	42,9	2,4	1,9
Total secteur VL	36,9	170,2	629,0	274,2	888,1	1161,2	1275,4	1712,6	170,2	1712,6	873,0	24,2
Parcelles secteur Gn	surface	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	min	Max	Moyenne	Moyenne/ha
Haut des Vignes 1	1,5	140,5	109,1	57,3	112,0	102,4	159,0	139,2	57,3	159,0	117,1	76,5
Haut des Vignes 2	1,8	158,5	193,0	110,3	118,8	154,1	118,7	64,3	64,3	193,0	131,1	72,1
July 15	1,8	-61,2	-9,1	-57,4	0,5	-3,0	-2,0	-5,7	-61,2	0,5	-19,7	-10,9
Marchande 20	1,8	-0,7	68,0	53,1	150,3	124,0	200,2	218,6	-0,7	218,6	116,2	65,8
Marchande 3	3,0	-23,7	11,5	-86,5	31,8	20,7	49,6	5,3	-86,5	49,6	1,2	0,4

Petite Fin 32	2,0	266,9	50,4	113,8	94,3	105,2	168,8	98,6	50,4	266,9	128,3	65,6
Total secteur Gn	41,8	2065,3	1483,6	1111,1	1382,1	1891,5	2893,8	1350,0	1111,1	2893,8	1739,6	41,7

Tableau 4. Bilan annuel (2008) du Phosphore (kg) sur un échantillon de parcelles des secteurs vaches laitières et génisses

Parcelles secteur VL	surface	ENTREES			SORTIES			SommeS/ha	Bilan/ha	Efficience
		Comp	Ferti	SommeE/ha	Réc	ProdAnx	Déj_hp			
Joly 6	2,3	1,5	0,0	0,7	13,6	13,2	3,9	13,5	-12,8	17,7
Murget 11	0,8	1,0	0,0	1,2	7,3	2,8	2,0	14,3	-13,1	9,9
Murget 12	1,2	0,4	36,9	30,7	16,5	3,0	2,4	18,1	12,6	0,5
Murget 21	1,7	0,7	0,6	0,8	22,1	4,3	1,9	16,6	-15,8	19,7
Murget 22	1,7	0,8	45,1	27,6	16,4	3,9	1,7	13,2	14,4	0,4
Murget 3	2,0	2,3	70,5	37,2	10,0	10,7	8,1	14,7	22,5	0,3
Total secteur VL	36,9	33,4	268,4	8,2	198,0	146,9	102,3	12,1	-3,9	1,1
Parcelles secteur Gn	surface	Comp	Ferti	SommeE/ha	Réc	ProdAnx	Déj_hp	SommeS/ha	Bilan/ha	Efficience
Domvallier 0	1,5	0,7	0,2	0,6	19,9	1,4	0,0	14,2	-13,6	23,8
Friche 12	2,2	1,2	18,1	8,7	46,5	1,1	0,0	21,6	-12,8	2,5
Haut des Vignes 1	1,5	0,0	26,2	17,1	12,1	0,5	0,0	8,3	8,8	0,5
Haut des Vignes 2	1,8	1,4	31,5	18,1	20,7	3,5	0,0	13,3	4,8	0,7
Joly 15	1,8	0,0	0,0	0,0	26,2	0,0	0,0	14,5	-14,5	
Marchande 20	1,8	0,6	33,4	19,2	22,4	1,3	0,0	13,4	5,8	0,7
Total secteur Gn	41,8	11,4	295,5	7,4	451,4	49,5	0,0	12,0	-4,6	1,6

Tableau 5. Bilan annuel (2008) du Potassium (kg) sur un échantillon de parcelles des secteurs vaches laitières et génisses

		ENTREES			SORTIES					
Parcelles secteur VL	surface	Comp	Ferti	SommeE/ha	Réc	ProdAnx	Déj_hp	SommeS/ha	Bilan/ha	Efficienc
Joly 7	2,1	16,8	0,0	7,8	175,1	8,8	60,0	113,6	-105,8	10,9
Justice 11	2,4	28,6	299,5	138,1	171,2	4,9	39,8	90,9	47,2	0,5
Murget 11	0,8	6,7	0,0	8,0	48,6	4,5	17,9	84,2	-76,2	7,9
Murget 21	1,7	4,7	13,2	10,5	147,6	7,1	16,5	100,0	-89,5	8,6
Murget 3	2,0	15,1	207,1	113,7	66,6	17,1	75,1	81,2	32,4	0,4
Murget 42	2,6	9,3	388,6	153,0	150,8	16,6	81,0	95,5	57,5	0,4
Total secteur VL	36,9	214,2	1232,7	39,2	1319,8	230,5	920,0	67,0	-27,8	1,1
Parcelles secteur Gn	surface	Comp	Ferti	SommeE/ha	Réc	ProdAnx	Déj_hp	SommeS/ha	Bilan/ha	Efficienc
Domvallier 0	1,5	2,5	5,0	5,0	133,0	0,3	0,0	88,5	-83,5	17,8
Domvallier 5	3,2	1,6	119,3	38,0	398,0	0,5	0,0	125,4	-87,4	3,3
Haut des Vignes 1	1,5	0,0	154,8	101,2	81,0	0,1	0,0	53,0	48,2	0,5
Haut des Vignes 2	1,8	5,1	188,4	106,4	137,7	0,7	0,0	76,1	30,2	0,7
Joly 15	1,8	0,0	0,0	0,0	174,6	0,0	0,0	96,7	-96,7	
Marchande 20	1,8	4,1	215,3	124,2	149,5	0,3	0,0	84,8	39,4	0,7
Total secteur Gn	41,8	50,9	1971,4	48,4	3009,2	11,5	0,0	72,3	-23,9	1,5

Tableau 6. Bilan annuel (2008) du Carbone (kg) sur un échantillon de parcelles des secteurs vaches laitières et génisses

		ENTREES				SORTIES				
Parcelles secteur VL	surface	Comp	Ferti	SommeE/ha	Réc	ProdAnx	Déj_hp	SommeS/ha	Bilan/ha	Efficienc
Joly 7	2,1	378,7	0,0	176,4	3895,2	422,5	227,5	2117,4	-1941,0	11,4
Murget 21	1,7	105,4	16,6	71,3	3283,9	333,3	59,0	2148,2	-2077,0	29,7
Murget 3	2,0	335,3	2272,9	1334,2	1480,9	811,7	278,4	1315,1	19,1	0,9
Murget 5	1,5	188,4	0,0	124,8	0,0	290,9	106,7	263,5	-138,7	1,5
P Etang 12	1,2	55,7	0,0	44,7	1517,8	229,0	73,2	1462,2	-1417,5	31,4
P Etang 6	2,3	313,9	0,0	134,4	0,0	401,5	220,5	266,3	-131,9	1,3
Total secteur VL	36,9	4888,4	11060,2	432,5	29366,4	11077,3	3419,2	1189,4	-756,9	2,5
Parcelles secteur Gn	surface	Comp	Ferti	SommeE/ha	Réc	ProdAnx	Déj_hp	SommeS/ha	Bilan/ha	Efficienc
Colline Beaufroid 31	2,0	23,2	6,3	14,7	0,0	230,6	0,0	115,0	-100,3	7,8
Domvallier 5	3,2	59,5	1208,0	398,8	8855,8	103,0	0,0	2818,9	-2420,0	7,1
Friche 12	2,2	171,9	903,3	486,2	6900,5	13,2	0,0	3126,4	-2640,2	6,4
Haut des Vignes 1b-2b	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	76,4	0,0	77,4	-77,4	
Haut du Bois 62	2,7	107,8	0,0	40,0	0,0	316,2	0,0	117,4	-77,4	2,9
Joly 15	1,8	0,0	0,0	0,0	3885,7	0,0	0,0	2152,1	-2152,1	
Total secteur Gn	41,8	1474,0	16104,0	421,0	66953,9	2180,5	0,0	1655,9	-1234,9	3,9