



Université d'Antananarivo

Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques

Département Agriculture



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur Agronome
Spécialisation Agriculture

**Etude de la variabilité interannuelle et inter-parcellaire des
balances minérales (azote, phosphore et potassium) en
système de culture biologique.**

Application à un essai système de longue durée à Versailles et à un réseau
d'exploitations agricoles biologiques en région Picardie.

Par Baovola Lucia RAKOTOVOLOLONA

Promotion Ambioka (2008 – 2013)

Soutenu en Octobre 2013

Devant le jury composé de :

Harilala ANDRIAMANIRAKA

Président

Nicolas BEAUDOIN

Maître de stage

Denis RANDRIAMAMPIONONA

Tuteur pédagogique

Jean-Chrysostome RAKOTONDRAVELO

Examineur

Avec la contribution de :

Michel BERTRAND

Co-encadrant

Elodie BETENCOURT

Co-encadrant



Remerciements

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et témoigner ma gratitude envers les personnes, physiques et morales, qui m'ont donnée l'opportunité de mener à bien ce travail de recherche marquant l'aboutissement de mes cinq années d'études. Je remercie :

- Dr Harilala ANDRIAMANIRAKA, actuel chef du département Agriculture de l'E.S.S.A., pour son concours en tant que président de la commission du jury,
- Dr Jean-Chrysostome RAKOTONDRAVELO, enseignant-chercheur à l'E.S.S.A. et ancien chef du département Agriculture, pour sa contribution à l'évaluation de ce mémoire de fin d'études en tant qu'examinateur,
- Dr Denis RANDRIAMAMPIONONA, mon tuteur pédagogique, pour son encadrement et ses conseils lors de l'élaboration de ce document, ainsi que pour son soutien et sa médiation auprès du département durant mon stage ;
- Dr Nicolas BEAUDOIN, mon maître de stage et encadrant principal, Dr Michel BERTRAND et Dr Elodie BETENCOURT, mes co-encadrants, pour leur aide, leurs conseils et leur encadrement tout au long de ces six mois de stage ;

Mes remerciements vont également à toute l'équipe de l'unité Agro-Impact et de l'unité Agronomie Grignon de l'Institut National de la Recherche Agronomique pour l'accueil et la collaboration durant ces nombreux mois, en particulier à Mr Eric Venet, Mr Dominique Le Floch et Mme Anita Teixeira ;

Je remercie tous les experts suscités pour leur conseil avisé et leur contribution à cette étude : Mme Juliette Anglade, Dr Julie Constantin, Pr Marie-Hélène Jeuffroy, Dr Bruno Mary ;

Je remercie le projet partenaire de l'Agro-Transfert Ressources et Territoires, les conseillers de la Chambre d'Agriculture : Mr Gilles Salitot, Mme Samantha Bertrand et Mr Pierre Menu, ainsi que les exploitants agricoles biologiques : Mr Thomas Coevoet, Mr Jean-Michel Coorevits, Mr François Mellon, et Mr Jean-Luc Ortegat, pour leur collaboration et leur contribution à cette étude ;

Je remercie l'ensemble du collège des enseignants, le personnel administratif et technique de l'école, la grande famille du Département Agriculture, et la promotion Ambioka pour toutes ces années à l'E.S.S.A. ;

Enfin, je remercie profondément ma famille et mes amis, pour leurs encouragements et leur soutien sans faille, pour leurs conseils et leur aide à la réalisation de ce travail. Merci à Antsa, Henintsoa, Stéphanie, Valisoa.

Glossaire

Assolement : Répartition spatiale des différentes productions végétales au sein d'une exploitation et par extension surface consacrée à chaque culture

Dénitrification : Réduction des nitrates en diazote moléculaire (N_2), en passant par des formes intermédiaires, les nitrites NO_2^- , et les oxydes d'azote gazeux NO et N_2O . Ce processus se déroule en présence d'un pouvoir réducteur et en anaérobiose.

Eutrophisation : Développement anarchique de végétaux (algues notamment) suite à des excès d'apports de substances nutritives essentiellement le phosphore et l'azote.

Fixation biologique de l'azote : Assimilation du diazote en molécules organiques (essentiellement protéines et acides aminés) constitutives de ces micro-organismes et des tissus végétaux des plantes vivant en symbiose avec eux.

Grandes cultures : Terme générique regroupant les cultures de céréales (avoine, blé, épeautre, maïs, orge, triticale,...), d'oléagineux (colza, lin, soja, tournesol,...), de protéagineux (fève, féverole, lentille, lupin, pois,...).

Lixiviation du nitrate : Entraînement d'éléments minéraux dissous par la percolation de l'eau vers la profondeur. La quantité de nitrate entraînée au-delà de la zone accessible aux racines dépend en particulier de la lame d'eau drainante, de la quantité d'azote nitrique présente et de sa répartition dans le profil de sol, du type et de la profondeur du sol.

Natura 2000 : Réseau de milieux naturels remarquables de niveau européen, identifiés dans un souci de lutte contre la détérioration progressive des habitats et des espèces animales et végétales d'intérêt communautaire.

Nitrification : Oxydation biologique de l'ammonium en nitrate, en conditions aérobies. Elle procède en deux étapes successives : la nitrification, réalisée par les bactéries nitrifiantes (*Nitrosomonas*, *Nitrosospira*, *Nitrosolobus*, *Nitrosovibrio*) est l'oxydation de l'ammonium en nitrite, avec pour intermédiaire le NH_2OH ; la nitrification, réalisée par les bactéries nitrifiantes (*Nitrobacter*, *Nitrococcus*, *Nitrospira*) est l'oxydation des nitrites en nitrates.

Rotation : Succession des cultures sur une même parcelle, ou répartition temporelle des différentes productions végétales au sein d'une exploitation.

Système de culture : Ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de façon identique (Sebillotte). Le système de culture se définit pour une surface de terrain traitée de façon homogène, par les cultures pratiquées, leur ordre de succession et les itinéraires techniques (combinaison logique et ordonnée des techniques culturales) mis en œuvre » (Gras).

Système de production : Ensemble structuré des facteurs de production combinés entre eux pour assurer une production végétale et/ou une production animale en vue de satisfaire les objectifs de l'exploitant agricole (Jouve).

Table des illustrations (figures et tableaux)

Figure 1. Répartition de l'agriculture biologique en Picardie en 2012.....	4
Figure 2. Cycle simplifié du cycle de l'azote dans un sol cultivé (COMIFER, 2011)	7
Figure 3. Cycle du phosphore en agriculture (Duanmu, 2009).....	8
Figure 4. Cycle du potassium en agriculture (Duanmu, 2009)	9
Figure 5. Représentation schématique des postes de calcul de la balance azotée à l'exploitation.....	11
Figure 6. Fréquence de chaque culture dans la succession culturale au cours de l'essai de longue durée selon les sous-systèmes de culture testés	14
Figure 7. Représentation schématique du dispositif expérimental	15
Figure 8. Box-plots des balances annuelles en azote par parcelle	20
Figure 9. Box-plot des balances annuelles en azote de scénarii différents	21
Figure 10. Moyennes des balances azotées à long terme, par système de culture	22
Figure 11. Balances azotées moyennes sous différents scénarios en systèmes de culture biologique et SCV.....	22
Figure 12. Evolution des balances azotées par période et par sous-système de culture	24
Figure 13. Nuages de points des balances à moyen terme en azote en fonction des entrées totales et de l'exportation par les cultures.....	26
Figure 14. Nuage de points des exportations d'azote par les cultures en fonction des entrées totales	26
Figure 15. Box-plots des balances annuelles en phosphore par parcelle	27
Figure 16. Box-plots des balances annuelles en potassium par parcelle	27
Figure 17. Moyennes des balances en potassium à long terme, par système de culture.....	29
Figure 18. Nuages de points des balances en phosphore à moyen terme en fonction des entrées totales et des exportations par les cultures	30
Figure 19. Nuages de points des balances en potassium à moyen terme en fonction des entrées totales et des exportations par les cultures	30
Figure 20. Proportion des cultures dans l'assolement annuel des exploitations agricoles.....	31
Figure 21. Balances azotées et flux annuels d'azote à l'échelle de l'exploitation agricole.....	33
Figure 22. Balances et flux annuels en phosphore à l'échelle de l'exploitation agricole.	33
Figure 23. Balances et flux annuels en potassium à l'échelle de l'exploitation agricole.....	34
Figure 24. Balances azotées à moyen terme et flux moyens annuels à l'échelle de la parcelle agricole	35
Figure 25. Balances en phosphore à moyen terme et flux moyens annuels à l'échelle de la parcelle agricole	36
Figure 26. Balances en potassium à moyen terme et flux moyens annuels à l'échelle de la parcelle agricole	36
Figure 27. Variation de stock en azote organique du sol en fonction de la balance azotée, en essai de longue durée de « La Cage »	43

Figure 28. Représentation schématique des flux pris en compte dans le bilan azoté d'un sol agricole (Billen <i>et al.</i> , 2013)	44
Figure 29. Variation de stock en phosphore total du sol en fonction de la balance cumulée en phosphore	45
Figure 30. Variation de stock en potassium du sol en fonction de la balance cumulée en potassium.....	46
Tableau 1. Caractérisation des systèmes de culture mis en place dans l'essai	14
Tableau 2. Caractérisation des exploitations agricoles étudiées.....	17
Tableau 3. Fixation d'azote symbiotique par les légumineuses.....	19
Tableau 4. Coefficients de variation des balances annuelles en azote par système de culture....	20
Tableau 5. Moyennes des flux d'azote et balances en azote, à l'échelle de la rotation, par système de culture	23
Tableau 6. Caractérisation des pratiques de fertilisation phospho-potassique sur la station expérimentale, par système de culture, entre 1998 et 2012	28
Tableau 7. Caractéristiques des parcelles étudiées en réseau d'exploitation agricole	35

Table des abréviations, symboles et unités

AB : Agriculture Biologique

CI : culture intermédiaire

CORPEN : Comité d'Orientation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'ENvironnement

CV : coefficient de variation

ENBIO : Evaluation agri-environnementale expérimentale de systèmes de grandes cultures biologiques

FAO : Organisation pour l'Alimentation et l'Agriculture

ha : hectare

INRA : Institut National de Recherche Agronomique

K : potassium

MS : matières sèches

N : azote

OCDE : Organisation pour le Développement et la Coopération Economique

ONU : Organisation des Nations Unies

P : phosphore

q : quintal

R^2 : coefficient de détermination

SAU : surface agricole utile

SCV : système de culture en semis direct sous couvert végétal permanent

t : tonne

U(M)R : Unité (mixte) de recherche

Les valeurs présentées dans ce document sont exprimées en unité d'azote, de phosphore ou de potassium élémentaire. Les flux exprimés par unité de P_2O_5 et de K_2O sont convertis en les multipliant respectivement par un coefficient 0,437 et 0,83.

Table des matières

Remerciements	i
Glossaire	ii
Table des illustrations (figures et tableaux).....	iii
Table des abréviations, symboles et unités	v
Introduction	1
Partie I. Cadrage de l'étude	2
I. Présentation de l'étude.....	2
1.1. La structure d'accueil.....	2
1.2. Les enjeux et objectifs de l'étude.....	3
II. Problématique	3
2.1. L'Agriculture biologique en France	3
2.2. L'importance du bilan des éléments majeurs	4
2.3. Dynamique des éléments minéraux dans l'agroécosystème.....	5
2.4. La question de recherche et les hypothèses de départ.....	9
Partie II. Matériels et méthodes	10
I. Les balances minérales : concept méthodologique	10
1.1. Les méthodes adoptées	10
1.2. Le calcul de postes particuliers.....	12
2. L'essai système de longue durée de « La Cage » à Versailles	13
2.1. Présentation de la station expérimentale	13
2.2. Acquisition et traitement des données expérimentales	15
2.3. Mise en œuvre des calculs et analyses statistiques.....	16
2.4. Simulation de la substitution de la culture de luzerne	16
3. Etude en réseau d'exploitations agricoles biologiques.....	16
3.1. Présentation de la zone d'étude : Picardie.....	17
3.2. Le réseau d'exploitations agricoles biologiques	17
3.3. Acquisition et traitement des données en exploitation agricole	18
3.4. Mise en œuvre des calculs et analyses statistiques.....	18
Partie III. Résultats et interprétation.....	19
I. Variabilité temporelle des balances minérales de parcelles conduites sous des systèmes de culture différents	19
1.1. Les balances parcellaires en azote.....	19

1.2. Les balances parcellaires en phosphore et potassium.....	26
II. Variabilité spatiale des balances minérales dans le réseau d'exploitations et de parcelles en système de production biologique	31
2.1. Les balances minérales à l'échelle de l'exploitation agricole.....	31
2.2. Les balances minérales à l'échelle de la parcelle agricole	34
Partie IV. Discussion	37
I. Limites et intérêts de l'approche par les balances minérales.....	37
1.1. Retour sur la méthode	37
1.2. Les deux cas d'étude.....	38
1.3. L'interprétation des balances minérales.....	38
II. Effets du système de culture adopté sur les balances minérales	39
2.1. Les balances en azote.....	39
2.2. Les balances en phosphore et en potassium.....	40
III. Variabilité des balances minérales en système de culture biologique	41
IV. Importance de la fixation biologique d'azote	42
V. Eléments d'interprétation des balances minérales.....	42
5.1. Devenir des surplus d'azote	42
5.2. Eléments d'interprétation des balances en phosphore et potassium.....	44
Conclusion	47
Références bibliographiques	49
Annexes	52
A1. Estimation de la quantité d'azote fixée par les légumineuses	52
A2. Teneurs de référence en N, P et K utilisées.....	54
A3. Principaux types de sol en région Picardie	55
A4. Grille d'enquête en exploitation agricole.....	55
A5. Evolution des teneurs en N organique, P total et K échangeable sur La Cage entre 1998, 2002 et 2006.....	58
A6. Tableau de calcul des balances minérales de La Cage	60
A7. Tableau de calcul des balances minérales annuelles à l'échelle de l'exploitation agricole ..	69
A8. Tableau de calcul des balances minérales annuelles à la parcelle en réseau de fermes	70

Introduction

Aujourd'hui, l'agriculture doit faire face à un triple défi : nourrir une population mondiale croissante, ayant dépassé la barre des 7,2 milliards en 2013 et devant atteindre 9,6 milliard en 2050 (ONU), rester compétitive sur le plan économique et préserver l'environnement (atmosphère, biosphère, hydrosphère, lithosphère). Outre la mise en place de zones Natura 2000 pour conserver la biodiversité, les directives européennes portant sur l'eau et les nitrates, renforcées par les diverses réglementations et politiques mises en place au niveau de la France, définissent le cadre le plus précis, qui concerne les pollutions ponctuelle et/ou diffuse d'origine agricole vers les hydrosystèmes (nitrates, phosphates, pesticides). Au niveau des producteurs, s'ajoute le souci d'assurer la pérennité de leur activité à travers, entre autres, la gestion de la fertilité des sols (état organique, disponibilité en éléments minéraux). La finalité de toutes ces mesures est d'assurer la durabilité des systèmes de production agricole.

Afin de répondre aux attentes variées émanant de l'opinion publique, des décideurs politiques, des producteurs agricoles, la recherche s'intéresse aux systèmes de production existants et à ceux dits innovants dans le but de comprendre leur fonctionnement, d'évaluer leurs performances agronomiques, économiques et environnementales et de proposer des voies d'amélioration. L'agriculture biologique (AB), basée sur l'intensification écologique des cultures, se présente d'emblée comme étant une alternative au mode de production conventionnelle, ce dernier faisant usage de grandes quantités d'intrants de synthèse (pesticides, engrais). Le mode de production biologique, soumis à un cahier de charges contraignant, suscite encore des questions, notamment par rapport au maintien du potentiel productif des sols. Depuis de nombreuses années, des organismes dont l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) conduisent des activités scientifiques de recherche et d'expérimentation se rapportant à l'AB. Cependant, les études ont prioritairement traité des questions techniques et économiques.

Le présent travail, effectué dans le cadre du projet ENBIOexpé, s'inscrit dans cette perspective et vise plus particulièrement les impacts agroenvironnementaux, liés aux flux des éléments minéraux du sol, des systèmes de culture biologique. Le plan de travail adopté comprend quatre (04) grandes parties déclinées comme suit :

- ❖ Une première partie servant de cadrage de l'étude, qui présente la structure d'accueil et les objectifs de l'étude réalisée, soulève la problématique et émet les hypothèses qui vont orienter l'ensemble du travail ;
- ❖ Une seconde partie présentant les matériels et méthodes utilisés afin de répondre à la question posée ;
- ❖ Une troisième partie décrivant les principaux résultats avec leur interprétation, et
- ❖ Une quatrième partie nourrissant la discussion sur les résultats obtenus et mettant l'étude en perspective.

Partie I. Cadrage de l'étude

I. Présentation de l'étude

1.1. La structure d'accueil

Le stage de fin d'études a été effectué au sein de l'équipe de l'Unité de Recherche Agro-ressources et Impacts environnementaux ou UR Agro-Impact, sur le site de Laon (02). Il s'agit d'une unité de recherche de l'Institut National de la Recherche Agronomique française (INRA), rattachée au Centre de Lille et au Département Environnement et Agronomie.

Plus spécifiquement, cette étude est réalisée dans le cadre du projet ENBIOexpé ou «Evaluation agri-ENVironnementale expérimentale de systèmes de grandes cultures agri-BIOlogiques », initié par l'UR Agro-Impact et co-financé par l'INRA, le PIREN Seine (Programme interdisciplinaire de recherche sur l'environnement de la Seine) et l'Agence de l'Eau Seine-Normandie. Prévu pour une durée de 3 ans, de 2013 à 2016, ce projet se focalise sur l'étude des systèmes de grandes cultures biologiques en Picardie et Nord Pas-de-Calais ayant peu ou pas d'élevage. ENBIOexpé vise la quantification expérimentale et l'étude de la variabilité des impacts environnementaux *in situ* en fonction des principales composantes des systèmes de production en agriculture biologique ayant dépassé la phase de conversion.

Entreprenant une démarche assimilable à la recherche-action, le projet ENBIOexpé priorise la dimension collaborative à travers l'implication de différents acteurs. Ainsi, les structures suivantes ont contribué directement à la réalisation de cette étude :

L'UMR Agronomie Grignon

Unité mixte de recherche de l'INRA et de l'AgroParisTech, elle s'intéresse à la conception et l'évaluation de systèmes de culture durables, en s'appuyant sur une approche intégrative du fonctionnement des agroécosystèmes. En partenariat avec le projet ENBIOexpé, l'UMR met à la disposition son essai de longue durée en grandes cultures et contribue aussi à l'analyse systémique des systèmes de culture à base de légumineuses.

Agro-Transfert Ressources et Territoires

Agro-Transfert Ressources et Territoires est une association soutenue par le Conseil Régional de Picardie et le FEDER (Fonds européen de développement régional) visant au transfert d'innovation en agronomie et agro-écologie vers les acteurs du développement agricole et des territoires. Elle constitue une interface pour la mise en relation des entités de la recherche avec les agriculteurs biologiques et les conseillers des Chambres d'agriculture. Le projet « Agri-Bio : de la connaissance à la performance », portée par cette association et

partenaire du projet ENBIOexpé, vise à caractériser les facteurs de performance des systèmes de production en AB à dominante grandes cultures et à capitaliser sur les solutions issues de la recherche et celles imaginées par les agriculteurs. Ce projet collaboratif entre recherche, développement agricole et agriculteurs est réalisé sur la base d'un réseau de fermes sur un territoire regroupant la Picardie et le Nord Pas-de-Calais qui fournit ainsi le deuxième cas d'étude de ce travail.

1.2. Les enjeux et objectifs de l'étude

Mon travail s'inscrit dans le cadre de la troisième tâche du projet ENBIOexpé, à savoir : « la quantification et l'analyse de la variabilité de la balance NPK, du drainage d'eau, de la minéralisation, de la lixiviation et de la fixation symbiotique d'azote et du rendement, en parcelles agricoles et en station expérimentale ». Cette étude constitue également un préalable au projet de thèse portant sur l'évaluation agro-environnementale des systèmes de culture biologiques, liée aux cycles de l'eau, de l'azote et du carbone dans le Nord de la France.

Ainsi ce travail intitulé « étude de la variabilité inter-parcellaire et interannuelle des balances en éléments minéraux (N, P et K) en système de culture biologique » répond aux objectifs multiples suivants :

- Etablir les balances en N, P et K à moyen et long termes sur les deux cas d'étude du projet ENBIOexpé : l'essai système de longue durée et le réseau d'exploitations agricoles biologiques,
- Identifier et expliciter la variabilité interannuelle et inter-parcellaire des balances minérales en fonction des systèmes de culture.

II. Problématique

2.1. L'Agriculture biologique en France

L'IFOAM ou *International Federation of Organic Agriculture Movement* définit l'Agriculture Biologique (AB) comme étant un «système de production qui maintient et améliore la santé des sols, des écosystèmes et des personnes. L'agriculture biologique s'appuie sur des processus écologiques, la biodiversité et des cycles adaptés aux conditions locales, plutôt que sur l'utilisation d'intrants ayant des effets adverses. »

En France, ce mode de production est encadré par un cahier des charges européen strict (règlement N°834/2007 et N°889/2008). Il se base sur l'équilibre entre sol, élevage et cultures, et interdit l'utilisation des produits chimiques de synthèse et des organismes génétiquement modifiés. Les derniers chiffres relatifs à l'agriculture biologique française font état de 1 060 000 hectares cultivées en bio en mai 2013, gérées par 25 031 fermes, pour un marché total évalué à 4,17 milliards d'euros (Agence Bio, 2013). Le contexte actuel en France joue en faveur du développement du système bio, que ce soit par rapport à la volonté

politique concrétisée par la loi de Grenelle, le lancement du programme «Ambition Bio 2017», l'essor du marché et à la demande croissante des consommateurs, ou les tendances promouvant une production plus écologique et plus respectueuse de l'environnement.

En Picardie, la promotion de la production biologique s'inscrit dans les actions stratégiques du plan régional d'agriculture durable (PRAD), définissant les grandes orientations de la politique agricole pour une période de sept ans. Dans cette région, l'agriculture biologique représente une part faible – 6 887 hectares certifiées « bio », soit 0,7% de la SAU biologique de France, pour 229 fermes - mais croissante (évolution de 25% de la surface cultivée en 2012 par rapport à 2011). Les cultures grandes cultures (céréales et oléo-protéagineux) y représentent 38,9% des surfaces biologiques (Agence Bio, 2013). Le projet Agri-bio mené par Agro-transfert vise à identifier les atouts et freins des systèmes de culture biologique sans ou avec peu d'élevage.

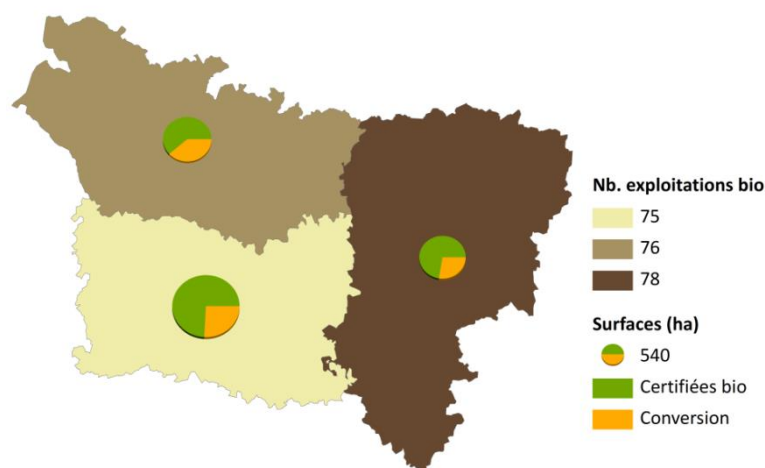


Figure 1. Répartition de l'agriculture biologique en Picardie en 2012

2.2. L'importance du bilan des éléments majeurs

On s'intéresse aux trois éléments minéraux dits majeurs, azote, phosphore et potassium, compte tenu de l'importance de la gestion de l'alimentation minérale des cultures pour la durabilité des productions agricoles, les impacts potentiels de la fuite des éléments azote et phosphore vers les hydrosystèmes et l'atmosphère, et leur dépendance à des ressources minières non renouvelables.

Parmi les nombreux outils destinés à évaluer les impacts environnementaux liés aux systèmes de production agricole, les bilans minéraux résument et facilitent la compréhension du cycle des éléments minéraux dans les agrosystèmes (Oenema *et al.*, 2003). Ils mettent en évidence les dynamiques d'enrichissement ou d'appauvrissement des sols en éléments minéraux, sans pour autant présager les risques de transfert des parcelles agricoles vers l'écosystème (Fourrie, 2011). Cette méthode présente les multiples avantages d'être *a priori* facile à établir, d'être à la fois un indicateur préliminaire intéressant pour des recherches plus

poussées et un outil de communication efficace pour un public plus large (décideurs, agriculteurs).

Le principe des bilans repose sur la conservation des masses appliquée à un système donné aux limites bien définies : les flux entrant, les flux sortant et la variation de stock de l'élément dans le système doivent s'y annuler (Mary *et al.*, 2002, Oenema *et al.*, 2003, Meisinger *et al.*, 2008). Les flux d'élément se réfèrent normalement aux divers processus de transfert et de stockage du cycle bio-géo-chimique de l'élément en question dans l'écosystème étudié. Dans la pratique, le terme « bilan minéral » ou « bilan nutritif » (*nutrient budget*) se limite aux flux d'éléments minéraux au sein d'un agrosystème. La balance minérale (*nutrient balance*) correspond au solde « entrées – sorties » du système agricole au cours d'une période donnée, et son interprétation passe par la compréhension des processus régulant les dynamiques d'éléments nutritifs ainsi que par l'analyse de leur variabilité à l'échelle spatiale et temporelle (Öborn *et al.*, 2003).

Une revue bibliographique des balances minérales a montré que les références disponibles en systèmes de grandes cultures biologiques sans élevage ne sont pas suffisamment nombreuses : moins de 3% des études réalisées sur 88 exploitations issues de 8 pays tempérés (Stockdale & Watson, 2002). Les études antérieures indiquent que les balances minérales établies en système biologique, présentent des gammes de valeurs qui varient beaucoup selon les auteurs et les situations étudiées (Watson *et al.*, 2002, Oehl *et al.*, 2002, Berry *et al.*, 2003, Gosling et Shepherd, 2005, Arronsson *et al.*, 2007, Kelm *et al.*, 2008, Molé, 2008, Nesme *et al.*, 2012).

2.3. Dynamique des éléments minéraux dans l'agroécosystème

L'étude des flux d'éléments minéraux au sein des systèmes de production agricole requiert une compréhension de leur dynamique dans les écosystèmes cultivés.

2.2.1. Azote

L'azote est un élément présent en abondance, sous sa forme chimiquement inerte ou « azote non réactif » (diazote N_2), dans l'atmosphère. L'azote réactif correspond aux différents composés azotés issus des 9 états d'oxydation de cet élément chimique, à savoir : les formes réduites (ammoniac NH_3 , ion ammonium NH_4^+ , acides aminés et protéines $R-NH_2$, hydroxylamine NH_2OH) et les formes oxydées (protoxyde d'azote N_2O , monoxyde d'azote NO , dioxyde d'azote NO_2 , nitrite NO_2^- et nitrate NO_3^-). Le cycle de l'azote est régi par des processus chimiques et biologiques permettant le passage d'une forme à une autre, ces formes étant généralement regroupées selon trois grands réservoirs : azote organique (acides aminés, protéines...), azote minéral (NO_3^- ...) et composés gazeux (N_2 , NH_3 , N_2O ...), dont la taille varie suivant que le système est naturel ou anthropisé (Mariotti, 1996).

Dans les écosystèmes cultivés, le compartiment d'azote organique du sol est généralement constitué de 3 à 10 t ha⁻¹ et le pool d'azote minéral d'une dizaine à quelques centaines de kilogrammes par hectare. Le cycle de l'azote à l'échelle d'une parcelle cultivée (Figure 2) peut être représenté, d'une part, par les flux qui alimentent le stock d'azote minéral dans le sol : (i) la minéralisation de l'humus, de la biomasse microbienne, des résidus de culture et des produits résiduels organiques, (ii) la fixation symbiotique des légumineuses et la fixation libre de diazote, (iii) les apports d'azote minéral des engrais et des fertilisants organiques (fumiers, lisiers ...), (iv) les dépôts atmosphériques par voie sèche ou humide. D'autre part, les flux qui contribuent à diminuer le pool minéral d'azote sont : (i) l'exportation par les récoltes, (ii) l'organisation de l'azote minéral dans la biomasse microbienne, (iii) les pertes par volatilisation de l'azote ammoniacal, (iv) les pertes gazeuses au cours des processus biologiques de dénitrification et de nitrification, et (v) les pertes par lixiviation de l'azote nitrique (COMIFER, 2011). Les cultures prélèvent l'azote dans le sol, essentiellement sous forme d'ions nitrates (NO₃⁻) et ammonium (NH₄⁺).

L'ensemble des processus de transformation et de transfert conduisent à redistribuer en permanence l'azote entre les différents compartiments de l'environnement et ce, sur une large gamme de distances. La cascade de l'azote désigne le cheminement à travers les différents compartiments de la pédosphère, de la biosphère et de l'atmosphère, d'un atome d'azote introduit sous forme d'azote réactif, avant de retourner dans le réservoir de diazote atmosphérique. Il s'agit d'une vision dynamique qui permet de traduire la complexité du devenir et des impacts de l'azote dans l'environnement (Billen *et al.*, 2012, Cellier *et al.*, 2012). Certains composés réactifs sont aisément transférés vers des ressources naturelles qu'ils polluent : NH₃ par volatilisation affectant la biodiversité, N₂O ayant un effet de serre, NO₃ provoquant l'eutrophisation littorale.

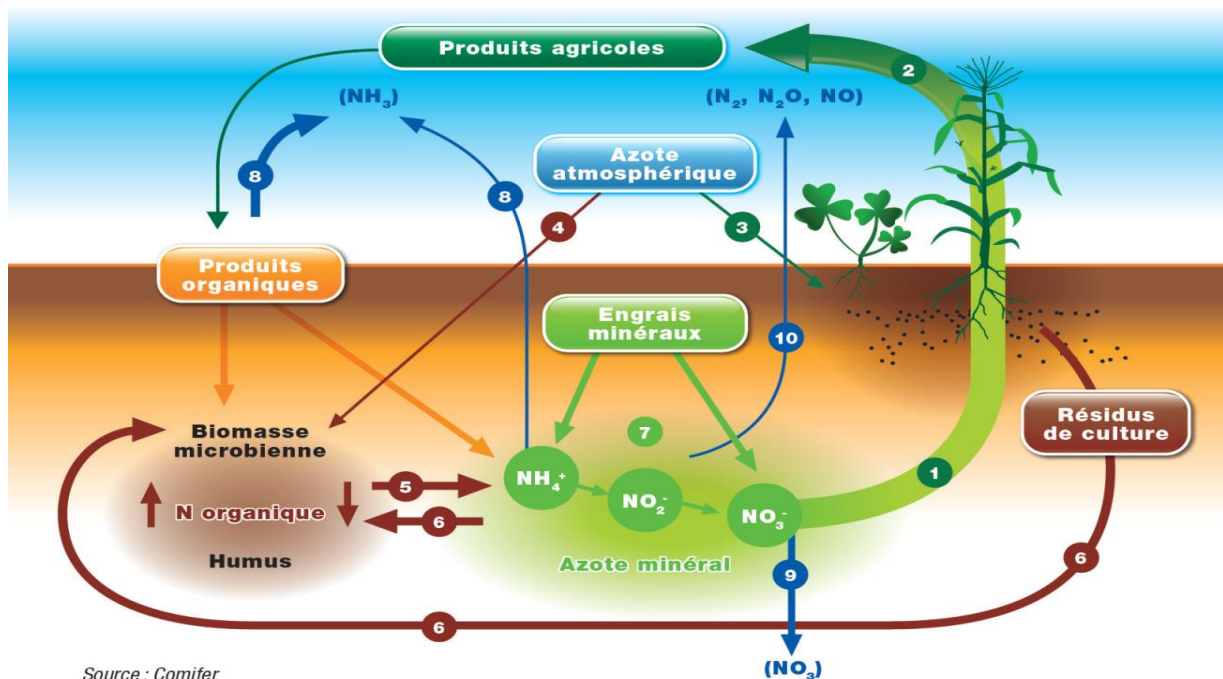


Figure 2. Cycle simplifié du cycle de l'azote dans un sol cultivé (COMIFER, 2011)

1. absorption racinaire, 2. exportation par les récoltes, 3. fixation symbiotique, 4. fixation libre, 5. minéralisation, 6. organisation, 7. nitrification, 8. volatilisation, 9. lixiviation, 10. dénitrification

2.2.2. Phosphore

Le phosphore peut être classé selon ses formes dissoutes et particulaires, et ses formes minérale et organique. Seul le phosphore présent dans la solution du sol, sous la forme d'ions orthophosphates, est directement assimilable par les plantes. Certaines espèces peuvent rendre le phosphore plus disponibles (Hinsinger *et al.*, nd).

A la différence de l'azote, le phosphore n'est pas contenu en grande quantité dans l'atmosphère mais s'accumule dans l'écosystème terrestre. Il est concentré dans la partie superficielle du sol, sous forme minérale ou organique. Sous sa forme minérale, il est soit naturellement peu mobile, soit rendu peu mobile en particulier du fait de conditions physicochimiques particulières dans le sol (pH, milieu calcaire, etc.). Le cycle du phosphore en agriculture est résumé dans la Figure 3.

Une quantité de phosphore excessive dans les eaux de surface, combinée à une concentration en nitrates élevée est dommageable pour l'environnement. En effet, le phosphore favorise la croissance rapide de la flore aquatique et la prolifération des cyanobactéries, contribuant ainsi à l'eutrophisation des milieux aquatiques.

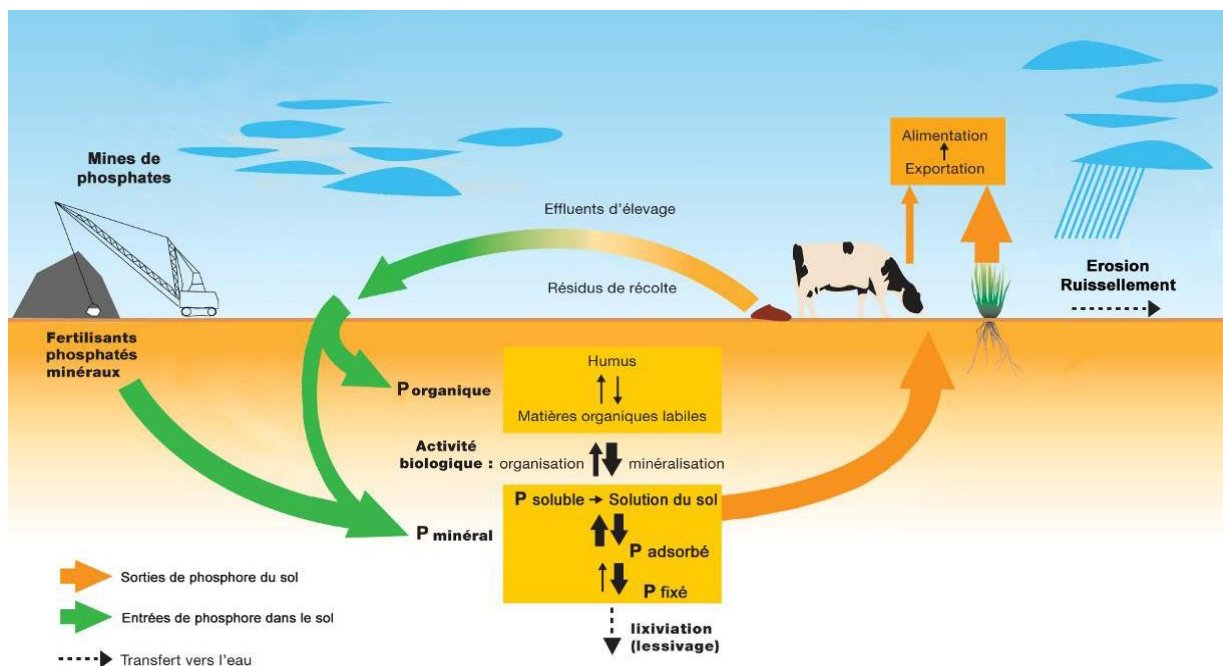


Figure 3. Cycle du phosphore en agriculture (Duanmu, 2009)

2.2.3. Potassium

La réserve en potassium du sol est généralement trois fois plus importante que celle du phosphore. Dans le sol, le potassium se trouve sous plusieurs formes. D'une part, sous sa forme ionique K^+ , il est à la fois présent dans la solution du sol et adsorbé à la surface du complexe absorbant. Cet ensemble constitue le potassium échangeable, représentant l'offre potentielle du sol pour les plantes. D'autre part, le potassium existe en abondance sous des formes non assimilables par les cultures : soit il est inclus entre les feuillets des argiles, soit il entre dans la constitution des minéraux primaires (feldspaths et micas). La libération du potassium de la fraction argile des sols ainsi que les processus d'altération de la roche-mère sont des phénomènes qui interviennent lentement dans le sol. Le cycle du potassium en agriculture est présenté en figure 4.

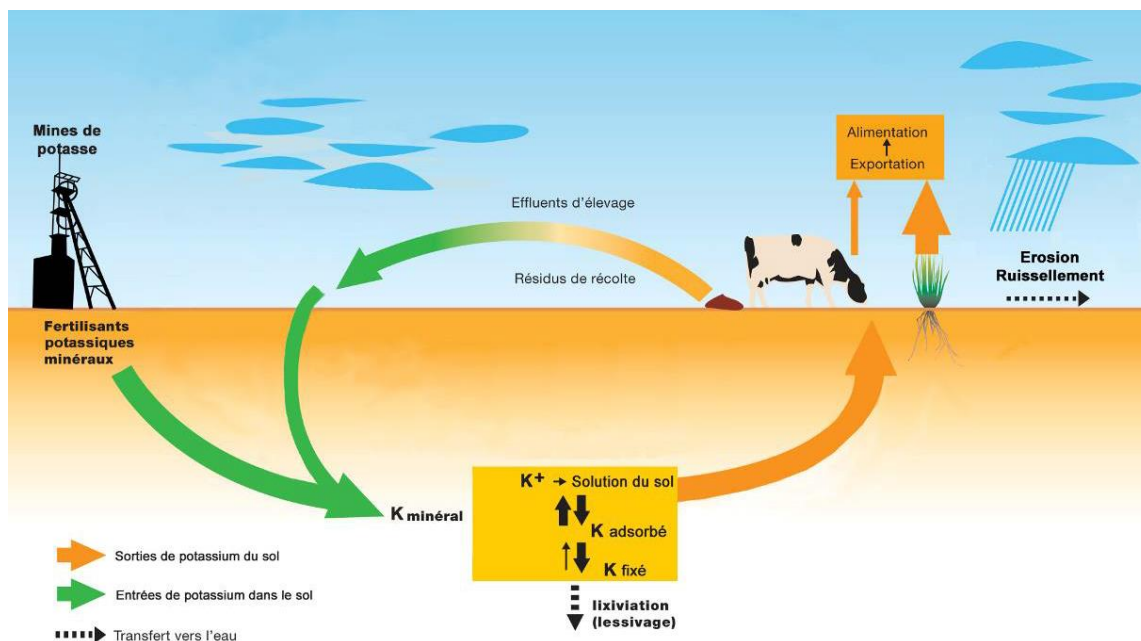


Figure 4. Cycle du potassium en agriculture (Duanmu, 2009)

2.4. La question de recherche et les hypothèses de départ

La problématique soulevée par cette étude consiste à «analyser la variabilité des balances minérales à l'échelle du moyen/long terme et à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation, en systèmes de culture biologiques.» On se propose ainsi d'étudier le comportement des balances minérales sous différents angles, en essayant de répondre aux questions suivantes : (i) y a-t-il une différenciation des balances minérales selon le système de culture adopté ? (ii) comment évoluent-elles en fonction de l'échelle temporelle considérée ? (iii) comment se présentent les balances minérales en situation agricole biologique, à l'échelle de l'exploitation et à l'échelle de la parcelle ? Pour ce faire, les hypothèses de départ suivantes sont considérées, en se référant à la bibliographie :

H1 : Les balances minérales sont significativement différentes en système de culture biologique.

H2 : A l'échelle annuelle, la variabilité des balances minérales est très marquée, tandis qu'à moyen/long terme, la tendance est au surplus azoté et aux déficits en phosphore et potassium, en système de culture biologique.

H3 : En grandes cultures biologiques, la fixation symbiotique de l'azote constitue un poste critique pour l'établissement des balances azotées.

Partie II. Matériels et méthodes

Dans l'optique de fournir des premiers éléments d'évaluation agro-environnementale des systèmes de production biologiques, cette étude priorise deux approches complémentaires pour étudier les balances en éléments minéraux. D'une part, s'appuyer sur un essai de longue durée présente le double intérêt de prospecter les évolutions des flux en éléments minéraux à des échelles temporelles différentes et de confronter les balances minérales de systèmes de culture différents. D'autre part, le réseau de fermes en agriculture biologique permet d'appréhender les variantes d'un même mode de production biologique sur une gamme de contextes pédoclimatiques plus large.

I. Les balances minérales : concept méthodologique

Le principe des balances minérales est simple et reste invariant. Toutefois, il est nécessaire de délimiter le domaine d'étude et d'en définir les grands choix stratégiques.

1.1. Les méthodes adoptées

Il existe de nombreuses façons d'établir un bilan des éléments minéraux. Oenema *et al.* (2003) ont mis en évidence que, (i) l'approche méthodologique à adopter, (ii) les agrosystèmes et l'échelle à étudier, (iii) la stratégie d'acquisition des données ainsi que (iv) la précision et la finesse du bilan minéral à établir dépendent de la finalité de l'étude à réaliser. A titre d'exemple, l'OCDE s'appuie sur les « bilans bruts en azote », calculés à des échelles géographiques très larges (régions ou pays) à partir notamment de la base de données statistiques de la FAO, pour faire un état des lieux de la pression minérale des systèmes agricoles de chaque pays membre sur le milieu (OCDE, 2008).

Dans le cadre de cette étude, nous avons opté pour deux approches différentes : le bilan à la surface du sol et le bilan apparent à l'exploitation, correspondant à deux échelles spatiales différentes (la parcelle cultivée et l'exploitation agricole). Les balances minérales sont définies comme étant la différence entre les entrées totales en élément et les exportations par les produits. Pour l'azote, la résultante ainsi obtenue correspond à la somme des flux potentiellement émis vers l'atmosphère, par la volatilisation de l'ammoniac et les phénomènes de nitrification/dénitrification de l'azote, vers les hydrosystèmes par la lixiviation des nitrates, ainsi que la variation des stocks dans les pools azote organique et minéral du sol. Pour le phosphore et potassium, les balances correspondent aussi à l'ensemble formé par la variation de stock en élément et les pertes vers le milieu.

1.1.1. A l'échelle de la parcelle

La parcelle est à la fois l'unité de base pour la mise en œuvre des pratiques agricoles et l'unité élémentaire d'émission diffuse des polluants d'origine agricole (CORPEN, 2007). La méthode du bilan à la surface du sol ou *soil surface budget* permet d'établir un solde « entrées –

sorties » en élément minéral à l'échelle de la parcelle, sans considérer les processus internes au compartiment sol.

Pour l'azote, les entrées totales correspondent à la somme des apports par la fertilisation organique et minérale, des apports par dépôt d'azote atmosphérique et par fixation d'azote par l'association légumineuses – *Rhizobia*. Pour le phosphore et le potassium, les entrées comprennent uniquement les apports par les engrais (minéraux et/ou effluents). Les flux sortants, quant à eux, correspondent aux exportations d'élément par les produits, incluant les récoltes en grains ou autres parties végétatives, et les résidus de culture (pailles, fanes) exportés de la parcelle. Le pas de temps des calculs est annuel, en se référant à une « année récolte », c'est-à-dire en reconstituant les flux d'élément intervenant au cours d'une campagne culturale donnée : depuis la période interculturelle précédente jusqu'à la récolte de la culture principale. Les balances établies sont ensuite pondérées par la surface de la parcelle considérée.

$$\text{Balance en N} = (N \text{ engrais} + N \text{ déposé} + N \text{ fixé}) - N \text{ exporté}$$

$$\text{Balance en P (ou K)} = P \text{ (ou K) engrais} - P \text{ (ou K) exporté}$$

1.1.2. A l'échelle de l'exploitation

L'échelle de l'exploitation est l'unité de décision, d'action et de réalisation de revenu. C'est à ce niveau que l'agriculteur fait les choix stratégiques et en détermine les modalités techniques. L'ensemble des pratiques culturales sont aussi enregistrées à ce niveau (CORPEN, 2007). Etablir les balances minérales à cette échelle permet ainsi de considérer l'exploitation dans sa globalité. La méthode utilisée s'inspire de celle du « bilan apparent des minéraux » adapté par Vertès *et al.* en 2005, à laquelle des réajustements opérationnels ont été apportés (cf. §1.2.). Il s'agit d'une variante du *farm-gate budget*, largement utilisée dans les études antérieures, qui consiste à considérer une exploitation agricole comme une boîte noire.

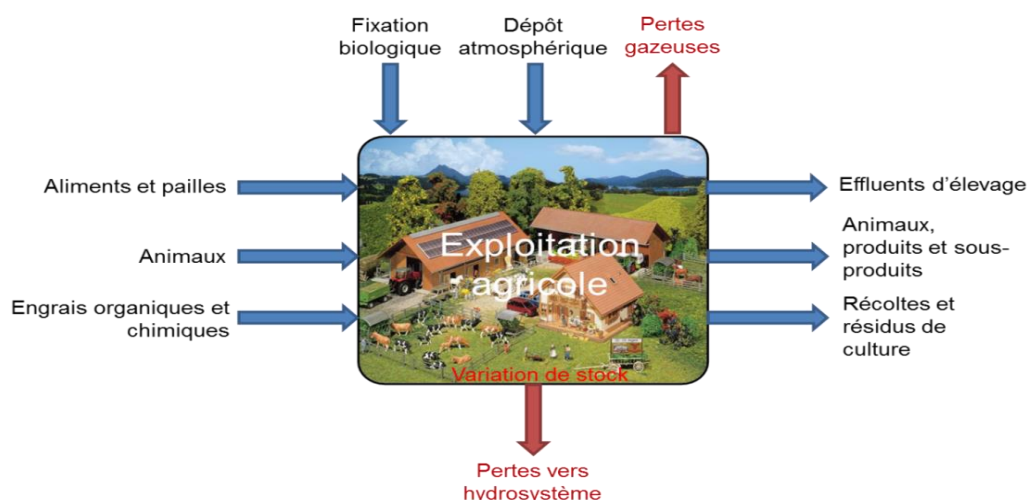


Figure 5. Représentation schématique des postes de calcul de la balance azotée à l'exploitation

Les postes pris en compte en entrées et sorties dans le calcul sont représentés par les flèches bleues. Les pertes gazeuses et vers les hydrosystèmes, ainsi que la variation de stock en élément à l'exploitation correspondent au solde des flux entrant et sortant.

Les flux pris en compte concernent uniquement les entrées et sorties en éléments « à la porte de l'exploitation », à savoir : les achats, ventes et/ou échanges de produits (animaux, végétaux, fertilisants) réalisés, auxquels s'ajoutent les entrées non anthropiques d'azote (par déposition atmosphérique et par fixation symbiotique). Le solde de minéraux ainsi obtenu est ramené à l'hectare de la surface agricole utile (SAU) de l'exploitation. La période de calcul correspond généralement à l'année comptable, de façon à obtenir plus rapidement les informations (achats, ventes, variations de stocks végétaux et animaux). Les flux en interne sont ignorés, puisqu'ils sont considérés comme s'annulant lors des recyclages et transferts entre systèmes de culture et/ou ateliers d'élevage. La faible contribution des semences aux flux d'élément en entrée n'est pas prise en compte.

Il faut souligner que l'approche adoptée ne dissocie pas, à l'échelle de l'exploitation agricole, la part conduite selon le mode de production biologique et celle en cours de conversion, voire maintenue en conventionnelle. L'objectif est en effet d'étudier le plus fidèlement possible les réalités dans les exploitations agricoles pratiquant l'agriculture biologique.

1.2. Le calcul de postes particuliers

➤ La déposition atmosphérique d'azote :

Les retombées atmosphériques d'azote correspondent à la déposition par voie humide (par l'intermédiaire des précipitations) et par la déposition par voie sèche (déplacement de particules et poussières par le vent). Les quantités prises en compte dans les calculs proviennent des estimations départementales dans le cadre du programme EMEP (*European Monitoring and Evaluation Program*).

➤ L'estimation de l'apport d'azote par fixation symbiotique (N fixé) :

L'entrée d'azote par fixation symbiotique concerne toutes les espèces de légumineuses présentes dans l'assolement de l'exploitation, que ce soit en cultures principales ou en cultures intermédiaires. A défaut de pouvoir quantifier directement les quantités d'azote fixé à chaque culture, on a recours à un modèle empirique estimant « N fixé » à partir de la quantité d'azote accumulée dans la biomasse aérienne récoltée des légumineuses, puis corrigée par un facteur multiplicatif de la quantité d'azote dans les parties souterraines. (Anglade *et al*, *in prep.*) Les détails du calcul et les hypothèses de travail relatifs à ce poste sont présentés en annexes (cf. Annexes A1).

➤ Les flux liés à l'élevage :

Dans cette étude, le calcul des postes liés à la présence d'atelier d'élevage intervient uniquement à l'échelle de l'exploitation agricole, soit par les entrées en éléments (via l'importation d'aliments pour les animaux ou de pailles pour les bâtiments d'élevage, et/ou les achats de cheptel), soit par les sorties en éléments (via les ventes et/ou échange de cheptel, de produits animaux et de sous-produits animaux). Afin de faciliter la prise en compte des flux

liés à l'élevage, on considère une situation à l'équilibre, intégrant les variations saisonnières et ne variant pas d'une année à l'autre.

➤ L'importation et l'exportation de produits :

Lorsque les valeurs des teneurs en élément des produits fertilisants et/ou des grains récoltés ne sont pas localement disponibles ou renseignées par l'exploitation agricole, on a recours à des références issues de la littérature. Les valeurs utilisées et les sources correspondantes sont présentées en annexes (cf. Annexes A2).

2. L'essai système de longue durée de « La Cage » à Versailles

2.1. Présentation de la station expérimentale

L'expérimentation système de longue durée de « La Cage » a été mise en place en 1998, dans l'objectif de concevoir et d'évaluer des systèmes de culture économiquement viables tout en préservant l'environnement (Bertrand *et al.*, 2005). Le site est localisé à Versailles (48.81°N, 2.14°E), en région Ile-de-France.

2.1.1. Les caractéristiques pédoclimatiques

Il s'agit d'un sol limoneux profond bien drainé, de texture moyenne en surface avec 17% d'argile, 56% de limons et 27% de sables. Il est sensible à la battance (indice de battance > 1,6) et présente un pH neutre (autour de 7,3). C'est un sol à fortes potentialités agronomiques (Bertrand *et al.*, 2005). Le site de La Cage est soumis à un climat de type tempéré, avec des précipitations moyennes annuelles de 652 mm et des températures moyennes mensuelles allant de 2,8°C à 18,9°C (données de la station de Versailles, de 1998 à 2012).

2.1.2. Les systèmes de culture étudiés

L'essai de longue durée accueille des systèmes à dominance de cultures céréalières (une culture de blé tous les deux ans), sans apports d'effluents d'élevage mais avec une restitution des résidus, et à rotation courte (quatre ans). Quatre types de systèmes de culture y sont testés : un système de culture biologique, un système de culture dit « productif » ou conventionnel, un système de culture intégré, et un système de culture en semis direct sur couvert végétal ou SCV (Tableau 1).

Les systèmes de culture étudiés évoluent au cours de l'expérimentation par la prise en compte des résultats des années passées (démarche en boucle de progrès) et par l'intégration des innovations techniques proposées aux agriculteurs. Chaque système présente deux variantes ou sous-systèmes de culture, dont les cultures sont décalées au sein de la même succession culturale. Cependant, en biologique et SCV, la nature des cultures peut aussi varier entre deux sous-systèmes. (Figure 6)

Tableau 1. Caractérisation des systèmes de culture mis en place dans l'essai

Système de culture	Biologique	Productif	Intégré	SCV
Objectif	Maximisation du rendement et des revenus			
Contraintes	Respect du cahier des charges de l'agriculture biologique	Aucune	Raisonnement des interventions culturales et réduction des intrants	Réduction du travail du sol, utilisation de couvert végétal vivant
Rotation culturale	2 ans de blé et 2 ans avec d'autres cultures (pois, colza, lupin, soja, luzerne)	Pois – Blé – Colza – Blé	Pois – Blé – Colza – Blé	2 ans de blé et 2 ans avec d'autres cultures (pois, colza, maïs, avoine, luzerne)
Gestion de la fertilisation	Apport d'engrais organiques (guano, farine de plumes, engrais PK...)	Apports d'engrais organiques et minéraux Fertilisation azotée systématique sauf en légumineuses Fumure de correction PK fréquente (1 an sur 2 ou 1 an sur 3) Dose d'apport calculé variant selon l'objectif de rendement fixé		
Gestion de l'interculture	Sans légumineuses en culture intermédiaire			Légumineuses (vesce, trèfle blanc)
Gestion des résidus de culture	Résidus de culture non exportés de la parcelle			
Rendements moyens en blé	55 q/ha (20 – 90 q/ha)	98 q/ha (67 – 119 q/ha)	90 q/ha (69 – 107 q/ha)	73 q/ha (54 – 95 q/ha)

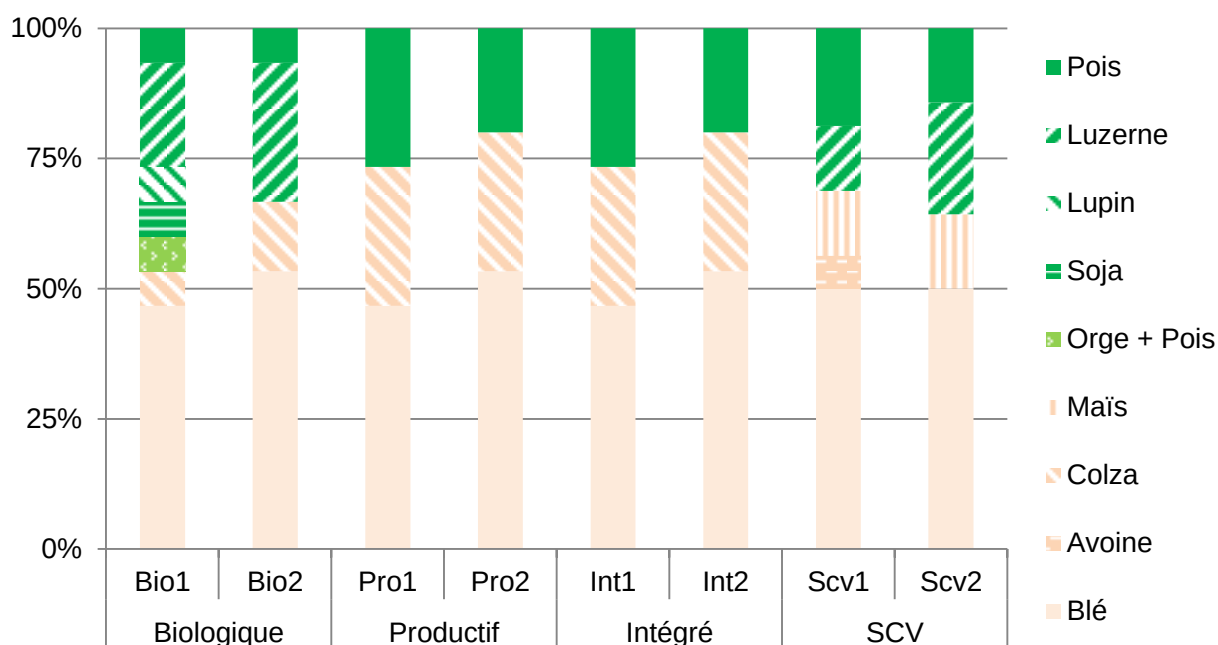


Figure 6. Fréquence de chaque culture dans la succession culturale au cours de l'essai de longue durée selon les sous-systèmes de culture testés

La céréale dominante (blé) est représentée par le figuré uni clair, les céréales secondaires (avoine, maïs) et oléagineux (colza) sont représentées par les nuances de figurés clairs, et les légumineuses (lupin, luzerne, pois, soja) par les figurés en vert.

2.1.3. Le dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est composé de deux blocs-répétition divisés en quatre traitements correspondant aux quatre systèmes de culture testés. Chaque traitement est divisé en deux parcelles élémentaires correspondant à un sous-système de culture chacun ayant la même rotation culturale mais se différenciant par la nature de la culture. Une parcelle élémentaire représente environ 72m * 78m, soit 0,5 ha. A ces dernières, on attribue des numéros d'identification particulières.

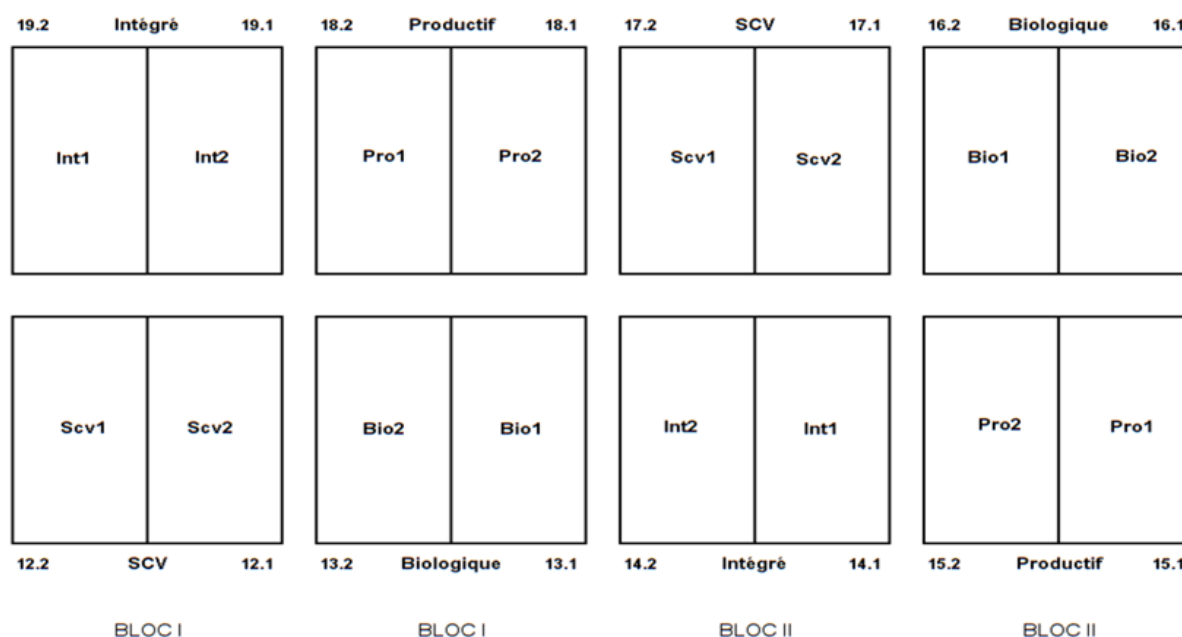


Figure 7. Représentation schématique du dispositif expérimental

2.2. Acquisition et traitement des données expérimentales

Le dépouillement des fiches de suivi parcellaire de l'expérimentation, établies année par année, a permis d'obtenir les informations relatives aux itinéraires techniques de chaque système de culture, notamment la conduite de la fertilisation. Quant aux rendements en grains des cultures, les informations sont issues d'une base de données synthétisant les productions. Tous les renseignements ainsi acquis sont vérifiés puis validés auprès des responsables de la station expérimentale pour s'assurer de leur fiabilité et de leur précision. A ces données s'ajoutent, d'une part, des informations concernant les évolutions des analyses de sol mesurées par parcelle élémentaire à trois dates différentes (1998, 2002 et 2006), notamment les teneurs en azote organique, phosphore et potassium du sol ; et d'autre part, les teneurs en éléments des échantillons des trois dernières récoltes de l'essai (2010, 2011 et 2012), analysées en laboratoire.

2.3. Mise en œuvre des calculs et analyses statistiques

A chaque parcelle élémentaire de l'essai de longue durée sont renseignés, année par année, les différents flux minéraux intervenant dans le calcul des balances, qui se résume comme suit :

$$Balance\ parcellaire = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n entrées_i - \sum_{i=1}^n sorties_i \right)$$

La valeur de n, correspondant aux nombres des années considérées, varie selon l'échelle temporelle retenue pour l'établissement des balances minérales. Réaliser les calculs au pas de temps annuel, pour chacune des parcelles élémentaires de l'essai, permet d'obtenir un échantillon de 240 observations qui serviront à l'étude de la variabilité interannuelle des balances minérales. Ensuite on a agrégé les balances minérales, d'une part, à l'échelle d'une rotation quadriennale complète, en considérant n = 4, sur trois périodes différentes, à savoir de 1999 à 2002, de 2003 à 2006 et de 2007 à 2010. Les balances ainsi obtenues correspondent à l'échelle du moyen terme. D'autre part, on a établi les balances minérales en considérant l'essai depuis sa mise en place jusqu'à la dernière récolte renseignée, soit de 1998 à 2012 (n = 15), dans l'optique de comprendre leurs tendances à long terme.

Pour chaque échelle temporelle considérée, des analyses statistiques ont été réalisées de façon indépendante, entre les trois éléments minéraux. Les statistiques descriptives, analyses de la variance, les études de corrélation sont réalisées sur le tableur EXCEL et à l'aide du logiciel STATISTICA.

2.4. Simulation de la substitution de la culture de luzerne

Afin de vérifier l'influence de l'introduction de la culture de luzerne sur les balances minérales, nous avons proposé de réaliser une simulation. Il s'agit ici de comparer le scénario initial, correspondant aux pratiques observées au cours de l'essai sur les huit parcelles conduites en système de culture biologique et en SCV, à un scénario fictif dans lequel la luzerne est substituée par du pois. Le choix s'est porté sur le pois, qui constitue la légumineuse principale utilisée au cours de cet essai système de grandes cultures, permettant ainsi d'attribuer les moyennes obtenues par chaque système de culture comme base de rendement pour la simulation des années avec substitution.

3. Etude en réseau d'exploitations agricoles biologiques

Ce deuxième cas d'étude permet d'intégrer la parcelle agricole dans son contexte, en tant qu'élément du système d'exploitation.

3.1. Présentation de la zone d'étude : Picardie

La Picardie, périmètre retenu pour cette étude, fait partie des régions d'intervention des deux projets ENBIOexpé et Agri-Bio. Située dans la partie septentrionale de la France, la région s'étend sur environ 19 440 km² et se caractérise par sa forte potentialité agricole.

Le relief de la Picardie est peu contrasté, principalement constitué de plateaux, entrecoupés de vallées. Le climat est de type océanique, marqué de nuances continentales vers l'intérieur. Les précipitations annuelles moyennes se situent autour de 620 mm, et sont bien réparties dans l'année avec une valeur mensuelle d'environ 50 à 60 mm. Les températures mensuelles moyennes varient entre 4,6°C à 22,3°C. La gamme de sols rencontrés en Picardie est vaste, puisque les formations géologiques et la couverture pédologique sont très hétérogènes, mais globalement les sols à limons profonds sont dominants (cf. Annexes A3).

3.2. Le réseau d'exploitations agricoles biologiques

L'agriculture biologique picarde se caractérise par une rotation culturale généralement courte (quatre à cinq ans), par opposition aux rotations de plus de huit ans dans les régions Alsace, Bretagne, Champagne-Ardenne, Normandie...) (Gerber et al, 2011). Les rotations en absence d'élevage ou avec un élevage avicole reposent sur un protéagineux suivi de deux voire trois céréales d'hiver et de printemps, par exemple : féverole – blé – céréales secondaires (épeautre ou triticale) – maïs grain. Le réseau de fermes du projet Agri-Bio est constitué de quinze exploitations biologiques réparties dans les régions Picardie et Nord Pas-de-Calais. Formalisé en Juin 2013, le réseau se construit progressivement et son lancement a connu un retard par rapport à la planification initialement prévue. Les exploitations agricoles (EA) retenues pour l'étude sont donc sélectionnées en fonction de l'avancement des travaux du projet partenaire. Il s'agit notamment de quatre fermes picardes, pouvant être classées selon l'orientation stratégique de leurs productions : grandes cultures sans élevage, grandes cultures avec élevage avicole, polyculture-élevage bovin lait, polyculture-élevage bovin viande. Ces exploitations agricoles sont caractérisées par plus de dix ans de pratique en agriculture biologique.

Tableau 2. Caractérisation des exploitations agricoles étudiées

Exploitation agricole	EA1		EA2		EA3		EA4	
Orientation économique	Grandes cultures sans élevage		Polyculture – élevage de bovin à lait		Grandes cultures avec aviculture		Polyculture – élevage de bovin à viande	
Ancienneté de l'AB	13 ans		11 ans		15 ans		18 ans	
Années renseignées	2010	2011	2011	2012	2011	2012	2011	2012
SAU totale (ha)	115	127	154	163	150	150	211	212
Proportion en AB (%SAU)	67	82	58	79	100	100	79	100
Proportion des légumineuses (%SAU)	19	33	23	27	13	24	12	14

Sur chaque exploitation, deux parcelles de culture conduites en système biologique sont identifiées et sélectionnées par les agriculteurs, en concertation avec les conseillers agricoles et les responsables du projet Agri-Bio, pour faire l'objet des suivis agronomiques et environnementaux. Il s'agit en principe de parcelles présentant des contraintes particulières, liées à la maîtrise des adventices ou au potentiel de production du sol. Pour économiser le temps des agriculteurs, ces mêmes parcelles sont retenues, dans le cadre de cette étude, pour l'établissement des balances minérales à moyen terme à l'échelle de la parcelle.

3.3. Acquisition et traitement des données en exploitation agricole

L'acquisition des données nécessaires à l'étude des balances minérales s'est faite par enquêtes conduites de deux manières complémentaires :

- par la valorisation des entretiens semi-dirigés effectués par les conseillers des Chambres d'Agriculture, dans le cadre du projet Agri-Bio, auprès des agriculteurs, qui portent sur la caractérisation de l'exploitation agricole, la compréhension de son fonctionnement et de ses stratégies globales, et le recueil des données sur les deux parcelles ;
- par des enquêtes effectuées, par nous-mêmes, auprès des exploitations agricoles dans le but de recueillir les compléments d'informations nécessaires au calcul des balances minérales aux deux échelles (cf. Annexes A4)

Tous les renseignements obtenus sont ensuite convertis en flux d'éléments minéraux.

3.4. Mise en œuvre des calculs et analyses statistiques

A l'échelle de l'exploitation, on applique la méthode du bilan apparent des minéraux (cf. §1.1.2.) en utilisant les quantités de produits entrant (achat ou échange) et sortant (vente ou échange) de l'exploitation agricole renseignées lors des enquêtes. Le recours à une reconstitution de ces flux, par le recoupement entre les cultures présentes sur l'assolement de l'année aux rendements moyens, à la conduite de la fertilisation, à la gestion des résidus et de l'interculture et à la valorisation des produits, est parfois nécessaire en faisant l'hypothèse que les quantités produites sont égales aux quantités vendues. A l'échelle de la parcelle, on applique la même méthode que pour l'étude en station expérimentale, en se focalisant sur l'échelle du moyen terme (5 ans), entre 2008 et 2012.

Pour les analyses des données, l'effectif très réduit des exploitations étudiées ne permet pas de réaliser une approche quantitative. Nous avons opté pour une description des divers flux en éléments à l'échelle de l'exploitation, une étude des corrélations entre variables pour les résultats à l'échelle de la parcelle, puis nous avons complété par une caractérisation simplifiée des pratiques culturales à l'échelle de la parcelle agricole. Les variables ainsi retenues sont intégrées en tant que variables supplémentaires dans l'analyse en composantes principales réalisée à partir de toutes les données du réseau de parcelles agricoles.

Partie III. Résultats et interprétation

I. Variabilité temporelle des balances minérales de parcelles conduites sous des systèmes de culture différents

Cette première partie présente les principaux résultats concernant la variabilité des balances minérales établies pour chaque parcelle élémentaire de l'essai de longue durée de La Cage entre 1998 et 2012, établies année par année, puis à la rotation culturale, et enfin moyennées sur 15 ans, sur les parcelles de la station expérimentale.

1.1. Les balances parcellaires en azote

1.1.1. L'apport d'azote par fixation symbiotique

La quantité d'azote fixé par les légumineuses, estimée à partir de la quantité d'azote exporté par la biomasse aérienne à la récolte, varie selon les espèces considérées et leurs rendements. Le tableau suivant indique les quantités estimées d'azote fixé au cours de l'essai de longue durée et les incréments d'azote, correspondants à la quantité d'azote potentiellement restituée par la culture ($N_{\text{incrémenté}} = N_{\text{fixé}} - N_{\text{exporté}}$).

Tableau 3. Fixation d'azote symbiotique par les légumineuses

Système de culture	Espèces cultivées	Quantité moyenne d'azote fixé (kg/ha)	Incrément moyen d'azote (kg/ha)	Rendements moyens (par ha)	Fréquence de la culture
Biologique	Lupin	229	66	32 q	1 an / 15
	Luzerne	407	76	10 t MS	3-4 ans / 15
	Pois	120	21	27 q	1-2 ans / 15
	Soja	142	39	15 q	1 an / 15
Productif	Pois	213	35	49 q	3-4 ans / 15
Intégré	Pois	214	35	48 q	3-4 ans / 15
SCV	Luzerne	407	76	10 t MS	2-3 ans / 15
	Pois	179	30	40 q	2-3 ans / 15
	Vesce	23	23		en CI*

*CI : culture intermédiaire ; rendement en grains exprimé en quintal par ha, rendement en biomasse en tonne de matières sèches par ha

Les légumineuses fourragères, lupin et luzerne, restituent deux à trois fois plus d'azote que les légumineuses à graines (66 à 76 kg.ha⁻¹ d'azote restitué contre 21 à 40 kg.ha⁻¹ pour le pois et le soja). La luzerne, pour une production annuelle moyenne estimée à 10,7 tonnes, fournit aux parcelles la quantité la plus élevée d'azote (407 kg.ha⁻¹). Ainsi, la contribution des apports d'azote par fixation symbiotique dans les flux entrants varie fortement en fonction du système de culture considéré. Au cours des quinze années de l'essai en grandes cultures sans apports d'effluents d'élevage, les proportions moyennes observées vont de :

- ❑ 81 à 82 % en système biologique,
- ❑ 18 à 36 % en système productif,
- ❑ 20 à 43 % en système intégré,
- ❑ 27 à 39 % en système SCV.

1.1.2. Variabilité interannuelle des balances azotées

Le solde annuel, des flux entrants et flux sortant à la parcelle, présente une très grande variabilité. Sur l'ensemble des 240 observations que forment les combinaisons « parcelle élémentaire * année » entre la période de 1998 à 2012, les valeurs calculées en azote s'étendent de -141 à +320 kg.ha⁻¹. La tendance générale est au surplus d'azote, sauf en système de culture biologique où, selon l'année considérée, des déficits ponctuels se présentent (Figure 8).

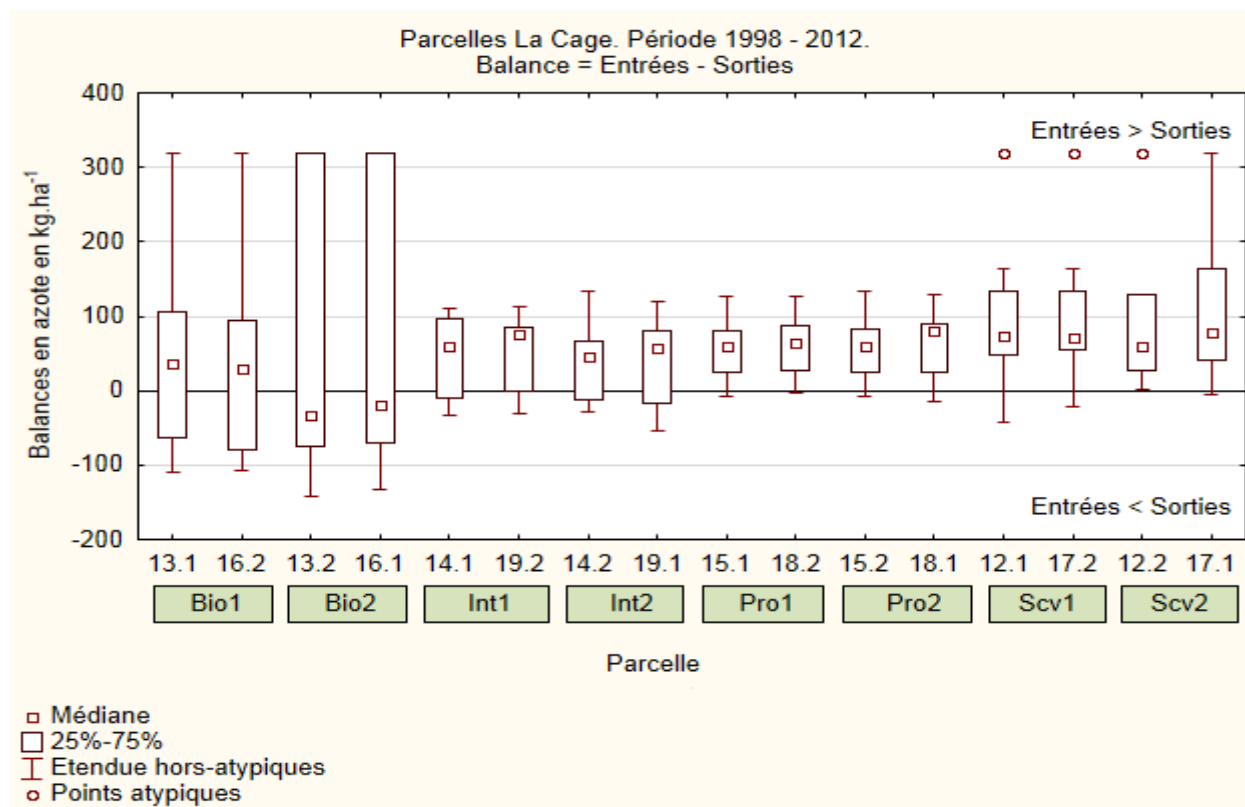


Figure 8. Box-plots des balances annuelles en azote par parcelle

Selon le système de culture considéré, la variabilité interannuelle est plus ou moins marquée. Pour les quatre parcelles en système de culture biologique, les balances azotées annuelles varient plus fortement que pour celles conduites selon d'autres modes de production.

Tableau 4. Coefficients de variation des balances annuelles en azote par système de culture

Système de culture	CV (%)	Points atypiques (kg/ha)
Biologique	307	-
Productif	61	-
Intégré	119	-
SCV	99	320

Les surplus très élevés en azote, obtenus en système biologique, sont liés à la présence de la luzerne (3 à 4 années sur 15), tandis que les années déficitaires correspondent aux années à culture à la fois non fertilisée et sans légumineuse. De même, les points atypiques en SCV correspondent aux années de culture de la luzerne, légumineuse fixatrice d'azote en association avec les *Rhizobia*, expliquant ainsi le surplus très élevé

d'azote, lié à une forte augmentation des flux en entrées pour une faible exportation par la biomasse récoltée (valorisation par la fauche de la deuxième coupe uniquement).

Les résultats de la simulation de la substitution de la luzerne montrent qu'il y a une diminution sensible de l'amplitude de valeurs des balances en système de culture biologique et en SCV, qui se rapproche ainsi de celle des traitements productifs et intégrés (Figure 9).

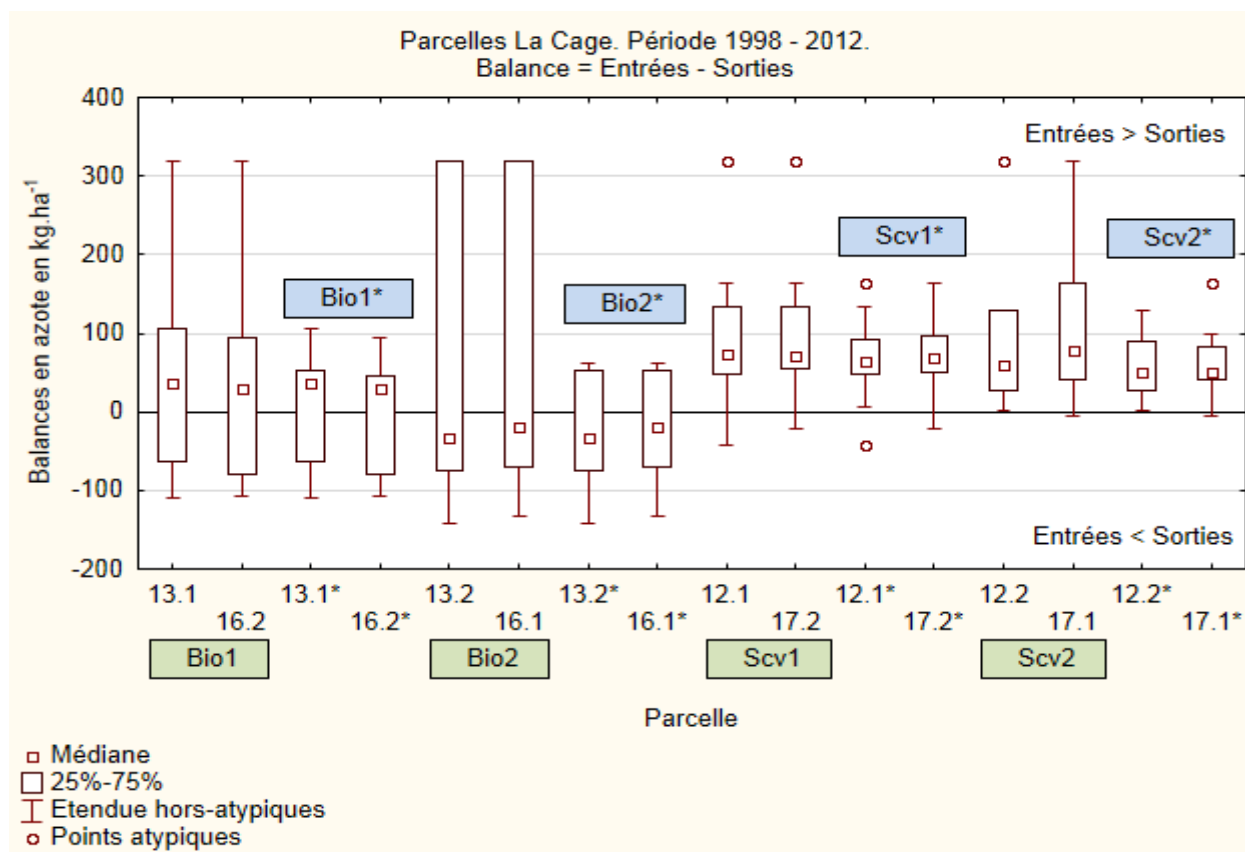


Figure 9. Box-plot des balances annuelles en azote de scénarii différents

Les variantes d'un même système de culture : Bio1 et Bio2, Int1 et Int2, Pro1 et Pro2, Scv1 et Scv2. Les scénarii fictifs (substitution de la luzerne par le pois) : Bio1*, Bio2*, Scv1* et Scv2*

1.1.3. Balances azotées moyennes sur 15 ans

Les balances azotées sont moyennées en considérant les flux cumulés à la parcelle depuis la mise en place de l'essai de longue durée (1998) jusqu'à la dernière campagne récoltée (2012), soit sur une période de quinze ans. Les surplus d'azote ainsi obtenus varient de 36 à 115 kg.ha⁻¹.an⁻¹, toutes parcelles confondues, pour une moyenne globale de 65 kg.ha⁻¹.an⁻¹. L'effet « système de culture » est confirmé par l'analyse de la variance. Il apparaît que les balances azotées en système de culture biologique et en système productif ne sont pas significativement différentes entre elles, de l'ordre de 50 à 60 kg.ha⁻¹.an⁻¹. Par contre, les systèmes intégré et en semis direct sur couvert présentent des surplus d'azote significativement différents entre eux : s'élevant à plus de 100 kg.ha⁻¹.an⁻¹ en SCV contre un surplus moyen autour de 40 kg.ha⁻¹.an⁻¹ en intégré (Figure 10).

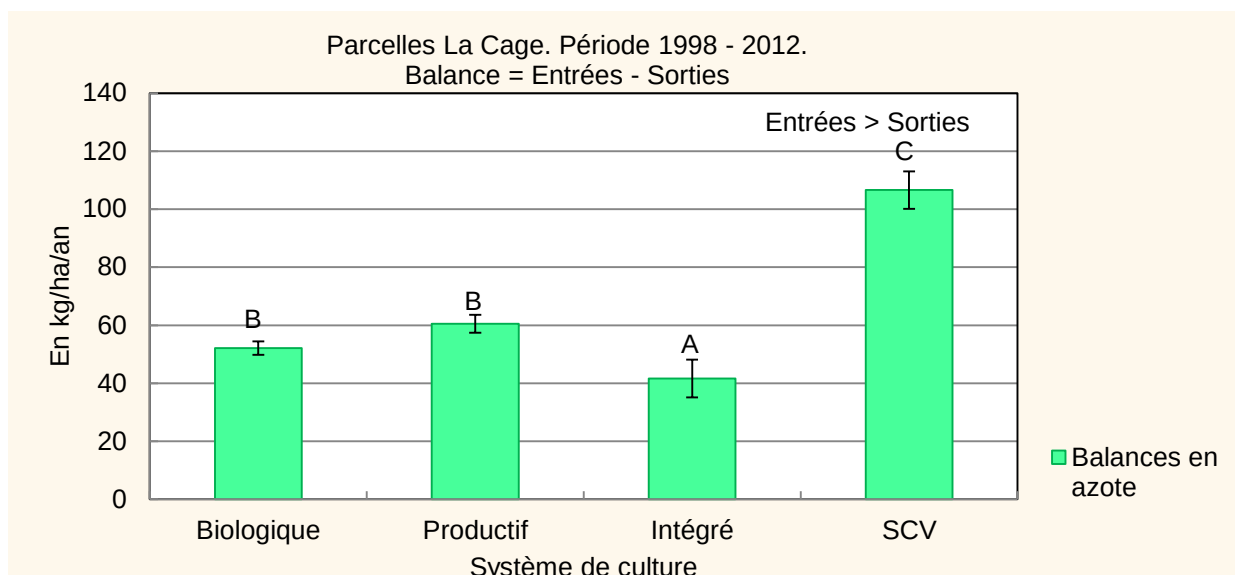


Figure 10. Moyennes des balances azotées à long terme, par système de culture

A, B, C représentent les groupes homogènes mis en évidence par le test HSD de Tukey ; les écart-types sont calculés à partir des résultats de chaque lot de quatre parcelles d'un même système de culture

A une échelle temporelle plus grande, l'impact de la substitution de luzerne sur les balances azotées des parcelles en systèmes de culture biologique et en SCV se présente comme suit (Figure 11).

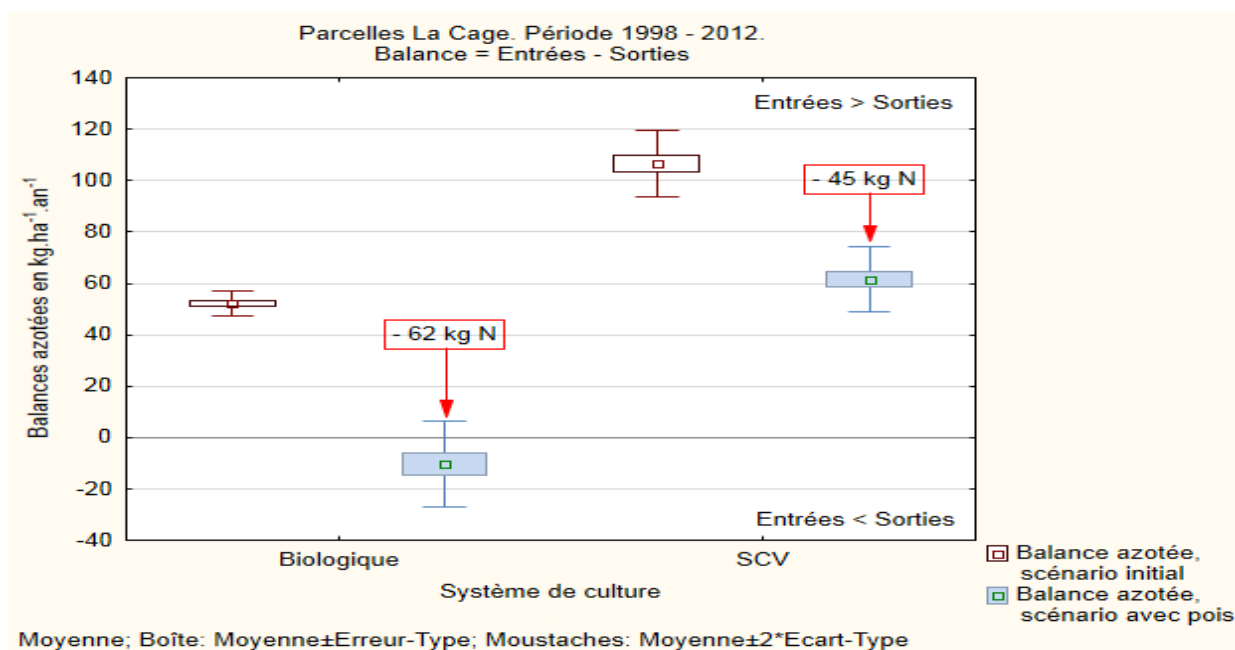


Figure 11. Balances azotées moyennes sous différents scénarios en systèmes de culture biologique et SCV

Les écart-types sont calculés à partir des résultats de chaque lot de quatre parcelles d'un même système de culture

Il apparaît que la substitution de la culture de luzerne par une culture de pois induirait une diminution significative des balances azotées moyennes sur 15 ans, allant de -45 à -62 kg.ha⁻¹.an⁻¹. En système de culture biologique, les soldes théoriques obtenus deviennent négatifs, tandis qu'en système de semis direct sous couvert, les balances azotées moyennes rejoignent les valeurs observées en parcelles conduites sous système productif (autour de 60

kg.ha⁻¹.an⁻¹). Autrement dit, l'introduction de cette légumineuse, luzerne, dans un système de culture donné peut fortement accroître la valeur des surplus moyens résultants.

En système de culture biologique, l'effet de la luzerne permet de compenser la faible contribution des apports par les engrais (9% des entrées totales). Tandis qu'en SCV, avec des apports d'engrais contribuant à hauteur de 48 à 49% des entrées totales en azote, cette culture induit une augmentation des surplus.

1.1.4. Balances à l'échelle de la rotation culturale

Entre 1999 à 2010, pour les trois séries de balances minérales établies par période de quatre ans, correspondant en principe à une rotation culturale complète, les résultats sont très variables (CV>65%), les valeurs extrêmes, toutes parcelles et tous périodes confondus, sont comprises entre -37 et +153 kg.ha⁻¹.an⁻¹.

❖ Tendances moyennes des balances et décomposition des flux observés

Les flux entrants totaux en azote varient selon le système de culture considéré : ils sont en général plus faibles en système de culture biologique (146 kg.ha⁻¹.an⁻¹) par rapport aux autres modes de production (181 à 211 kg.ha⁻¹.an⁻¹). De même pour les flux sortants par les produits exportés, c'est en système biologique que l'on enregistre les valeurs les plus faibles (84 kg.ha⁻¹.an⁻¹ en « bio » contre 111 à 148 kg.ha⁻¹.an⁻¹ pour les autres systèmes) (Tableau 5). L'analyse de la variance montre qu'il existe un effet « système de culture » influençant les balances en azote résultantes. Il apparaît qu'à l'échelle de la rotation quadriennale, les balances azotées des parcelles en « bio » ne sont pas significativement différentes de celles des autres parcelles, alors que la différence est significative entre les balances en système SCV et en intégré.

Tableau 5. Moyennes des flux d'azote et balances en azote, à l'échelle de la rotation, par système de culture
Valeurs en kg.ha⁻¹.an⁻¹.

Système de culture	Biologique	Productif	Intégré	SCV
Entrées totales	146 (32 ; 216)	211 (178, 248)	181 (161 ; 207)	202 (150 ; 257)
Exportations par les cultures	84 (68 ; 103)	148 (134 ; 162)	138 (112 ; 164)	111 (95 ; 136)
Balances azotées	62 ab (-37 ; 133)	63 ab (33 ; 88)	43 a (15 ; 73)	91 b (46 ; 153)

Fourchette de valeurs (minima et maxima) donnée entre parenthèses. a, b, ab : groupes homogènes selon le test HSD de Tukey.

❖ Décomposition par période des balances azotées

L'analyse de la variance confirme l'influence des facteurs « système de culture » et « période » sur les soldes des bilans d'azote à la rotation culturale. L'évolution des balances azotées dans le temps varie selon le système de culture considéré (Figure 12).

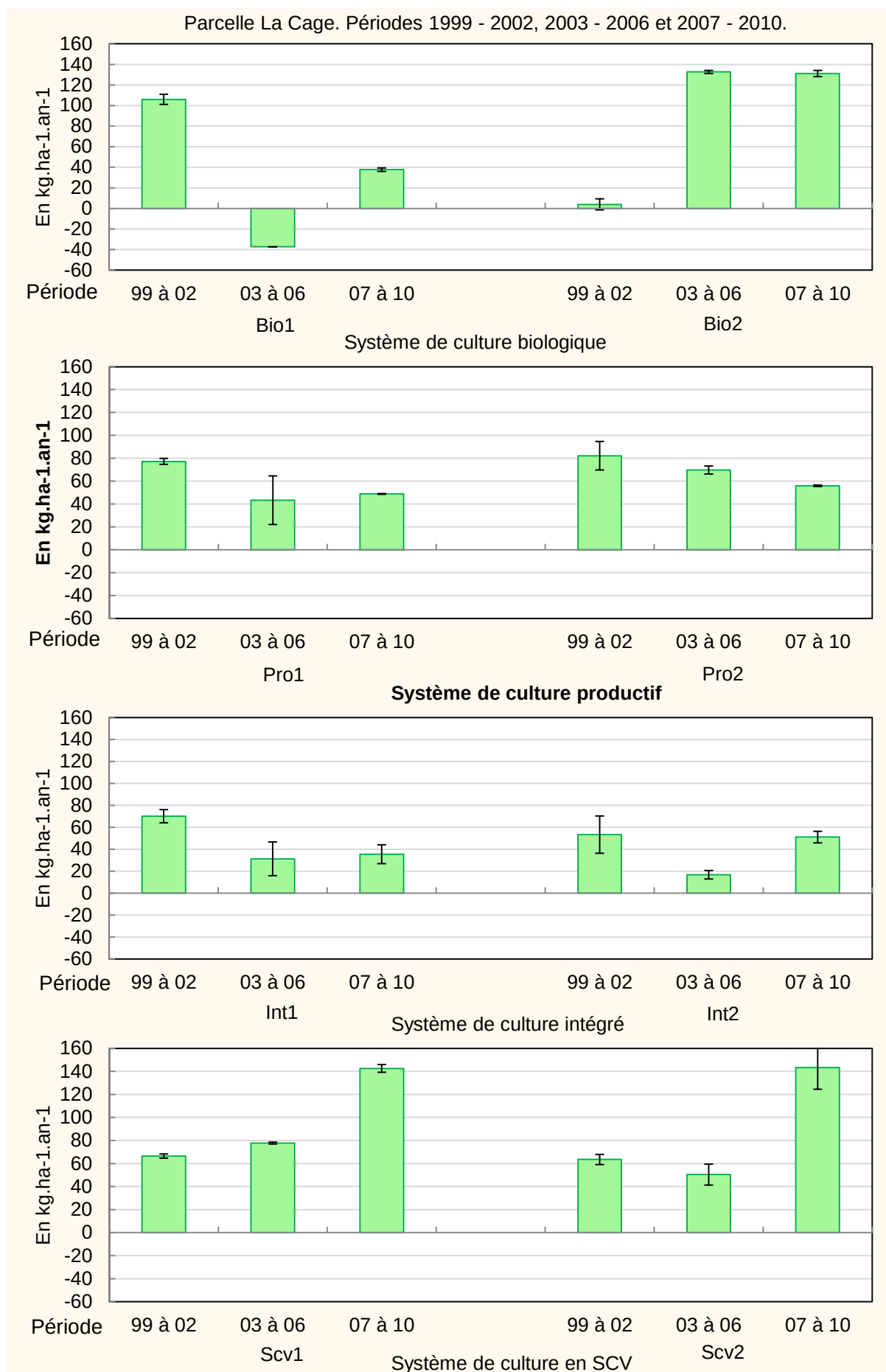


Figure 12. Evolution des balances azotées par période et par sous-système de culture

Pour le système de culture biologique, les balances azotées varient fortement entre les différentes périodes pour chaque sous-système. Cette fluctuation traduit les changements dans les successions de culture :

- sur les parcelles soumises au traitement Bio1, les cultures présentes passent d'une rotation à deux années de blé fertilisé et deux années de légumineuse en période 1 (1999-2002), d'où un surplus de $106 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$, à une succession culturale sans légumineuses et faiblement fertilisée (apport moyen de $32 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ d'azote) en période 2 (2003-2006) d'où un déficit de $-37 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$, pour revenir à une rotation à deux cultures de blé non fertilisées et deux de légumineuses en période 3 (2007-2010), d'où un surplus de $38 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$;
- en sous-système Bio2, la rotation culturale initiale est identique à celle en productif, pois-blé-colza-blé, mais faiblement fertilisé (apport moyen de $75 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$), d'où un surplus de $4 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$, avant d'intégrer deux années de luzerne en périodes 2 et 3, d'où un surplus de plus de $130 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$.

En systèmes productif et intégré, la tendance est à la baisse du surplus : de 77 à 82 $\text{kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ en période 1 en système productif (Pro1 et Pro2), la balance azotée passe à 49 à 56 $\text{kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ en période 3. En système intégré (Int1), elle passe de 70 $\text{kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ en période 1 à 35 $\text{kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ en période 3. Ces parcelles sont caractérisés par (i) une rotation culturale maintenue stable dans le temps (pois-blé-colza-blé) et (ii) des pratiques de fertilisation qui baissent légèrement :

- de 233 $\text{kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ en période 1 les entrées totales d'azote passent à 202 puis 196 $\text{kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ en périodes 2 et 3 en productif,
- et de 197 $\text{kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ en période 1 à 169 puis 175 $\text{kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ en périodes 2 et 3 en système intégré.

Le surplus d'azote moyen en SCV entre 2007 à 2010, s'élevant à $143 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ correspond aussi à l'introduction de la luzerne dans la rotation, et est significativement différent des surplus azotés au cours des deux premières périodes (64 à 78 $\text{kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$).

1.1.5. Mise en évidence des corrélations entre variables

L'étude des corrélations entre les variables confirme que les surplus d'azote à l'échelle du moyen terme sont liés aux flux entrants d'azote à la parcelle avec un coefficient de détermination r^2 de 0,84 (Figure 13). L'exportation d'azote est liée à la quantité totale de blé produit au cours de la période considérée ($r^2=0,73$), étant donné qu'il s'agit de la culture dominante dans les systèmes étudiés. A l'échelle de la rotation quadriennale, les entrées totales en azote sont généralement supérieures aux exportations par les cultures, quel que soit le système de culture considéré (Figure 14). La corrélation entre ces deux variables est cependant moyenne ($r^2=0,49$). La série des 48 observations considérées ne permet pas de lier les balances azotées obtenues à l'exportation par les produits récoltés ($r^2=-0,06$).

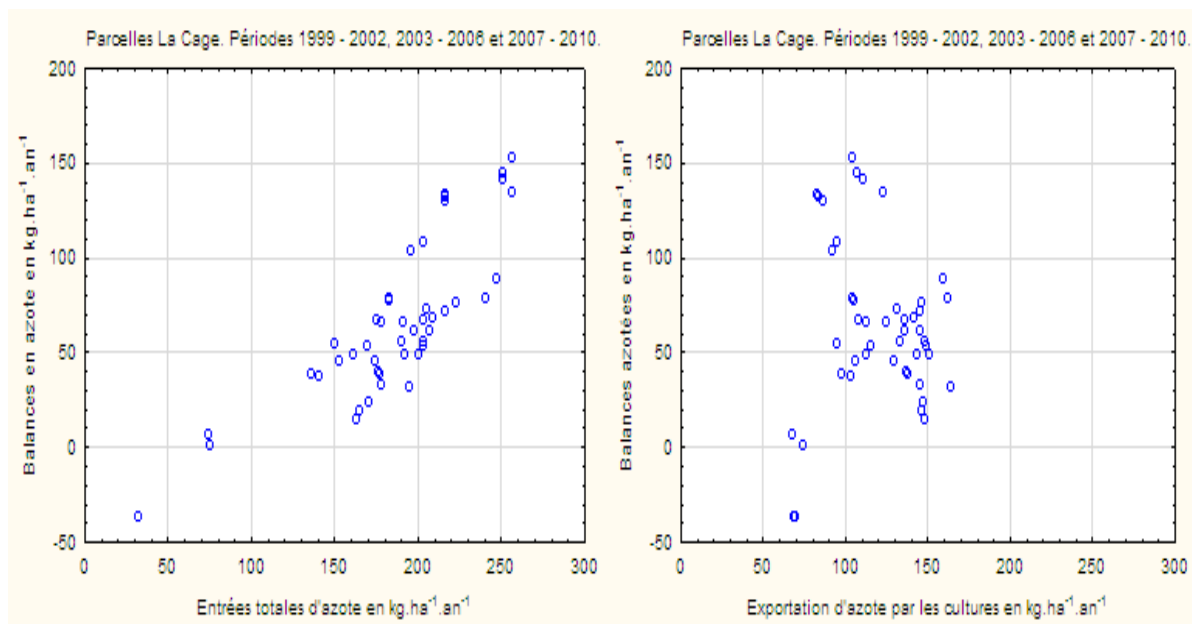


Figure 13. Nuages de points des balances à moyen terme en azote en fonction des entrées totales et de l'exportation par les cultures

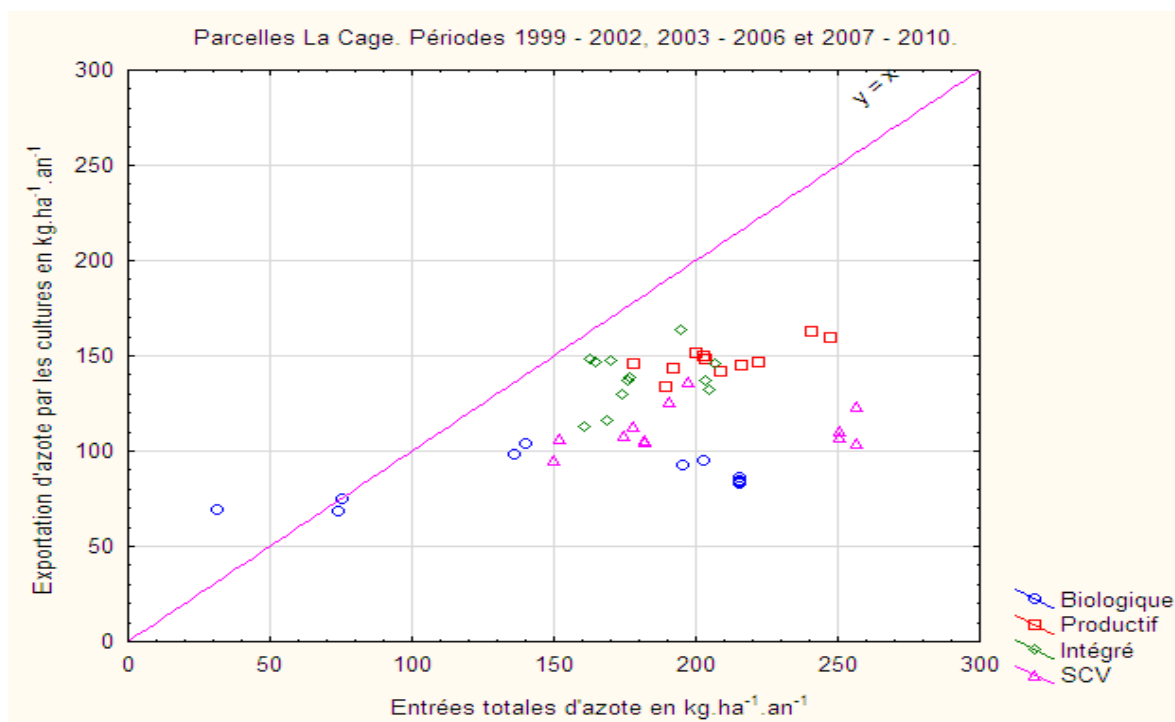


Figure 14. Nuage de points des exportations d'azote par les cultures en fonction des entrées totales

1.2. Les balances parcellaires en phosphore et potassium

1.2.1 Variabilité interannuelles

Tout comme pour l'azote, les balances en phosphore et potassium à l'échelle annuelle sont très variables, les valeurs s'étendent de -79 à +23 kg.ha^{-1} pour le phosphore et de -83 à +57 kg.ha^{-1} pour le potassium (Figure 15 et Figure 16). La tendance générale est au déficit.

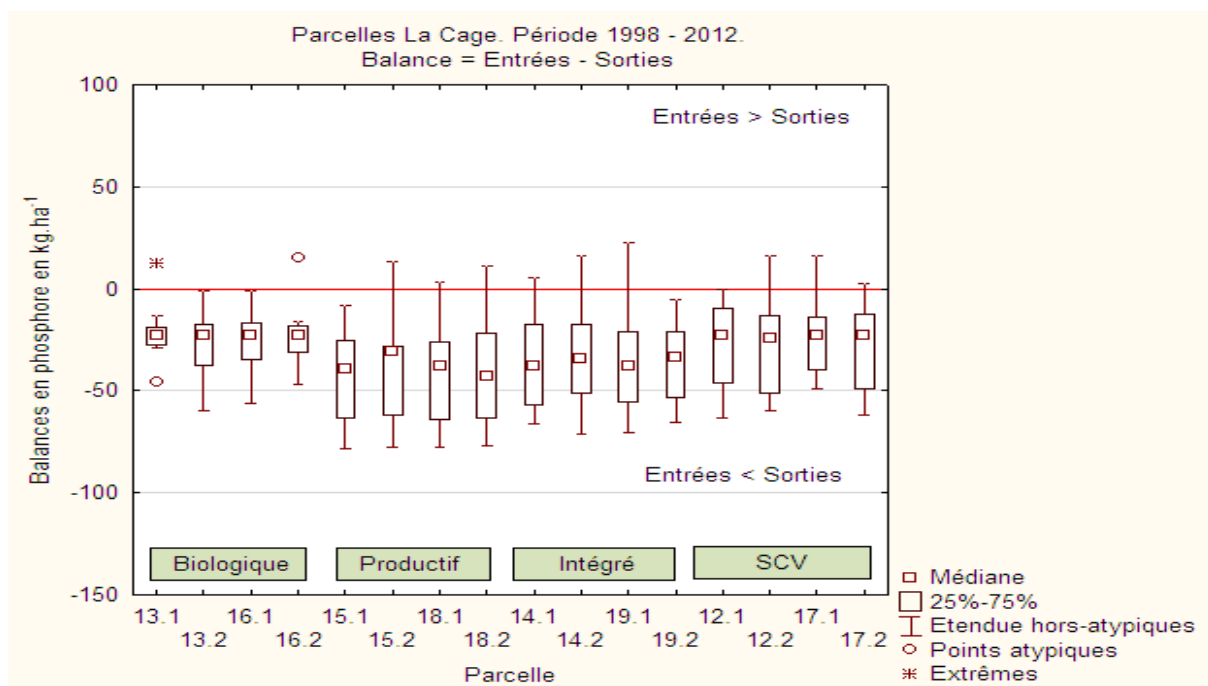


Figure 15. Box-plots des balances annuelles en phosphore par parcelle

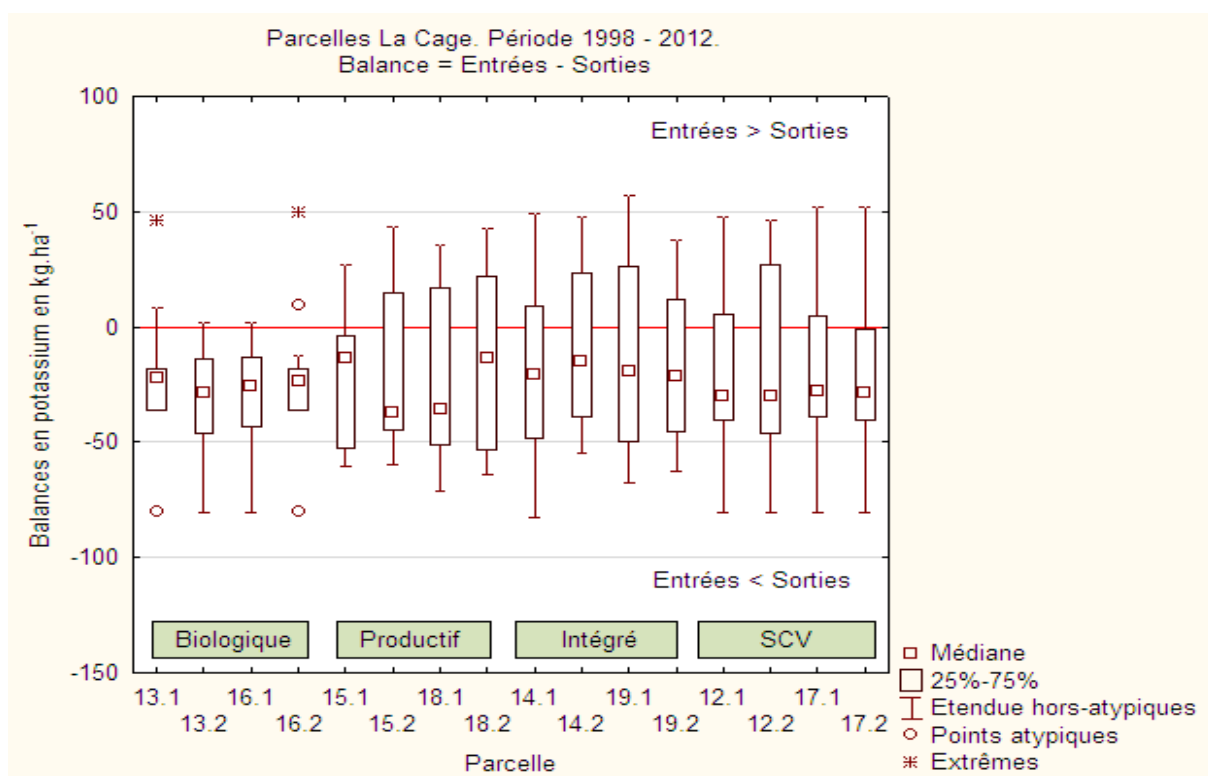


Figure 16. Box-plots des balances annuelles en potassium par parcelle

La variabilité interannuelle des soldes en phosphore est moins marquée que celle de l'azote : les coefficients de variation, quel que soit le système de culture considéré, vont de 58 à 74%. En système de culture biologique, les points atypiques de surplus en phosphore, +12 et +15 kg.ha⁻¹ pour le phosphore, correspondent à une année à faible exportation (2005), liée à un rendement très bas de la culture de colza (3 à 5 q.ha⁻¹), attaquée par les méligethes (*Meligethes aeneus*).

Pour le potassium, le système de culture biologique présente une variabilité des balances relativement moins forte (CV = 98%) que celle des autres systèmes (CV évalué à respectivement 173%, 219% et 182% pour les systèmes productif, intégré et SCV). De même que pour le phosphore en système de culture biologique, le point atypique de surplus en potassium, s'élevant +10 kg.ha⁻¹, correspond à l'année à faible exportation (2005). Les déficits annuels atypiques sont obtenus au cours des années avec exportation de la luzerne. Tandis que les points extrêmes de surplus potassique correspondent à l'année d'apport de potasse (330 kg.ha⁻¹ de Patentkali®) sur les parcelles du sous-système Bio1.

La variabilité interannuelle des balances minérales peut s'expliquer en partie par la distorsion temporelle entre le raisonnement de la fertilisation des cultures et la période d'établissement du bilan. Calculée au pas de temps annuel, la balance minérale n'intègre que les flux intervenant au cours d'une campagne agricole donnée, alors que les apports de phosphore et potassium se raisonnent à l'échelle du système de culture en réalisant des apports ponctuels permettant de corriger les variations de stock du sol (tableau 4).

Tableau 6. Caractérisation des pratiques de fertilisation phospho-potassique sur la station expérimentale, par système de culture, entre 1998 et 2012

	Systèmes de culture			
	Biologique	Productif	Intégré	SCV
Occurrence de la fertilisation sur 15 ans	3 ans	7/8 ans	7/8 ans	5/6 ans
Dose d'apport de P (Kg de P ₂ O ₅ /ha)	32 à 49	44 à 100	44 à 100	50 à 100
Dose d'apport de K (Kg de K ₂ O/ha)	12 à 90	42 à 100	42 à 100	30 à 100

1.2.2. Les tendances à moyen terme

Sur l'ensemble des 48 observations établies sur chaque parcelle élémentaire au cours des trois périodes retenues, les balances en phosphore et potassium sont déficitaires, avec une moyenne s'élevant respectivement à -32 kg.ha⁻¹.an⁻¹ et -22 kg.ha⁻¹.an⁻¹.

❖ Décomposition des flux observés

A l'échelle d'une rotation quadriennale complète, les flux entrants sont faibles. Sur les parcelles en systèmes de culture non biologiques, ils sont de l'ordre de 9 à 16 kg.ha⁻¹.an⁻¹ pour les apports moyens en engrais phosphatés, et de 19 à 27 kg.ha⁻¹.an⁻¹ pour les engrais potassiques. En parcelles « bio », les apports moyens par les engrais, sur chaque période de quatre ans, s'élèvent à 4 kg.ha⁻¹.an⁻¹ en phosphore et à 8 kg.ha⁻¹.an⁻¹ en potassium.

Les exportations par les cultures ont des valeurs sensiblement équivalentes pour les deux éléments, à savoir : de 24 à 59 kg.ha⁻¹.an⁻¹ pour le phosphore et de 21 à 52 kg.ha⁻¹.an⁻¹ pour le potassium. Cependant, elles ne traduisent pas les mêmes phénomènes. Pour le phosphore, les faibles exports (24 à 34 kg.ha⁻¹.an⁻¹) sont enregistrés sur les parcelles « bio », caractérisées par

des rendements culturels moins importants. Tandis que pour le potassium, certaines parcelles conduites en système biologique présentent des flux sortants élevés, liés à la culture de luzerne. En effet, la biomasse de luzerne exportée à la récolte est riche en potassium (environ 25 g par kg de matière sèche), et, combinée au rendement à l'hectare (estimé à 10 tonnes de matière sèche en moyenne), la résultante permet de compenser les exportations par les cultures ayant un rendement plus faible qu'en système de culture non biologique.

❖ Les facteurs influençant les balances en phosphore et potassium

L'analyse de la variance indique que l'influence du système de culture adopté sur les balances minérales varie selon l'élément considéré. Pour l'élément potassium, l'échelle de la rotation culturale ne permet pas de constater une différenciation significative des balances en fonction des systèmes de culture. Pour le phosphore, les parcelles en système de culture biologique présentent des déficits moyens moins marqués, de l'ordre de $-20 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$, par rapport à celles conduites sous d'autres systèmes de culture, notamment le système productif avec $-40 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$.

1.2.3. Les tendances à long terme

A l'échelle du long terme, l'analyse de la variance confirme que le système de culture détermine les résultats obtenus. Les déficits moyens en phosphore sont plus marqués sur les parcelles soumises à des systèmes de culture intensifiés (productif et intégré), (respectivement de -41 et $-36 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) qu'en mode de production biologique (autour de $-25 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) (**Erreur ! source du renvoi introuvable.**). La variabilité des balances en phosphore entre les parcelles soumises à un même système de culture est faible, malgré les différences de conduite entre les sous-systèmes de culture ($\text{CV} < 10\%$ sur pour chaque lot de quatre parcelles élémentaires). Pour le potassium, les déficits à long terme en système de culture biologique, estimés à $-30 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$, se démarquent plus nettement de ceux des autres systèmes, autour de $-20 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ (Figure 17).

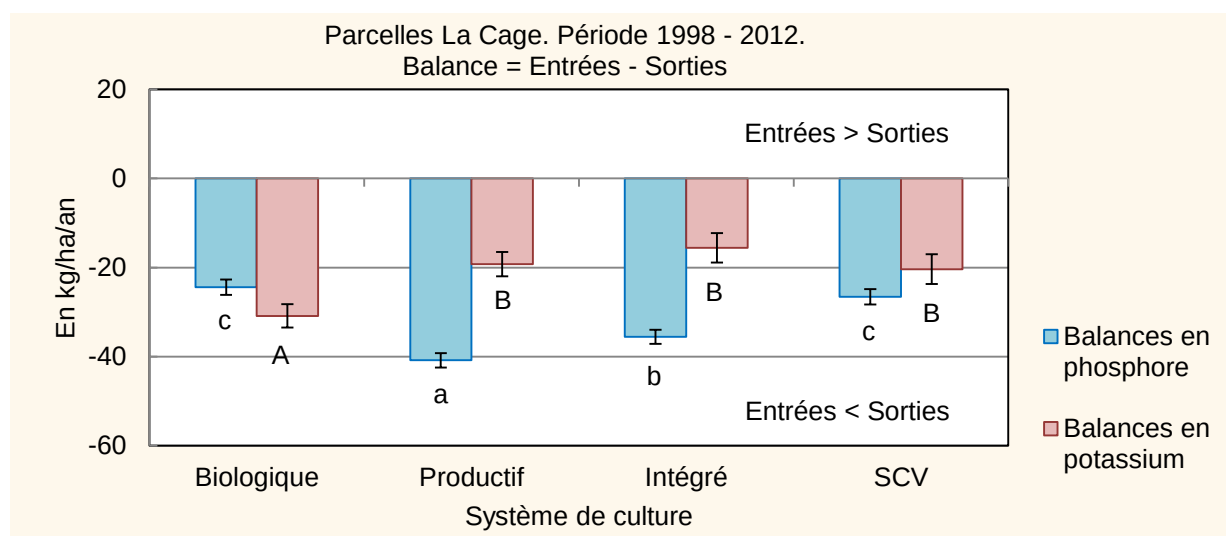


Figure 17. Moyennes des balances en potassium à long terme, par système de culture.

A, B et a, b, c représentent les groupes homogènes mis en évidence par le test HSD de Tukey ; les écart-types sont calculés à partir des résultats de chaque lot de quatre parcelles d'un même système de culture.

1.2.4. Etude des corrélations entre variables

A l'échelle de la rotation quadriennale, les balances en phosphore calculées à la parcelle élémentaire sont corrélées aux flux sortants ($r^2=-0,80$) et non aux pratiques de fertilisation ($r^2=-0,01$) (Figure 18). Différemment pour le potassium, les balances à moyen terme sont liées aux apports par les produits fertilisants ($r^2=0,75$) (Figure 19). La fertilisation phospho-potassique est raisonnée de façon conjointe, d'où la forte corrélation entre les flux entrants des deux éléments minéraux ($r^2=0,93$).

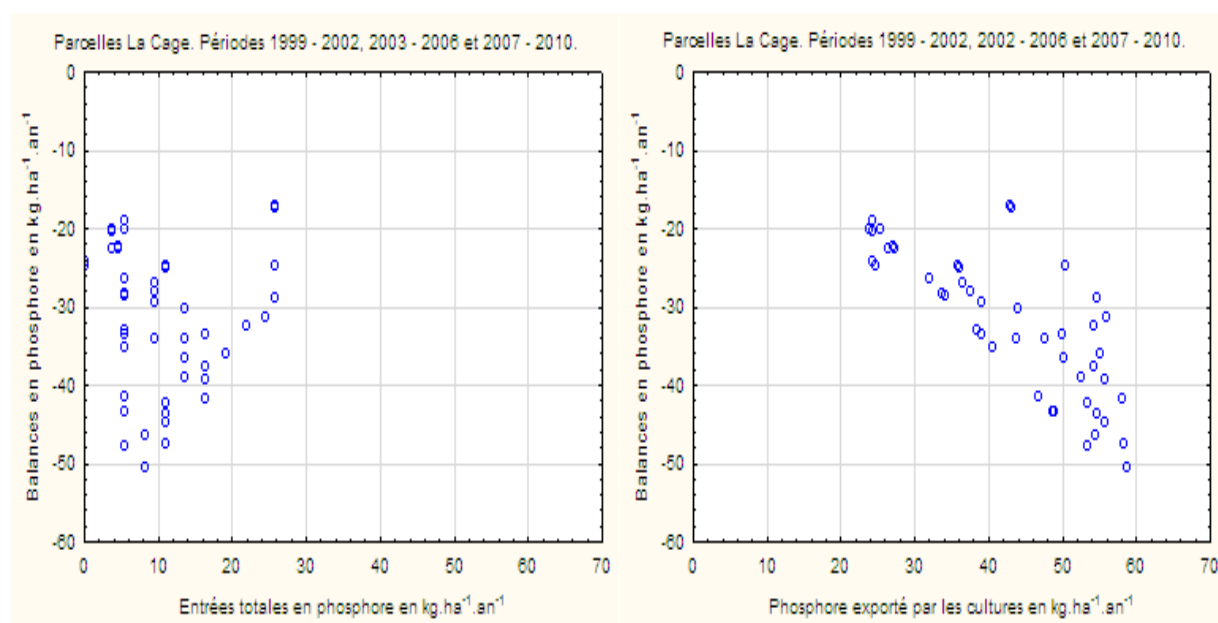


Figure 18. Nuages de points des balances en phosphore à moyen terme en fonction des entrées totales et des exportations par les cultures

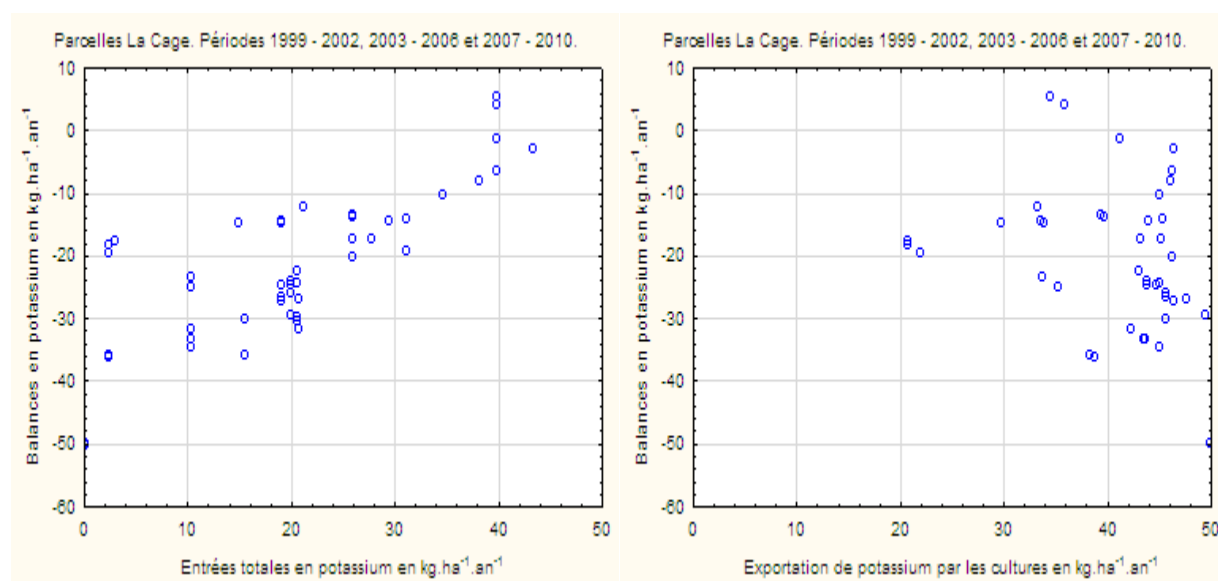


Figure 19. Nuages de points des balances en potassium à moyen terme en fonction des entrées totales et des exportations par les cultures

II. Variabilité spatiale des balances minérales dans le réseau d'exploitations et de parcelles en système de production biologique

Cette deuxième partie présente les résultats obtenus sur le deuxième cas d'étude des balances minérales, à savoir quatre exploitations agricoles (EA) biologiques ayant des orientations économiques différentes. Il s'agit tout d'abord d'avoir une vue générale des flux de minéraux à l'échelle de la ferme, ensuite de s'intéresser aux balances minérales à l'échelle de deux parcelles agricoles conduites en système biologique.

2.1. Les balances minérales à l'échelle de l'exploitation agricole

La méthode du bilan apparent des minéraux a été utilisée pour établir les balances minérales sur les deux années renseignées, les balances minérales correspondant ainsi aux soldes entre les flux d'éléments entrant et sortant de l'exploitation agricole globale.

2.1.1. Description des systèmes de production rencontrés

❖ Les productions des exploitations agricoles étudiées

Les productions végétales des exploitations peuvent être reconstituées à partir de l'assolement de l'année considérée. Les cultures dominantes varient selon l'orientation économique de l'exploitation. Les cultures céréalières restent dominantes pour toutes les exploitations étudiées (plus de 50% de la surface totale cultivée), à l'exception de l'exploitation en polyculture avec élevage de bovin à lait, caractérisée par une plus importante superficie en cultures fourragères, à la fois en prairie temporaire (PT) et en prairie permanente (PP).

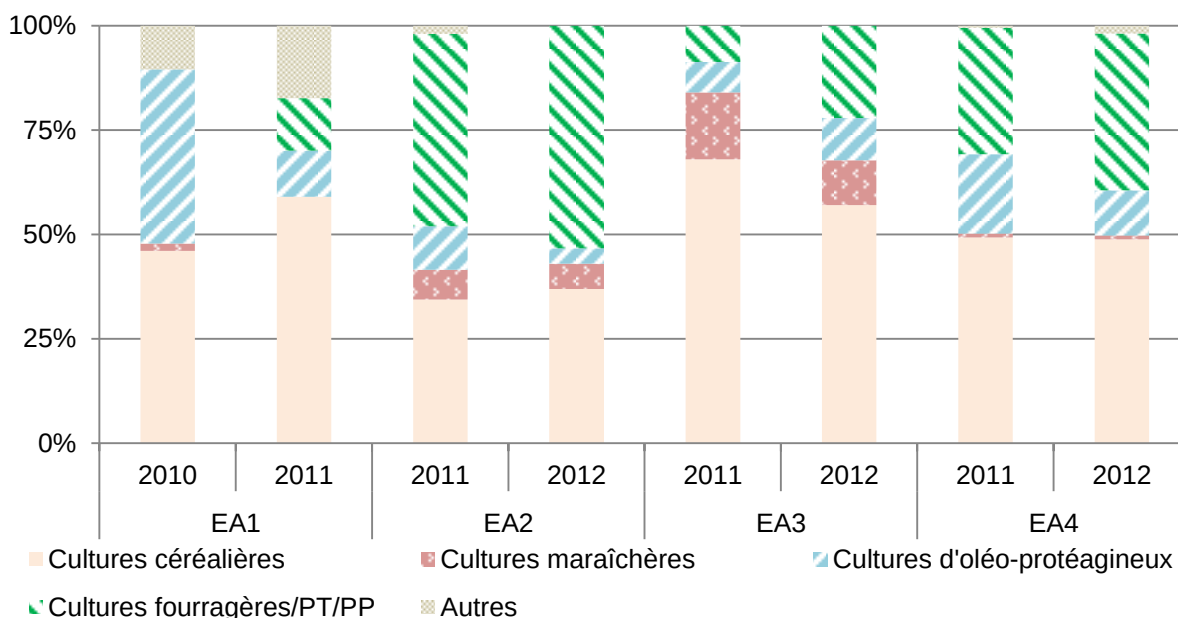


Figure 20. Proportion des cultures dans l'assolement annuel des exploitations agricoles

La valorisation des productions végétales et/ou animales obtenues comprend non seulement les exportations via la vente ou l'échange de produits, mais également les transferts entre les parcelles de culture et les ateliers d'élevage, ainsi que le stockage en ferme.

❖ La gestion de la fertilisation des cultures

Selon les exploitations biologiques, les ressources mises en œuvre pour satisfaire les besoins des cultures en éléments nutritifs varient. Ainsi, en termes d'engrais utilisés, les exploitations ont recours à diverses sources : des apports exogènes d'engrais organiques du commerce (admis en « bio »), des apports exogènes d'effluents industriels (écumes de sucrerie, vinasse), des apports exogènes et/ou endogènes d'effluents d'élevage (compost de fumier bovin, fumier bovin pailleux, fientes de poule). Des échanges paille-fumier sont effectués entre exploitations agricoles, le fumier issu du conventionnel étant admis en « bio ».

2.1.2. Les balances azotées annuelles

Sur les quatre exploitations agricoles étudiées, les balances en azote varient d'une année à l'autre pour toutes les exploitations, avec un solde positif allant de +29 à +94 kg.ha⁻¹ de surface agricole utile (SAU). Le seul cas de déficit en azote (-1 kg.ha⁻¹) est enregistré pour une exploitation (EA3) ayant 100% de la SAU en système biologique, sur une année caractérisée par une proportion en légumineuses faible (19%) et des apports d'azote par les engrais peu importants (12 kg.ha⁻¹). Il en ressort que les surplus moyens en azote, calculés sur les deux ans, varient de 20 à 61 kg.ha⁻¹.an⁻¹, au sein de ce sous-groupe d'exploitations agricoles biologiques (Figure 21).

Rapportés à la surface agricole utile, les entrées moyennes d'azote à l'exploitation sont plus élevées pour les exploitations en grandes cultures sans élevage et en polyculture-élevage de bovin à lait (respectivement de 120 à 168 kg.ha⁻¹ et 102 à 138 kg.ha⁻¹) que pour les deux autres exploitations, en grandes cultures avec élevage avicole et en polyculture-élevage de bovin à viande (à moins de 100 kg.ha⁻¹). La contribution de la fixation symbiotique d'azote par les légumineuses varie de 22 à 82 kg.ha⁻¹, selon l'exploitation et l'année considérées. Ceci peut être liée d'une part à la proportion en légumineuses de l'assolement de l'année, et d'autre part aux espèces présentes (légumineuses à graines, fourragères ou en prairie).

Chez les trois exploitations en cours de conversion vers le « 100% bio », on observe une baisse des entrées d'azote par les engrais rapportées à la surface agricole utile (de 85 à 76 kg.ha⁻¹ pour EA1, de 57 à 7 kg.ha⁻¹ pour EA2, de 26 à 5 kg.ha⁻¹ pour EA4) et une augmentation de la superficie en légumineuses de l'assolement annuel de 20% à 90%.

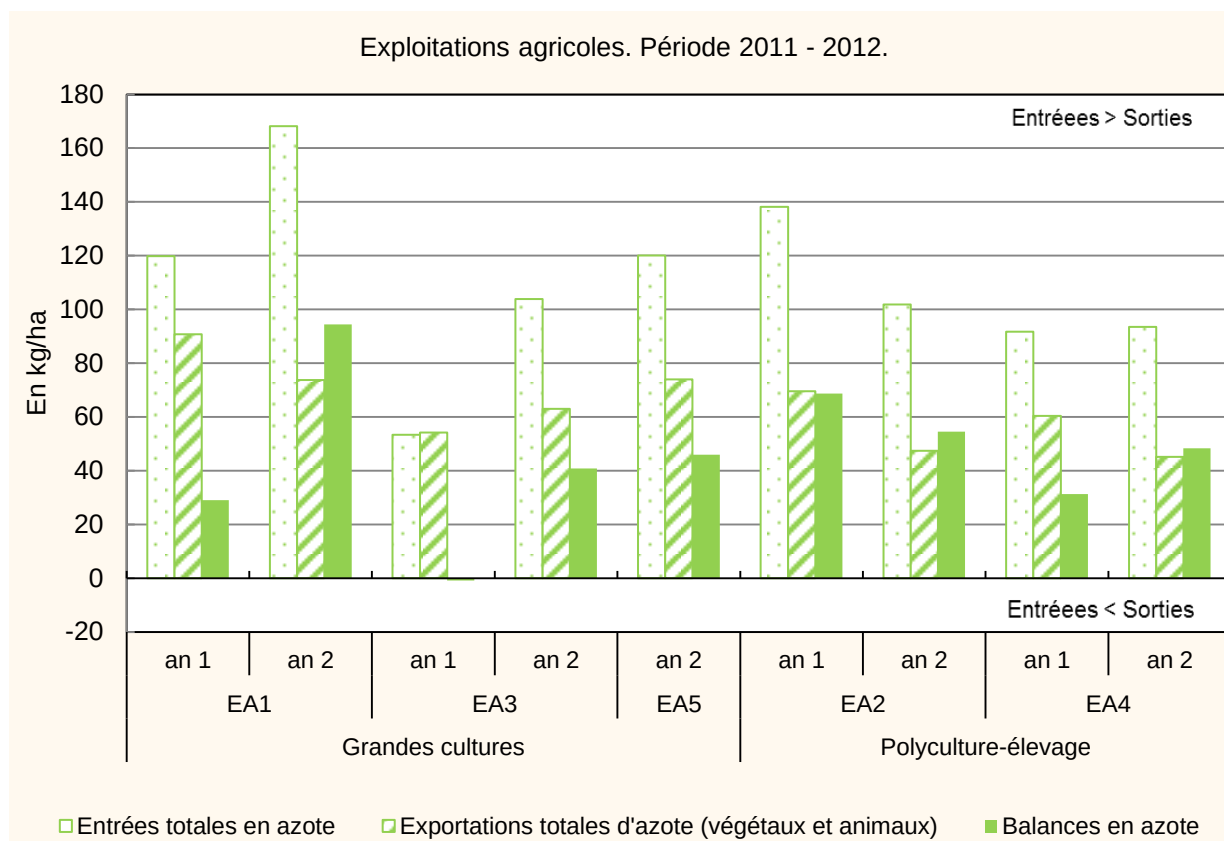


Figure 21. Balances azotées et flux annuels d'azote à l'échelle de l'exploitation agricole

2.1.3. Les Balances en phosphore

Sur l'ensemble des quatre exploitations étudiées, les balances moyennes sur deux ans sont stables en phosphore, entre -10 et -15 kg.ha⁻¹.an⁻¹ (Figure 22). Les entrées en phosphore sont faibles : moins de 10 kg.ha⁻¹, d'où la situation générale de déficit.

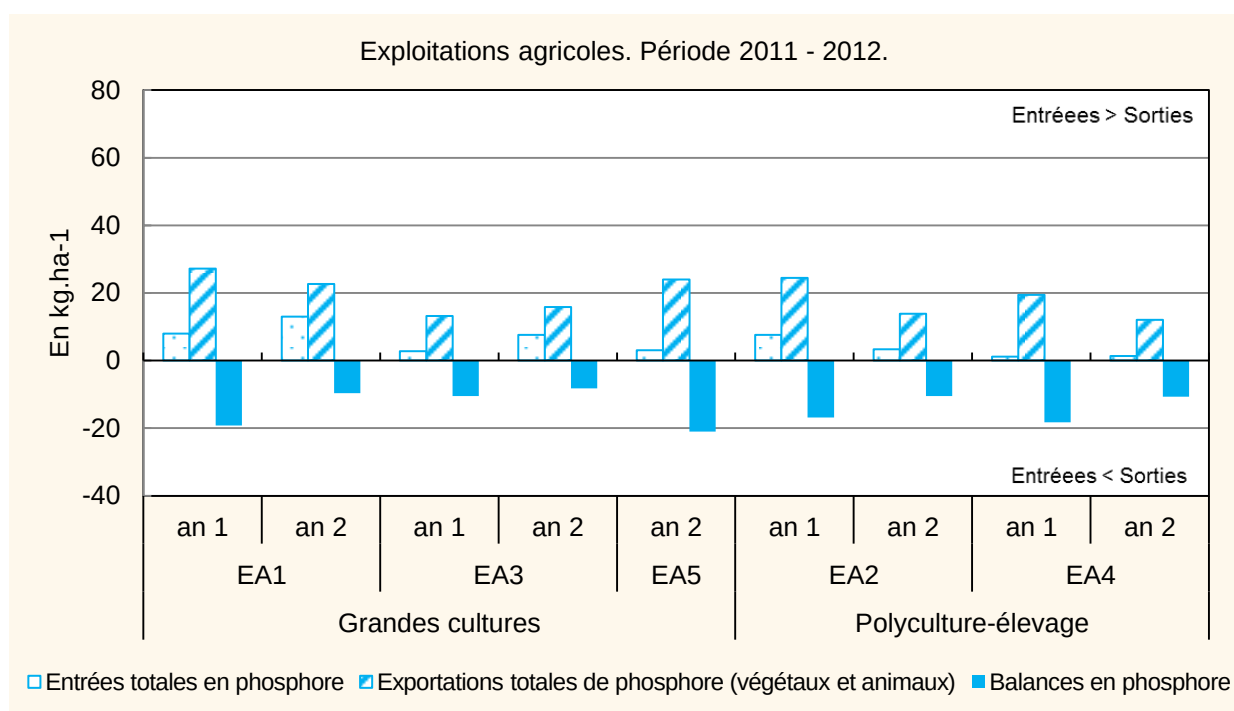


Figure 22. Balances et flux annuels en phosphore à l'échelle de l'exploitation agricole.

2.1.4. Les balances en potassium

Pour le potassium, les balances moyennes sont variables, de -12 à +34 kg.ha⁻¹.an⁻¹ (Figure 23).

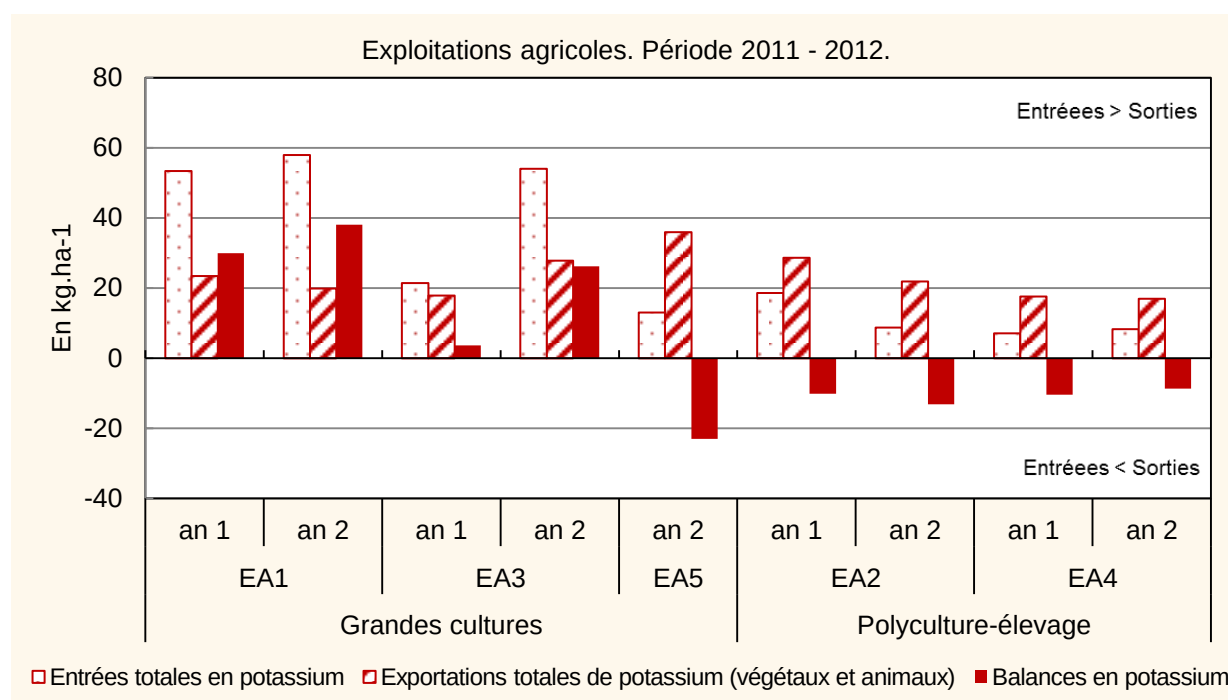


Figure 23. Balances et flux annuels en potassium à l'échelle de l'exploitation agricole.

La quantité de potassium apportée varie selon l'exploitation considérée : moins de 15 kg.ha⁻¹ pour les exploitations en polyculture-élevage, contre plus de 40 kg.ha⁻¹ pour celles en grandes cultures. Ces deux exploitations (EA2 et EA4), possédant des ateliers d'élevage bovin et recyclant les effluents produits pour fertiliser les cultures, n'importent en moyenne qu'entre 20 à 30 tonnes de vinasse par an, contrairement aux exploitations (EA1 et EA3), à dominance de grandes cultures et important plus de 65 tonnes de vinasse par an. La vinasse, effluent organique d'origine agro-industriel, est très riche en potassium (teneur entre 5 à 7%). Ainsi, sur les deux exploitations ayant des apports élevés d'engrais potassique, on observe un enrichissement en potassium (de +3 à +30 kg.ha⁻¹). A l'opposé, sur les deux autres exploitations, avec élevage bovin lait ou viande, il y a déficit d'une dizaine de kilos de potassium par hectare et par an.

2.2. Les balances minérales à l'échelle de la parcelle agricole

2.2.1. Les balances minérales parcellaires

L'étude des balances minérales a été conduite sur deux parcelles en système de culture biologique, par exploitation, entre la période 2008 à 2012. Chacune des parcelles correspond à une succession culturale différente et des pratiques culturales différentes (Tableau 7).

Tableau 7. Caractéristiques des parcelles étudiées en réseau d'exploitation agricole

Exploitation	EA1		EA2		EA3		EA4	
Parcelle	P1/EA1	P2/EA1	P1/EA2	P2/EA2	P1/EA3	P2/EA3	P1/EA4	P2/EA4
Surface (ha)	11.8	4.2	1.63	5.15	8	4	11.1	6.4
Succession culturale	Triticale chicorée orge féverole blé	Pois blé triticale luzerne luzerne	Féverole triticale féverole blé	Triticale luzerne luzerne luzerne blé	Maïs pois engrain orge épeautre	Epeautre triticale endive épeautre chicorée	PT* PT* PT* triticale épeautre	Maïs féverole épeautre colza triticale
Apport d'engrais	4 ans/5	2 ans/5	1 ans/2	3 ans/5	4 ans/5	5 ans/5	1 ans/5	2 ans/5
Exportation des résidus de culture	1 an/5	-	1 ans/2	-	1 an/5	1 an/5	2 ans/5	2 ans/5

*PT : prairie temporaire

Les flux moyens annuels parcellaires d'éléments minéraux et les soldes « entrées-sorties » correspondantes sont variables entre exploitations agricoles et au sein d'une même exploitation. Les parcelles étudiées présentent cependant un surplus azoté moyen de l'ordre de $20 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$, et des déficits en phosphore et potassium s'élevant respectivement à $-20 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ et $-40 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ (Figure 24, Figure 25 et Figure 26).

Les entrées totales en éléments minéraux, toutes parcelles confondues, varient de 60 à $230 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour l'azote, de 2 à $25 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour le phosphore et de 0 à $73 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour le potassium.

Les exportations par les cultures varient de 57 à $193 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour l'azote, 22 à $49 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour le phosphore et de 23 à $142 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour le potassium.

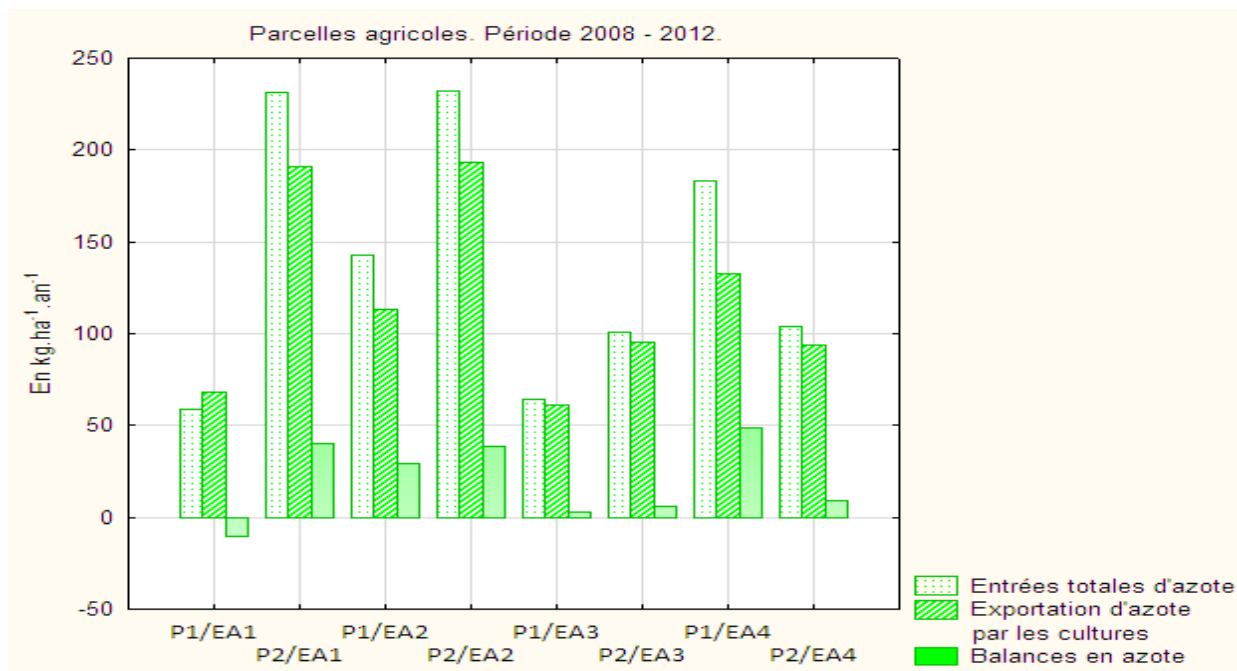


Figure 24. Balances azotées à moyen terme et flux moyens annuels à l'échelle de la parcelle agricole

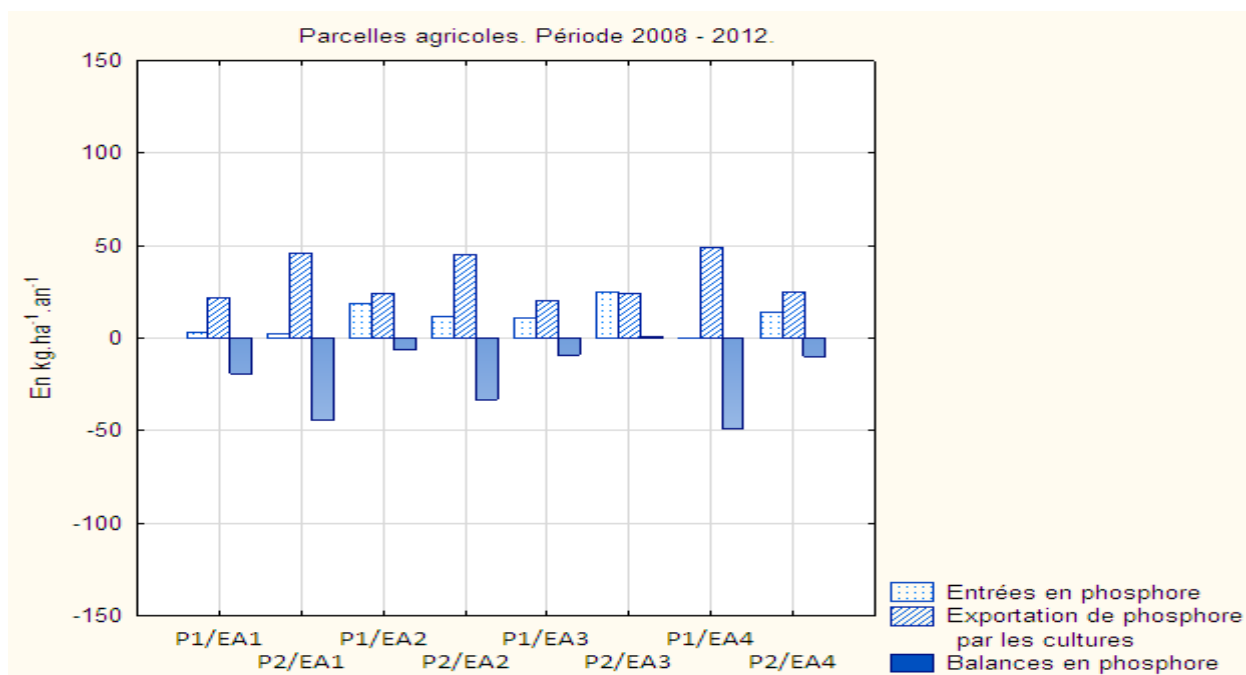


Figure 25. Balances en phosphore à moyen terme et flux moyens annuels à l'échelle de la parcelle agricole

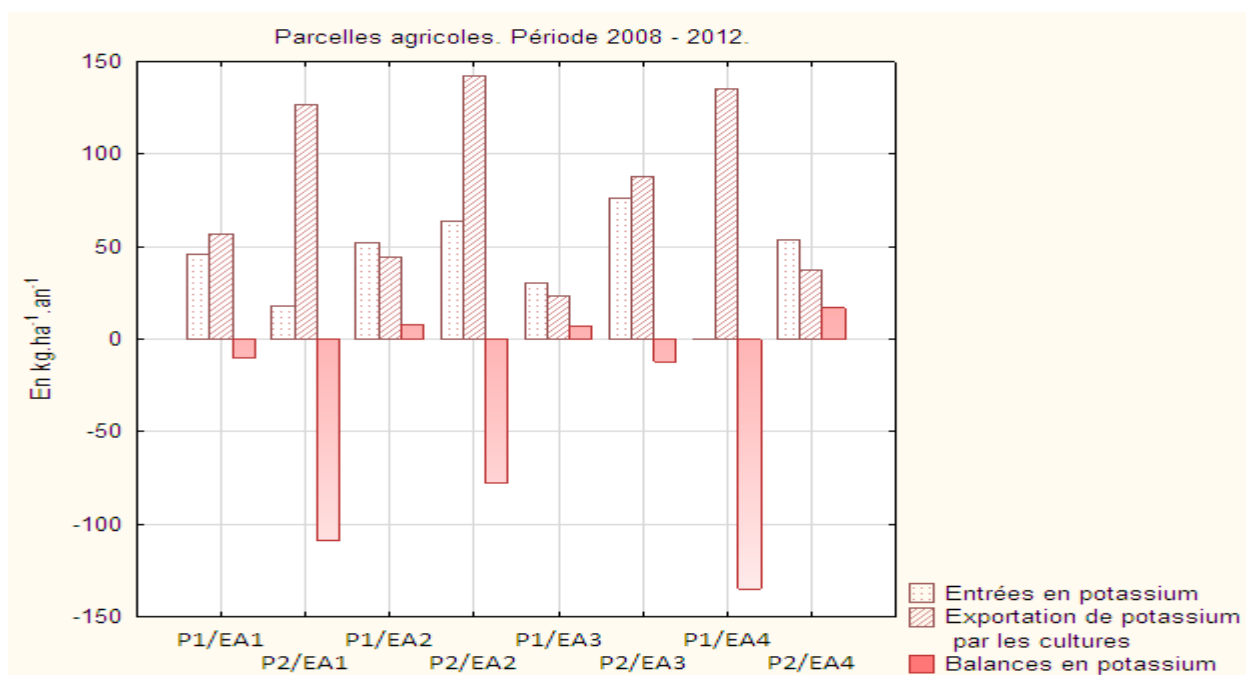


Figure 26. Balances en potassium à moyen terme et flux moyens annuels à l'échelle de la parcelle agricole

2.2.3. Corrélation entre les variables

Malgré l'effectif réduit des observations, les corrélations entre variables suivantes ont été vérifiées, à partir des balances minérales établies à l'échelle de la parcelle et du moyen terme, en système de culture biologique : (i) entre quantité d'azote fixée par les légumineuses et balances azotées ($r^2=0,85$), (ii) entre quantité d'éléments exportée par les cultures et balances en phosphore et potassium ($r^2=0,85$ et $0,83$).

Partie IV. Discussion

I. Limites et intérêts de l'approche par les balances minérales

1.1. Retour sur la méthode

- ❖ Les difficultés rencontrées lors de la mise en œuvre de la méthode :

L'approche par les balances minérales s'est révélée être plus difficile à mettre en œuvre que prévu, notamment lors de la collecte d'informations suffisamment précises et fiables sur le calcul de certains postes (exportation de biomasse par les cultures fourragères et prairies, productivité des légumineuses en interculture et en prairie), d'où le recours à des hypothèses de travail, ainsi qu'au cours de la conversion des données quantitatives en flux d'éléments (teneurs de référence utilisées). L'enregistrement de toutes les pratiques culturales et des rendements obtenus sur toutes les années passées par les exploitations agricoles facilite la collecte des données pour établir des balances remontant le plus loin possible dans le temps, mais augmente l'effort pour les agriculteurs de retrouver toutes les informations nécessaires.

- ❖ Les incertitudes liées aux balances minérales :

Les sources d'incertitude des bilans minéraux peuvent être classées selon le type d'incertitude (erreurs ou biais), ou selon la nature de l'incertitude : en incertitudes conceptuelles, liées à la méthode adoptée, et en incertitudes opérationnelles, notamment le manque de données et la difficulté de quantification des postes tels que la fixation d'azote (Oenema *et al.*, 2003). Les incertitudes liées à la méthode et communes aux deux cas d'étude concernent principalement les teneurs en éléments minéraux (N, P et K) des divers produits (végétaux, animaux et fertilisants) et les apports d'azote par fixation symbiotique.

Pour les teneurs des végétaux, les références standard utilisées sont généralement issus d'agriculture conventionnelle. La littérature s'accorde à dire cependant que ces teneurs sont susceptibles de varier entre systèmes de culture en fonction de nombreux facteurs (Casagrande, 2008, Barataud, 2013). Nos résultats sur l'étude des teneurs en éléments minéraux des produits récoltés, analysées sur des échantillons végétaux issus des trois dernières récoltes, rejoignent ces constats : pour le blé, les teneurs en azote moyennes diffèrent selon le système de culture adopté ($16,72 \text{ g.kg}^{-1}$ en système biologique contre $21,81$ et $20,30 \text{ g.kg}^{-1}$ en systèmes productif et intégré). Les teneurs en phosphore et potassium varient significativement entre elles, non pas en fonction du système de culture ou de la variété considérée, mais selon l'année ($23,66 \text{ mg.kg}^{-1}$ de P et $39,64 \text{ mg.kg}^{-1}$ de K en 2010, $20,39 \text{ mg.kg}^{-1}$ de P et $35,29 \text{ mg.kg}^{-1}$ de K en 2011, et $25,78 \text{ mg.kg}^{-1}$ de P et $42,95 \text{ mg.kg}^{-1}$ de K en 2012).

Le poste d'entrée en azote par fixation atmosphérique reste également une incertitude majeure, compte tenu des difficultés techniques et financières qu'une quantification précise de cette valeur implique (détermination à partir de l'utilisation de

l'isotope ^{15}N , de l'utilisation des uréides, etc.). Nous avons opté, dans cette étude, pour une estimation empirique, basée sur une étude récente et en cours de parution.

Mis à part ces deux sources communes d'incertitude, le seul point peu fiable, en situation expérimentale, concerne la productivité de la luzerne, non estimée au cours des suivis de l'essai. En réseau d'exploitations agricoles, la précision des données de rendement fournies par les exploitations agricoles ainsi que l'estimation des quantités et de la composition en éléments des engrais de ferme constituent les principales sources d'incertitude identifiées, rejoignant le constat de Mulier *et al* en 2003.

❖ Le choix des échelles temporelles :

La grande variabilité interannuelle des balances confirme la nécessité de se placer sur une échelle temporelle plus pertinente, intégrant tous les flux entrant et sortant à la parcelle au cours d'une rotation culturale ou sur le long terme. De même, l'établissement du bilan « entrées – sorties » en éléments à la porte de l'exploitation sur deux années n'est pas suffisant, l'étude des balances minérales à l'échelle pluriannuelle reste nécessaire (Nesme *et al.*, 2012).

1.2. Les deux cas d'étude

❖ Intérêts et limites de l'essai système :

L'expérimentation « système » diffère des essais factoriels dans la mesure où il ne s'agit plus d'étudier des modalités de facteurs pris séparément, mais d'étudier les systèmes de culture en tant qu'ensemble cohérent et logique de techniques mis en œuvre pour obtenir une production. Elle permet *de facto* d'approcher la logique d'un décideur réel, par contre, elle ne permet pas d'identifier précisément quelle pratique ou quelle composante du système de culture est à l'origine des résultats obtenus.

❖ Intérêts et limites du réseau d'exploitations agricoles :

Cette approche nécessite d'être complétée par le suivi d'autres années afin de mieux appréhender la rotation, sachant que la notion de rotation culturale reste assez théorique. En pratique, les agriculteurs élaborent et planifient au fur et à mesure leurs productions en tenant compte des règles agronomiques, et du contexte technique et économique. Ce sous-échantillon, illustrant les grandes orientations économiques rencontrées mais non représentatif de l'ensemble du réseau, montre que même dans les exploitations ayant plus de dix ans d'ancienneté en agriculture biologique, une part « non bio » peut exister, et qu'il faudra en tenir compte lors de l'analyse des balances globales à l'échelle de l'exploitation.

1.3. L'interprétation des balances minérales

Les difficultés rencontrées pour trouver des références comparables de balances minérales révèlent l'insuffisance encore importante des études prospectant toutes les situations possibles, notamment celles relatives aux systèmes de culture biologique sans élevage. Des réserves sont ainsi à émettre lors de la confrontation de nos résultats à des

références issues de la littérature. Ces dernières correspondent non seulement à des soldes minéraux établis à une échelle spatiale différente, principalement celle de l'exploitation agricole en situation réelle, et non des surplus ou déficits à la parcelle, obtenus en conditions expérimentales, mais elles concernent aussi de valeurs obtenues sur base de successions culturales différentes dans des contextes pédoclimatiques variées. Le changement d'échelle spatiale implique également des méthodes d'établissement des balances différentes intégrant des flux différents.

II. Effets du système de culture adopté sur les balances minérales

2.1. Les balances en azote

Les résultats obtenus en parcelles expérimentales confirment globalement qu'il existe un effet lié au système de culture adopté, pour les balances minérales établies à la rotation culturale ou sur l'ensemble des années de l'essai de longue durée. Le système de culture biologique ne génère pas systématiquement des surplus azotés moindres que les autres modes de production.

Pour l'azote, la moyenne des balances à la rotation culturale, toutes périodes confondues, des parcelles conduites en « bio » et en système productif sont similaires (cf. Partie III - §1.1.1). De même, moyennés sur une plus grande période, les surplus d'azote des deux systèmes de culture restent homogènes entre eux (cf. Partie III - §1.1.2). Ces constats divergent *a priori* des conclusions de nombreuses études statuant globalement sur une diminution significative des balances azotées en agriculture biologique par rapport au système intensif conventionnel (Barataud, 2013 ; Billen *et al.*, 2012 ; Kelm *et al.*, 2008 ; Korsæth et Eltun, 2000), et convergent aux constats de Boldrini *et al.* (2007) selon lesquels les surplus azotés en système biologique sont supérieurs à ceux générés par un système de culture conventionnel avec des apports minéraux réduits.

Certaines réserves sont toutefois à émettre avant de conclure sur une contradiction de nos résultats par rapport aux études antérieures. En effet, les résultats obtenus durant la seule période caractérisée par une succession culturale identique pour les quatre systèmes étudiés (cf. Partie III - §1.1.3) rejoignent les constats en faveur d'une amélioration des performances du système biologique : des surplus azotés de 4 kg.ha⁻¹.an⁻¹ en traitement Bio2 contre des surplus de l'ordre de 60 à 80 kg.ha⁻¹.an⁻¹ d'azote pour les parcelles en système productif, intégré et SCV. L'intégration des autres périodes renverse les tendances moyennes sur la durée totale de l'expérimentation. En effet, les systèmes de culture sont conçus initialement pour étudier un même rotation-type (Pois-Blé-Colza-Blé). Cependant, compte tenu de la démarche en « boucle de progrès » adoptée, qui consiste en une alternance de phases d'évaluation et de (re)-conception année par année, la succession culturale, en système de culture biologique, décliné en deux variantes distinctes Bio1 et Bio2, et en système de semis direct sur couvert, a évolué au cours de l'essai. De ce fait, il

s'avère difficile de confronter les surplus générés par des systèmes de culture présentant, non seulement une variation dans la succession culturale (espèces et variétés cultivées différentes), mais aussi dans l'itinéraire technique.

2.2. Les balances en phosphore et en potassium

En station expérimentale, les soldes entre les flux entrants et sortants pour ces deux éléments sont toujours négatifs, ce qui indique une situation d'appauvrissement du sol. De même que pour l'azote, nos résultats ont mis en évidence l'existence d'une influence du système de culture adopté sur les balances en P et K.

Le système de culture biologique s'est différencié des autres modes de production notamment par la quantité très faible des apports par les engrais. En phosphore, cela se traduit par des déficits toujours significativement moins importants qu'en système productif, étant donné que les soldes calculés sont déterminés principalement par les sorties en cet élément (cf. Partie III - §1.2.2.), contrairement aux précédentes études, qui relient fortement les soldes en phosphore aux entrées par les engrais (Fourrie, 2011 ; Toublant, 2009).

L'établissement des balances en potassium sur une échelle temporelle plus grande permet de diminuer l'amplitude des écarts observés entre les déficits à l'échelle de la rotation, des différentes parcelles conduites selon un même système de culture. Les déficits moyens de potassium sur quinze ans montrent que le système de culture biologique est plus sensible que les autres systèmes dans la mesure où l'appauvrissement apparent des ressources potassiques est plus élevé, lié aux exportations par la luzerne. Des résultats similaires indiquent qu'une grande exportation de potassium par les cultures fourragères non compensée par le recyclage d'éléments par des apports d'effluents animaux en système biologique génère des déficits de potasse plus importants (Aronsson *et al.*, 2007). Une étude menée en station expérimentale sur dix-huit ans (Andrist-Rangel *et al.*, 2007) montre que les déficits potassiques en système de culture biologique et système conventionnel présentent des gammes de valeurs moyennes assez proches (respectivement de -22 à -75 kg.ha⁻¹.an⁻¹ pour le biologique et de -21 à -60 kg.ha⁻¹.an⁻¹ pour le conventionnel). Cela porte à croire qu'en absence de culture particulièrement exportatrice de potassium telle la luzerne, il n'y aura pas de différenciation des déficits potassiques en fonction du système de culture adopté.

Conclusion partielle

Notre hypothèse de départ, selon laquelle « les balances minérales sont significativement différentes en système de culture biologique » n'est que partiellement vérifiée. Les bilans de surface en azote, phosphore et potassium, établis sur une parcelle donnée, à l'échelle de la rotation culturale ou à l'échelle du long terme, ne permettent pas de statuer sur une amélioration notable des performances de l'agriculture biologique par rapport aux autres modes de production. Ce qui appelle à dépasser la simple comparaison de systèmes nominaux (biologique, conventionnel, etc.) pour analyser des sous-systèmes

mieux caractérisés. Cela permet également d'attirer l'attention sur la sensibilité de l'approche par les balances minérales pour l'élément azote.

III. Variabilité des balances minérales en système de culture biologique

Nos résultats confirment l'existence d'une variabilité très marquée des balances minérales parcellaires à l'échelle annuelle, que ce soit pour l'azote (cf. Partie III, §1.1.2.), le phosphore ou le potassium (cf. Partie III, §1.2.1.), au sein d'un même système de culture. De même à l'échelle de l'exploitation agricole, les balances minérales varient plus ou moins fortement d'une année à l'autre (cf. Partie III, §2.1.2. et 2.1.3.). Cette variabilité interannuelle n'est pour autant pas spécifique au système de culture biologique, mais est commune à tous les systèmes. Ce qui conforte les avis selon lesquels l'approche par les balances minérales n'est pas pertinente à l'échelle annuelle (CORPEN, 2007). L'échelle temporelle et spatiale de quantification doit permettre d'intégrer les effets cumulatifs entre les années et les transferts spatiaux entre parcelles (Beaudoin *et al.*, 2005, Constantin *et al.*, 2011).

A l'échelle de la rotation culturale, les parcelles conduites en système de culture biologique présentent pour la plupart des surplus en azote, à la fois en situation expérimentale (cf. Partie III, §1.1.4.) et en situation réelle (cf. Partie III, §2.2.1.). Pour le phosphore, la tendance est au déficit, sur les deux cas d'étude. Pour le potassium, les parcelles présentent des déficits au cours de l'essai en grandes cultures sans élevage, tandis qu'en réseau de parcelles agricoles, trois parcelles sur huit présentent des surplus. De même, à l'échelle de l'exploitation agricole, il y a excédent en potassium sur la moitié des situations rencontrées. Les cas de surplus de potassium sont liés à une utilisation intensive de vinasse pour la fertilisation des cultures. Ce qui rejoint les conclusions de certaines études selon lesquelles sans apport de grandes quantités de P et K, par les engrais organiques et l'alimentation animale, la balance est déficitaire (Berry *et al.*, 2003 ; Nesme *et al.*, 2012).

En réseau d'exploitations agricoles, les balances minérales établies à deux échelles spatiales différentes ne convergent pas. L'échelle parcellaire montre une valeur de balances présentant une plus grande amplitude de variation que celles à l'échelle de l'exploitation, qui sont de fait plus lissées. La balance à l'échelle de l'exploitation reflète une disponibilité en élément minéraux, qui peut être due à la présence d'élevage, se répercutant sur toutes les parcelles. Les différences observées entre exploitations sont moins perceptibles à l'échelle parcellaire, ou même contradictoire dans le cas du potassium.

Conclusion partielle

Notre deuxième hypothèse, selon laquelle « à l'échelle annuelle, la variabilité des balances minérales est très marquée, tandis qu'à moyen/long terme, la tendance est au surplus azoté et aux déficits en phosphore et potassium, en système de culture biologique » est validée.

IV. Importance de la fixation biologique d'azote

Nos résultats confirment que les surplus sont corrélés aux entrées totales d'azote, rejoignant ainsi les conclusions émises sur la base d'un nombre plus important d'observations (Makridis *et al.*, 2011). L'ensemble formé par les pratiques de fertilisation et la contribution des apports par fixation symbiotique de l'azote gazeux déterminent ainsi les balances azotées. Par ailleurs, l'étude de l'effet potentiel de la substitution de la culture de luzerne (cf. Partie III - §1.1.1 et §1.1.3) sur les surplus d'azote montre, d'une part, que l'introduction de cette culture impacte fortement les surplus et, d'autre part que, l'indicateur considéré est, en système de culture biologique, sensible à la capacité fixatrice de la légumineuse cultivée.

Les entrées d'azote en système de culture biologique sont limitées par rapport aux autres systèmes de culture étudiés en raison des contraintes, d'une part, imposées par le cahier des charges biologique (interdiction des fertilisants chimiques), et d'autre part, locales de l'essai mis en place (non recours aux effluents d'élevage et restriction des apports d'engrais commerciaux). Le principal levier disponible pour assurer la nutrition azotée des cultures repose ainsi sur les entrées d'azote par les légumineuses fixatrices (cf. Partie III - §1.1.1). Ce qui rejoint le constat selon lequel la fixation symbiotique contribue à plus de 50% des entrées d'azote dans le calcul des balances en système de culture biologique (Berry *et al.*, 2003).

L'importance de la fixation d'azote symbiotique en système de culture biologique implique l'importance de la précision et de la fiabilité du calcul de ce poste particulier.

❖ Recommandations concernant le rôle de la luzerne en système de culture biologique :

Cette légumineuse peut contribuer d'une part à augmenter fortement les surplus azotés, donc il faut veiller à équilibrer l'entrée d'azote par fixation symbiotique et l'exportation d'azote hors de la parcelle. La valorisation de la culture par la vente sur pied, en foin ou en fourrage déshydraté peut constituer une alternative intéressante, en région d'élevage ou à proximité d'usine de déshydratation. D'autre part, une grande quantité exportation de biomasse de luzerne favorise le déstockage de la réserve potassique du sol. Une compensation par des apports d'engrais organiques est nécessaire pour corriger le déficit en potassium. Ainsi, il faut savoir concilier ces deux aspects lors de l'insertion de la culture de luzerne dans la rotation, d'autant qu'il s'agit aussi d'une culture « étouffante » utilisée pour maîtriser les adventices en agriculture biologique.

V. Éléments d'interprétation des balances minérales

5.1. Devenir des surplus d'azote

L'approche par les balances azotées ne permet pas la compartimentation du devenir des excédents obtenus. Le solde correspond en effet à la somme des flux d'azote sortant du compartiment azote minéral du sol, à savoir : pertes gazeuses, organisation par la biomasse microbienne, et lessivage (Mary *et al.*, 2002). Par définition, la résultante du solde entre les

entrées en azote et les exportations azotées par les cultures (N Bal), à l'échelle de la parcelle cultivée, correspond ainsi à l'ensemble formé par la variation de stock du pool d'azote organique du sol et les transferts d'azote vers le milieu (pertes par voie gazeuse G et pertes par lessivage L), soit :

$$N\ Bal = \Delta Stock\ Norg + G + L$$

La confrontation de la variation des stocks en azote organique du sol sur une période de huit ans (1998 à 2006) aux balances azotées calculées sur la même période constitue une première approche d'interprétation du devenir des surplus. Les résultats sont présentés dans le graphique suivant (Figure 27).

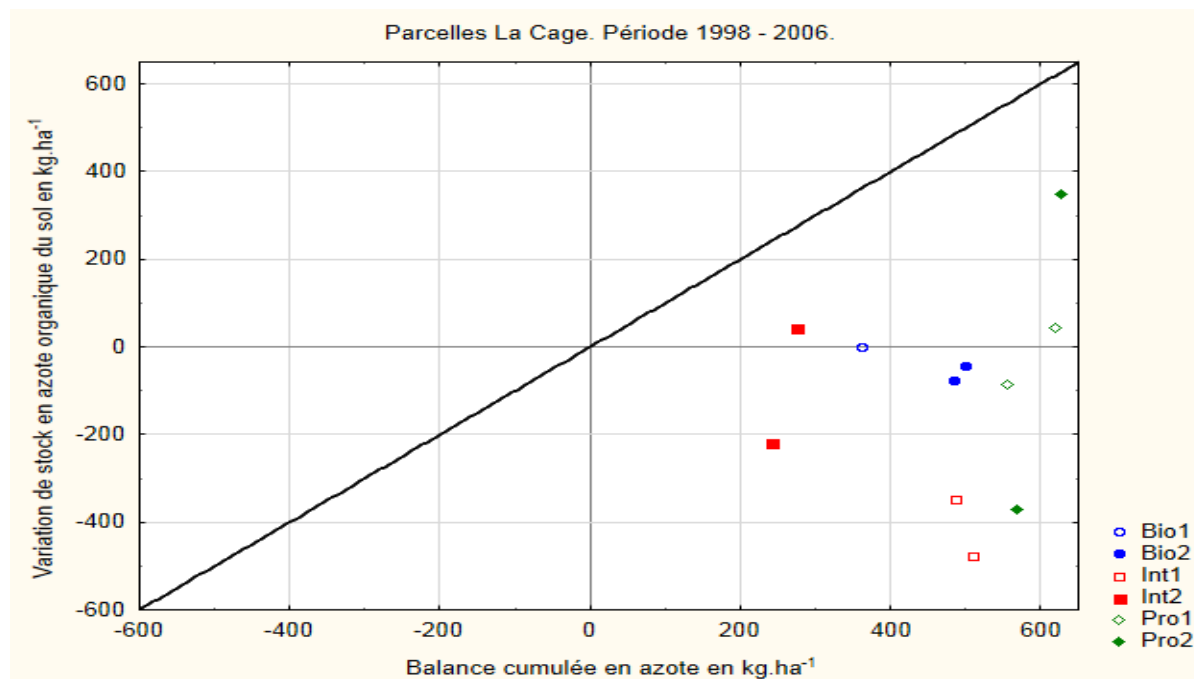


Figure 27. Variation de stock en azote organique du sol en fonction de la balance azotée, en essai de longue durée de « La Cage »

Les sous-systèmes de culture : Bio1, Bio2, Int1, Int2, Pro1, Pro2

Les écarts à la bissectrice correspondent d'une part à la somme des fuites d'azote vers le milieu (G + L), et d'autre part, aux erreurs liées soit à l'estimation du stock d'azote organique (erreur de mesure, masse volumique du sol, couche de sol analysée), soit aux calculs des balances azotées (estimation du rendement, teneurs en azote des cultures). Globalement, les points y sont très dispersés, que ce soit entre points appartenant à des systèmes de culture différents, ou entre points représentant un même système de culture. Billen *et al.*, (2013) délimitent globalement les flux pris en compte dans l'approche du « bilan d'azote à la surface du sol » et leurs correspondances avec les flux dans les compartiments N organique et N minéral du sol, dans la représentation schématique qui suit (Figure 28).

Concernant la signification des soldes positifs ou négatifs obtenus par l'approche retenue, elle se limite à décrire globalement l'enrichissement ou l'appauvrissement du milieu en un élément minéral donné. Pour une rotation et un pédoclimat donnés, la balance est

reliée linéairement à la fertilisation (Mary *et al.*, 2002). Quand tous les éléments du système varient, il est difficile d'établir des relations directes entre gestion de la fertilisation, surplus / déficits en éléments et impacts environnementaux. La tentative de mise en relations des balances minérales aux variations de stock en éléments du sol n'est pas suffisante. Les déterminations des teneurs en éléments du sol à trois dates relativement rapprochées (1998, 2002 et 2006) sont insuffisantes pour juger, sans risque excessif d'erreurs, de l'évolution du statut minéral du sol. D'ailleurs l'analyse des résultats a montré l'existence de points anormalement différents (parcelle N°16.2), très probablement lié à un mauvais choix de la zone de prélèvement des échantillons de sol (cf. Annexes A5). A cela s'ajoute, dans notre étude, les incertitudes liées aux hypothèses sur la densité apparente du sol. Il faudrait alors réaliser des suivis réguliers de l'évolution des teneurs en éléments du sol, en conditions constantes de prélèvement, sur une période plus longue au cours de l'essai.

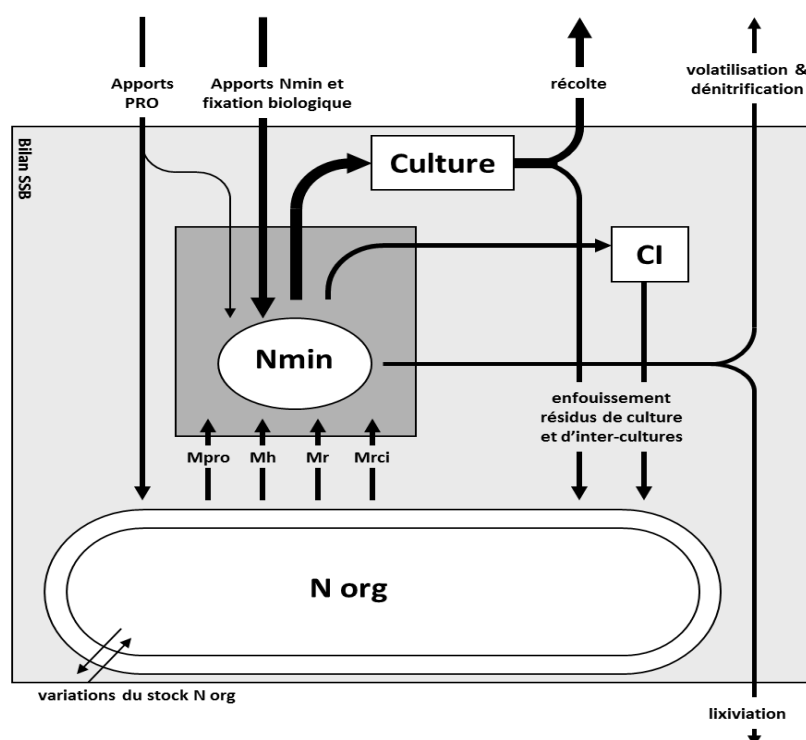


Figure 28. Représentation schématique des flux pris en compte dans le bilan azoté d'un sol agricole (Billen *et al.*, 2013)

La zone grisée claire délimite les flux pris en compte par le bilan SSB (*soil surface budget*). N min et N org représentent les pools d'azote minéral et organique du sol ; Mpro, Mh, Mr et Mrci correspondent respectivement à la minéralisation nette des produits résiduaux organiques (PRO), de l'humus, des résidus de culture, et des résidus de culture intermédiaire (CI).

5.2. Eléments d'interprétation des balances en phosphore et potassium

Dans une tentative d'interprétation des balances en phosphore et potassium, nous avons aussi confronté la variation de stock du sol aux déficits calculés. L'offre potentielle du sol en phosphates assimilables (méthode Joret-Hébert) et en potassium échangeable est estimée à partir des teneurs mesurées dans le sol. La variation apparente des stocks ainsi

obtenus permet de rendre compte de l'évolution du statut en P et K du sol au cours de la période considérée. Les résultats montrent qu'il y a diminution des stocks en phosphore assimilable et en potassium échangeable dans le sol au cours de la période considérée, autrement dit il y a eu libération apparente d'ions non labiles à partir des réserves du sol et du sous-sol. Les variations de stock sont moins importantes que les déficits théoriques des balances pour le phosphore (Figure 29) tandis que pour le potassium il y a équivalence des deux variables mais avec une forte dispersion (Figure 30).

Théoriquement, les quantités de phosphates assimilables et de potassium échangeable apparemment disparues dans le profil sont toujours inférieures aux déficits du bilan cultural, mettant ainsi en évidence un prélèvement par les cultures aux dépens des formes de P et K non extractibles (Trocmé et Delas, 1960 ; Blanchet et Bosc, 1967 ; Bosc, 1988). Nos résultats ne permettent pas de vérifier ces conclusions. De plus, la corrélation entre les variables, variation de stock et balance, quel que soit l'élément considéré, ne peut pas être établie à partir de l'échantillon considéré. Plusieurs hypothèses sont émises pour expliquer ces écarts : ils peuvent être liés aux variations de stock (teneurs en élément mesurées, densité apparente et profondeur de la couche de sol analysée), tout comme ils peuvent être liés au calcul des balances minérales (teneurs de conversion des quantités en flux). D'autant plus que la taille très réduite de l'échantillon ($n = 11$), ne permet pas de faire des analyses statistiques robustes.

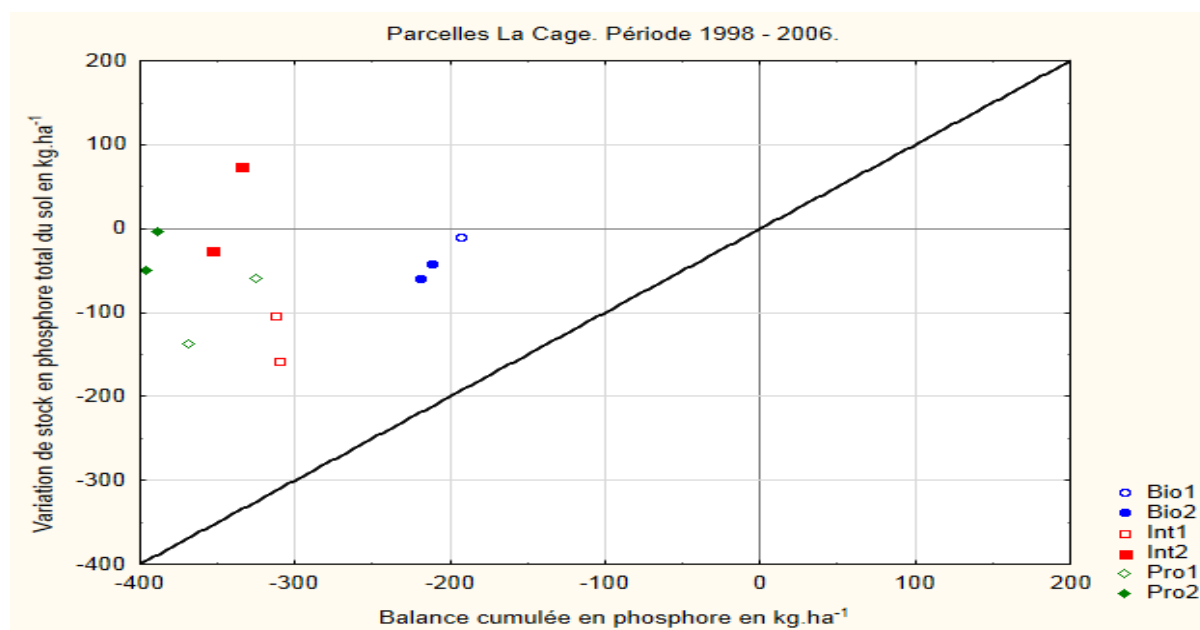


Figure 29. Variation de stock en phosphore total du sol en fonction de la balance cumulée en phosphore

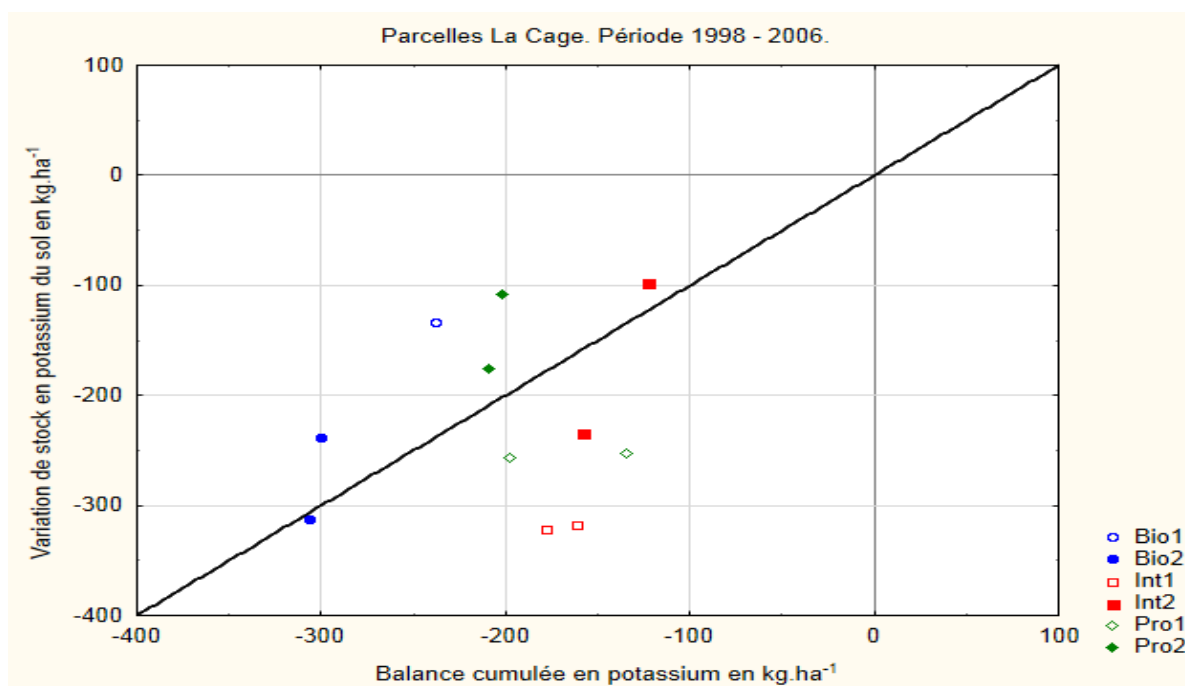


Figure 30. Variation de stock en potassium du sol en fonction de la balance cumulée en potassium

Les sous-systèmes de culture : Bio1, Bio2, Int1, Int2, Pro1, Pro2

Bien que les balances minérales expriment simplement les variations quantitatives auxquelles sont soumis les sols sous l'influence des importations (engrais) et des exportations (récolte) (Bosc, 1988), nous pouvons supposer que des fumures phosphatées nettement excédentaires par rapport aux exportations par les cultures donnent lieu à des transferts verticaux qui enrichissent le sous-sol en phosphore. (Boniface et Trocmé, 1988). Plus les teneurs en phosphore des sols sont élevées, plus les risques de transfert sont importants (Fourrie, 2011). Malgré les déficits apparents calculés, le statut des réserves en phosphore et potassium disponibles dans le sol n'est pas pour autant forcément alarmant. En effet, une expérimentation conduite sur vingt et un ans sur un sol moyennement à faiblement pourvu en phosphore a montré qu'un solde équilibré entre entrées et sorties d'élément permet de maintenir constante la disponibilité en P (Oehl *et al.*, 2002)

Conclusion

Les balances minérales reposent sur le principe de la conservation des masses appliqué à un système donné sur une période donnée. Dans notre étude, deux approches différentes ont été suivies, à savoir le bilan à la surface du sol et le bilan apparent à l'exploitation, correspondant à deux échelles spatiales différentes (la parcelle cultivée et l'exploitation agricole), pour étudier les balances minérales. De même, l'objet d'étude est double : une expérimentation système comparant quatre grands types de systèmes de culture à dominance céréalière, mise en place depuis 1998 à Versailles, et un réseau d'exploitations agricoles biologiques en région Picardie. Les objectifs initiaux de l'étude consistent à établir les balances minérales sur les deux cas d'étude retenus, puis à identifier et expliciter leur variabilité interannuelle et inter-parcellaire. Ils sont globalement atteints pour l'essai, mais partiellement pour le réseau d'exploitations agricoles. Nos résultats confirment l'existence d'une grande variabilité des balances minérales, non seulement interannuelle lorsque les surplus et/ou sont calculés année par année, mais aussi entre les parcelles soumises à des systèmes de culture différents. Selon l'élément considéré, le solde des « entrées – sorties » sera déterminé par l'un ou l'autre des flux entrant et/ou sortant.

Quoique largement utilisées pour répondre à des objectifs très variés, les références disponibles concernant les balances minérales en agriculture biologique, notamment en système sans élevage, restent insuffisantes. En ce sens, notre étude contribue à enrichir les données déjà existantes. Elle montre l'opérationnalité de la méthode appliquée en système biologique, en comparaison avec d'autres modes de production. En dépit de l'effectif très réduit des exploitations agricoles étudiées, il est apparu un éventail assez large de balances minérales obtenues. Une augmentation du nombre d'exploitations prospectées permettra de réaliser une analyse des interactions entre les situations observées de surplus ou déficits en éléments et les caractéristiques propres à chaque exploitation (orientation de la production, pratiques culturales adoptées).

La tentative d'interprétation des balances minérales obtenues, même insuffisante, ouvre de nouvelles perspectives sur la nécessité d'approfondir les questions sur le devenir des flux excédentaires d'azote d'une part, et sur la dynamique des éléments en phosphore et potassium dans le sol et leurs conséquences par rapport à la nutrition minérale des cultures d'autre part. L'élargissement des cas d'étude considérés en intégrant les autres exploitations agricoles du réseau de fermes biologiques en Picardie et Nord Pas-de-Calais constitue aussi une suite logique de l'étude menée, afin d'enrichir les situations étudiées.

La balance minérale reste un outil préliminaire de recherche et de communication ayant une portée limitée et donnant des indications sommaires sur l'état du milieu. Il faudra ainsi compléter cette approche par une quantification des flux transférés vers l'atmosphère et les hydrosystèmes. Il est également important de noter que l'étude des flux d'éléments minéraux ne constitue qu'une composante de l'étude des impacts environnementaux des systèmes de production agricole. Il existe de nombreux autres aspects à considérer pour juger les performances environnementales d'un système donné : évolution des stocks de carbone organique, émission de gaz à effets de serre, évolution de la diversité biologique de la faune et flore du sol, etc.

Références bibliographiques

- Agence Bio, 2013. *Dossier de presse du Printemps Bio 2013*. 61 pages.
- Andrist-Rangel, Y., Edwards, A.C., Hillier, S., Öborn, I., 2007. Long-term K dynamics in organic and conventional mixed cropping systems as related to management and soil properties. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 413–426.
- Anglade, J., 2013. Empirical relationships to estimate N fixation in legume crops. Article en préparation.
- Aronsson, H., Torstensson, G., Bergström, L., 2007. Leaching and crop uptake of N, P and K from organic and conventional cropping systems on a clay soil. *Soil Use and Management* 23, 71–81.
- Barataud, F., Foissy, D., Fiorelli, J.-L., Beaudoin, N., Burel, E., Billen, G., 2013. Conversion of a conventional to an organic mixed dairy farming system: Consequences in terms of N fluxes. Article soumis à *Agricultural Systems*.
- Beaudin, I., Giroux, M., Michaud, A., Beaudet, P., 2008. *Les sources, les formes et la gestion du phosphore en milieu agricole*. Fiche technique N°2. CRAAQ et IRDA Québec
- Beaudoin, N., Saad, J.K., Van Laethem, C., Machet, J.M., Maucorps, J., Mary, B., 2005. Nitrate leaching in intensive agriculture in Northern France: Effect of farming practices, soils and crop rotations. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 111, 292–310.
- Berry, P.M., Stockdale, E.A., Sylvester-Bradley, R., Philipps, L., Smith, K.A., Lord, E.I., 9. Watson, C.A., Fortune, S., 2003. N, P and K budgets for crop rotations on nine organic farms in the UK. *Soil Use and Management* 112–118.
- Bertrand, M., Guichard, L., Meynard, J.L., Picard, D., Saulas, P., 2005. Conception de systèmes de culture durables et innovants en grande culture. Le cas de l'essai de longue durée de « La Cage » à Versailles.
- Billen, G., Garnier, J., Anglade, J., Benoit, M., Lassaletta, L., 2013. Surplus et relation Rendement – Fertilisation comme indicateurs des performances agronomiques et environnementales de l'agriculture. Journées sur les surplus d'azote organisé par l'INRA unité Agro-Impact, Laon, France, 17 Juin 2013.
- Billen, G., Garnier, J., Thieu, V., Passy, P., Rioussel, P., Silvestre, M., Théry, S., Vilain, G., Billy, C., 2012. *La cascade de l'azote dans le bassin de la Seine. Comprendre les processus pour inverser les tendances*. Collectif du Programme PIREN-SEINE N°15.
- Boldrini, A., Benincasa, P., Tosti, G., Tei, F., Guiducci, M., 2007. Apparent N Balance in Organic and Conventional Low Input Cropping Systems. 3rd QLIF Congress, Hohenheim, Germany, 20-23 March 2007.
- Boniface, R., Trocmé, S., Bosc, M., 1988. Enseignements fournis par des essais de longue durée sur la fumure phosphatée et potassique. *Phosphore et potassium dans les relations sol-plante. Conséquences sur la fertilisation*. INRA, Paris.
- Casagrande, M., 2008. Evaluation précoce des performances du blé biologique (rendement et teneur en protéines) : une approche combinée de diagnostic agronomique, de modélisation à l'aide d'indicateurs de nuisibilité et d'études des pratiques dans les exploitations agricoles. Thèse soutenue en 2008

- Cellier, P., Rochette, P., Faverdin, P., 2012. *La cascade de l'azote et l'élevage, et ses conséquences*.
- COMIFER, 2012. *Calcul de la fertilisation azotée*. Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales. COMIFER Groupe Azote.
- Constantin, J., Mary, B., Laurent, F., Aubrion, G., Fontaine, A., Kerveillant, P., Beaudoin, N., 2010. Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching and balance in three long-term experiments. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 135 (2010) 268–278
- CORPEN, 2007. *Des indicateurs azote pour gérer des actions de maîtrise des pollutions à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation et du territoire*. Brochure CORPEN Groupe Azote.
- Duanmu, S., 2009. *Evolution de la fertilisation en France et bilans régionaux depuis 20 ans*. Rapport de l'Union des Industries de la Fertilisation (UNIFA).
- Fourrie, L., Butler, F., Castillon, P., Hanocq, D., Fougère, M., Levasseur, P., Gascuel, C., Dorioz, J.M., Morel, C., Raison, C., Aubert, C., 2011. Le phosphore d'origine agricole : diagnostics et solutions pour limiter les transferts vers le milieu aquatique. *Innovations Agronomiques* 17, 15–32.
- Gerber, M., Fontaine, L., 2009. *Grandes cultures biologiques : maintenir la fertilité des sols*. Fiche technique n°3. RMT DévAB
- Gerber, M., Maurice, R., Glachant, C., Gourraud, J.-P., Morand, P., Kloareg, L., Perret, C., 2011. *Rotations pratiquées en grandes cultures biologiques en France : état des lieux par région*. Brochure de l'ITAB.
- Gosling, P., Shepherd, M., 2005. Long-term changes in soil fertility in organic arable farming systems in England, with particular reference to phosphorus and potassium. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 105, 425–432.
- Hinsinger, P., Jaillard, B., Le Cadre, E., Plassard, C., n.d. Spéciation et biodisponibilité du phosphore dans la rhizosphère. In *Stocks et flux de phosphore dans les écosystèmes terrestres et aquatiques, et impacts environnementaux*. Journée de l'Institut Océanographique, 37–50.
- Kelm, D.M., Loges, D.R., Taube, P.D.F., 2008. Comparative analysis of conventional and organic farming systems: Nitrogen surpluses and nitrogen losses. 16th IFOAM Organic World Congress, Modena, Italy, 16-20 June 2008.
- Korsaaeth, A., Eltun, R., 2000. Nitrogen mass balances in conventional, integrated and ecological cropping systems and the relationship between balance calculations and nitrogen runoff in an 8-year field experiment in Norway. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 199–214.
- Makridis, T., Anglade J., Garnier, J., Billen, G., 2012. *Inventaire et caractérisation des exploitations d'agriculture biologique dans le Nord de la France*.
- Mangin, M., Fourrie, L., 2011. Réseau expérimental RotAB : évolution de la fertilité des sols dans les systèmes de grandes cultures biologiques sans élevage. Conception et évaluation des systèmes de grande culture en AB - Restitution du programme RotAB – Journée Technique Grandes Cultures biologiques ITAB / ARVALIS – Institut du végétal, Paris, France, 22 novembre 2011.
- Mary, B.; Laurent, F.; Beaudoin, N., 2002. Sustainable management of nitrogen fertilisation. Proceedings of the 65th Institut International de Recherches Betteravieres Congress, Brussels, Belgium, 13-14 February 2002.

- Meisinger J.J., Calderón F.J. et Jenkinson D.S., 2008. Soil nitrogen budgets. *Nitrogen in Agricultural Systems, Agronomy Monograph* 49. American Society of Agronomy, 505-556.
- Molé T., 2008. Bilans du phosphore sur les territoires et propositions de leviers d'action pour la filière avicole. Mémoire de fin d'études ENESAD, 144pg. In Fourrie et al., 2011.
- Mulier, A., Hofman, G., Baecke, E., Carlier, L., D. De Brabander, G. De Groote, R. de Wilde, Fiems, L., Janssens, G., O. Van Cleemput, A. Van Herck, G. Van Huylenbroeck, Verbruggen, I., 2003. A methodology for the calculation of farm level nitrogen and phosphorus balances in Flemish agriculture. *European Journal of Agronomy* 45–51.
- Nesme, T., Toublant, M., Mollier, A., Morel, C., Pellerin, S., 2012. Assessing phosphorus management among organic farming systems: a farm input, output and budget analysis in southwestern France. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 92, 225–236.
- Öborn, I., Edwards, A., Witter, E., Oenema, O., Ivarsson, K., Withers, P.J., Nilsson, S., Richert Stinzing, A., 2003. Element balances as a tool for sustainable nutrient management: a critical appraisal of their merits and limitations within an agronomic and environmental context. *European Journal of Agronomy* 20, 211–225.
- Oehl, F., Oberson, A., Tagmann, H.U., Besson, J.M., Dubois, D., Mäder, P., Roth, H.-R., Frossard, E., 2002. Phosphorus budget and phosphorus availability in soils under organic and conventional farming. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 25–35.
- Oenema, O., Kros, H., de Vries, W., 2003. Approaches and uncertainties in nutrient budgets: implications for nutrient management and environmental policies. *European Journal of Agronomy* 20, 3–16.
- Olesen, J.E., Askegaard, M., Rasmussen, I.A., 2009. Winter cereal yields as affected by animal manure and green manure in organic arable farming. *European Journal of Agronomy* 30, 119–128.
- Simon, J.-C., Grignani, C., Jacquet, A., Le Corre, L., Pagès, J., 2000. Typologie des bilans d'azote de divers types d'exploitation agricole: recherche d'indicateurs de fonctionnement. *Agronomie* 20, 175–195.
- Simon, J.C., Le Corre, L., 1992. Le bilan apparent de l'azote a l'échelle de l'exploitation agricole: méthodologie, exemples de resultats. *Fourrages* 129, 79 –94.
- Stockdale, E.A., Watson, C.A., 2002. Nutrient budgets on organic farms: a review of published. In Powell, J., et al (Eds.), Proceedings of the UK Organic Research 2002 Conference. Organic Centre Wales, Institute of Rural Studies, University of Wales Aberystwyth, 129–132.
- Toublant, M., 2009. Caractérisation et évaluation des pratiques d'entretien de la fertilité phosphorique des sols de grandes cultures en agriculture biologique. Mémoire de fin d'études. Agrocampus Ouest.
- Watson, C.A., Bengtsson, H., Ebbesvik, M., Loes, A.K., Myrbeck, A., Salomon, E., Schroder, J., Stockdale, E.A., 2002. A review of farm-scale nutrient budgets for organic farms as a tool for management of soil fertility. *Soil Use Management* 18, 264–273.

Annexes

A1. Estimation de la quantité d'azote fixée par les légumineuses

La méthode présentée ci-après provient des travaux en cours de l'UMR Sisyphe (Anglade et al., *in prep.*). La formule utilisée pour le calcul de la quantité d'azote fixée par les légumineuses est la suivante :

$$N_{fix} = [BGN - F] \times N_{fix\ aérien} \quad (1)$$

[BGN-F] correspond à un facteur multiplicatif pour intégrer la part d'azote contenue dans les parties souterraines des légumineuses (*below ground nitrogen*). La quantité d'azote fixée par la biomasse aérienne est donnée par la relation linéaire de type :

$$N_{fix\ aérien} = \alpha \times \text{rendement } N + \beta \quad (2)$$

Les paramètres utilisés sont :

Espèce	Equation de la régression (2)	[BGN-F]
Pois	$N_{fix\ aérien} = 0,63 \times \text{rdtN} + 1,7$	1.33
Lentille	$N_{fix\ aérien} = 0,63 \times \text{rdtN} + 3,4$	1.4
Féverole	$N_{fix\ aérien} = 0,71 \times \text{rdtN} + 8$	1.53
Luzerne	$N_{fix\ aérien} = 0,81 \times \text{rdtN} - 14$	1.6
Trèfle	$N_{fix\ aérien} = 0,79 \times \text{rdtN} + 3$	1.6
Général	$N_{fix\ aérien} = 0,77 \times \text{rdtN} - 4,3$	1.5

Le rendement N correspond à la quantité d'azote accumulée dans la biomasse aérienne des cultures à la récolte, et est obtenue :

$$\text{Soit par : } \text{rendement } N = \text{rendement grains} \times tN \text{ grains} \times NHI \quad (3a)$$

$$\text{Soit par : } \text{rendement } N = \text{rendement biom. aér} \times tN \text{ biom. aér.} \quad (3b)$$

NHI ou *nitrogen harvest index*, estimé à dire d'experts à 0.8 pour le pois et le soja, est défini comme étant le ratio entre la quantité d'azote contenu dans les grains et la quantité d'azote dans la biomasse aérienne totale à la maturité.

Certains points restent approximatifs, il s'agit principalement de l'estimation de :

- i. La productivité en luzerne, présente en système de culture biologique et en SCV. Le recours à des hypothèses a alors été nécessaire pour la mise en œuvre des bilans entrées/sorties en éléments à l'échelle de la parcelle. La luzerne (*Medicago sativa*) étant une légumineuse fourragère pérenne, la récolte en biomasse aérienne se fait en plusieurs coupes, étalées de Mars à Septembre. Pour l'essai de La Cage, seule la

deuxième coupe généralement réalisée en fin Juin est fauchée. La productivité totale de la luzerne correspond alors à la biomasse produite pour l'ensemble des coupes tandis que la quantité exportée ne tient compte que de la biomasse produite à la deuxième coupe. On a attribué le rendement moyen de la région Ile-de-France en luzerne biologique, établi sur la période 2005 à 2009 et s'élevant à 10.7 tonnes de matières sèches par hectare, comme valeur constante de la productivité totale pour les années à luzerne de l'essai. La quantité exportée de la parcelle, correspondant à la productivité en deuxième coupe, est estimée à 30% de la production totale en luzerne. La part exportée est nulle lorsque les récoltes en luzerne sont broyées puis restituées au sol.

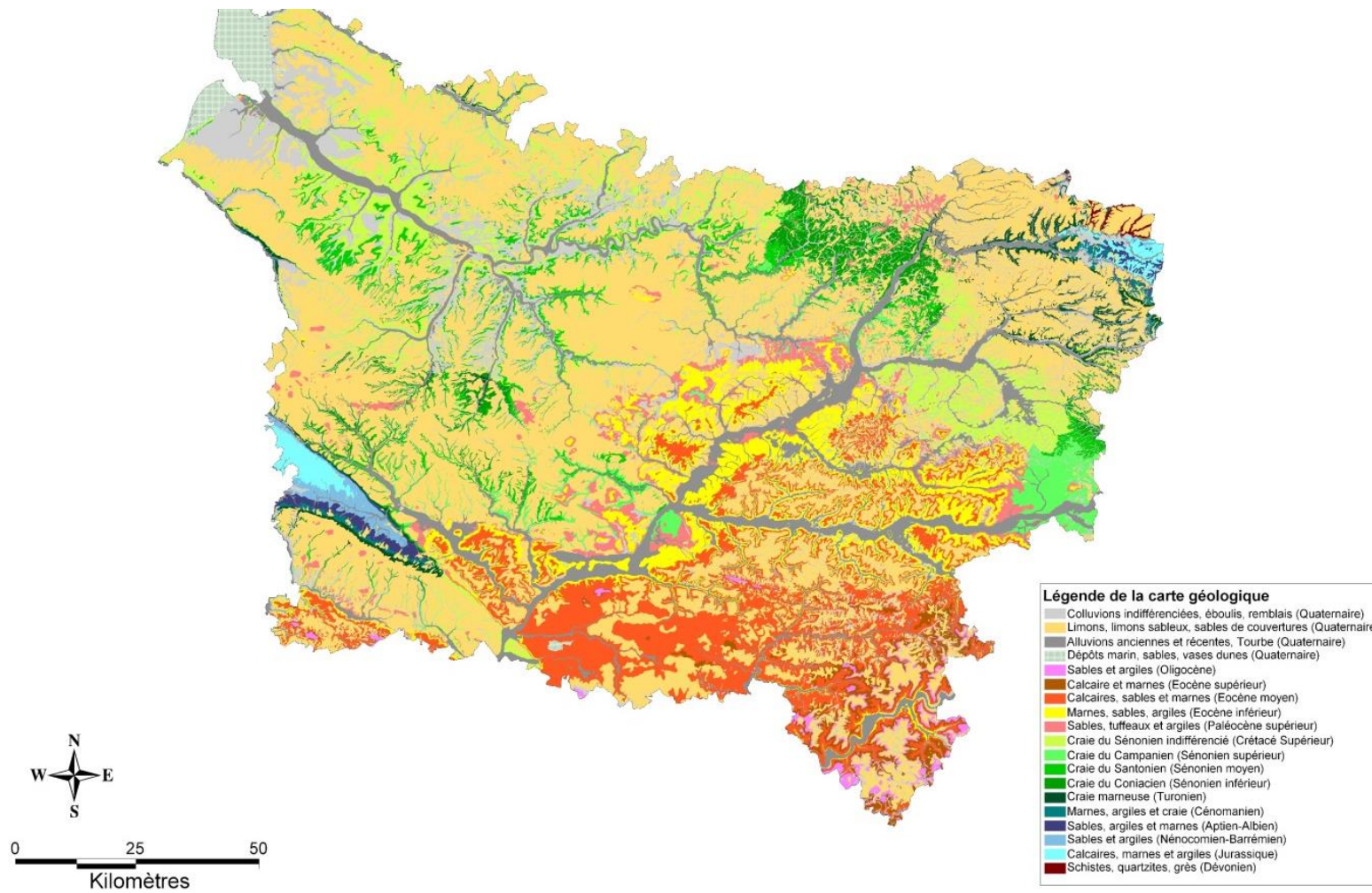
- ii. La productivité des couverts végétaux, étape intermédiaire dans l'estimation de la quantité d'azote atmosphérique fixé par les légumineuses en interculture et/ou en couverture du sol. Parmi les espèces utilisées, on s'intéresse uniquement aux légumineuses fixatrices, à savoir la vesce et le trèfle blanc. On s'est appuyé sur une expertise « vesce en interculture » (Constantin et al., 2012) pour obtenir directement la quantité d'azote fixé par la culture intermédiaire en fonction de l'année, de la date d'implantation et de la date de destruction du couvert, en émettant l'hypothèse que les quantités fixées par le trèfle ne sont pas significativement différentes de celles fixées par la vesce.

A2. Teneurs de référence en N, P et K utilisées

Produits	taux MS (%)	teneur en N	teneur en P	teneur en K	unités des teneurs
Avoine	85	1.96	0.80	0.60	kg/q de MS
Betterave rouge		3.1	1	2.5	kg/t de MF
Blé	85	2.00	0.78	0.60	kg/q de MS
Carotte		1.6	0.4	2.5	kg/t de MF
Chicorée		1.2	0.80	4.50	kg/t de MS
Colza	91	3.05	1.40	0.85	kg/q de MS
Endive		1.8	0.3	1.8	kg/t de MF
Engrain	85	2.2	0.6	0.4	kg/q de MS
Epeautre	85	1.9	0.6	0.4	kg/q de MS
Lentille	85	4.3	0.40	1.2	kg/q de MS
Lupin	86	5.16	0.83	1.23	kg/q de MS
Luzerne		31.00	7.00	25.00	kg/t de MS
Maïs	85	1.64	0.60	0.48	kg/q de MS
Orge	85	1.71	0.73	0.63	kg/q de MS
Pois	86	3.72	0.95	1.38	kg/q de MS
Pomme de terre		3.2	0.7	5	kg/t de MF
Pommes		0.9	0.3	2	kg/t de MF
Soja	85	6.80	1.60	1.60	kg/q de MS
Trèfle violet		46	7	20	kg/t de MS
Triticale	84	2.08	0.46	0.5	kg/q de MS
Foin d'association graminée/légumineuse		20	2.6	19	kg/t de MS
Pailles		6	2	10	kg/t de MS
Pulpe sèche	88.9	16	2.3	7.5	kg/t de MS
Pulpe surpressée	22	16	2.3	7.5	kg/t de MS

Sources variées regroupées par CORPEN et COMIFER

A3. Principaux types de sol en région Picardie



Source : BRGM

A4. Grille d'enquête en exploitation agricole

Nom de l'exploitant agricole :

Localisation :

Année de conversion AB :

A. Occupation du sol

SAU de l'exploitation (ha)

totale	en AB	en AC	en conversion	cultures annuelles	cultures pérennes	prairies (PT/PP)

B. Productions végétales1. Assolement 2011/2012

Culture(s) présentes sur l'exploitation

Surfaces cultivées (ha)

Quantités produites / Rendements

Devenir des produits

Devenir des résidus de cultures

Interculture / Couvert

2. Assolement 2010/2011

Culture(s) présentes sur l'exploitation

Surfaces cultivées (ha)

Quantités produites / Rendements

Devenir des produits

Devenir des résidus de cultures

Interculture / Couvert

C. Gestion de la fertilisation

Nature de l'engrais

Origine (achat / échange / interne)

Quantités importées en 2011/2012

Quantités importées en 2010/2011

Engrais 1 Engrais 2 Engrais 3 Engrais 4

D. Productions animales

Atelier d'élevage

Race :

Taille du cheptel (UGB) :

Animaux (stade de croissance)	Nombre total de têtes	Nombre de vendus	Poids à la vente	Nombre d'achetés	Poids à l'achat
Produits et sous-produits animaux	Quantité produite	Quantité vendue			

Alimentation animale	Quantité achetée

Parcelle 1

Nom de la parcelle :

Superficie (ha) :

Année de conversion AB :

Année	Culture(s)	Rendement (unité à préciser)	Nature de l'engrais utilisé	Dose d'engrais (unité à préciser)	Devenir des résidus de culture	Légumineuses en interculture/couvert
2012						
2011						
2010						
2009						
2008						

Parcelle 2

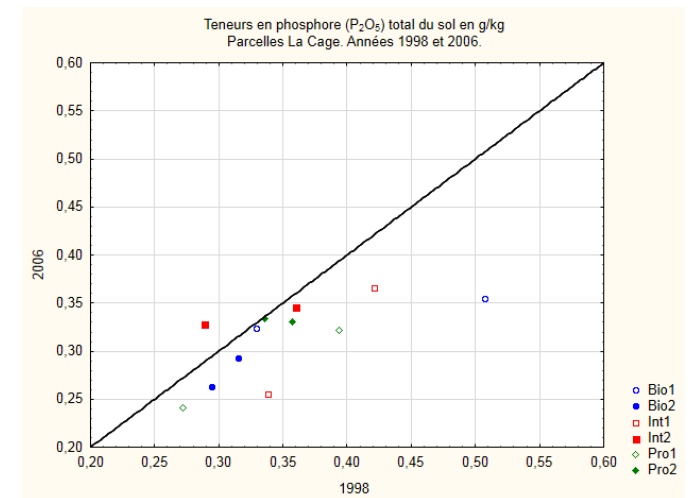
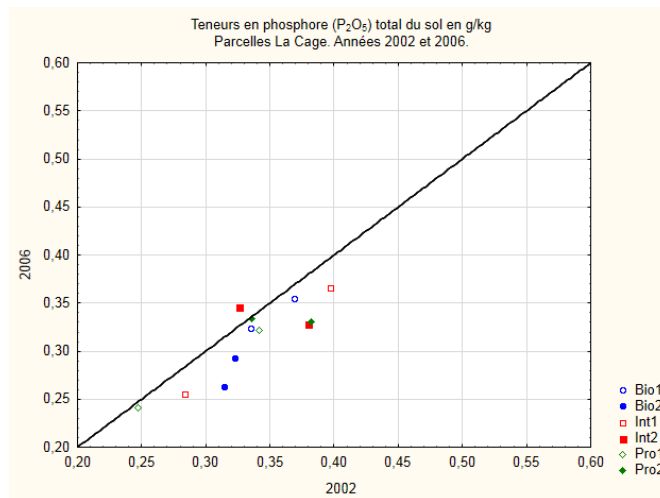
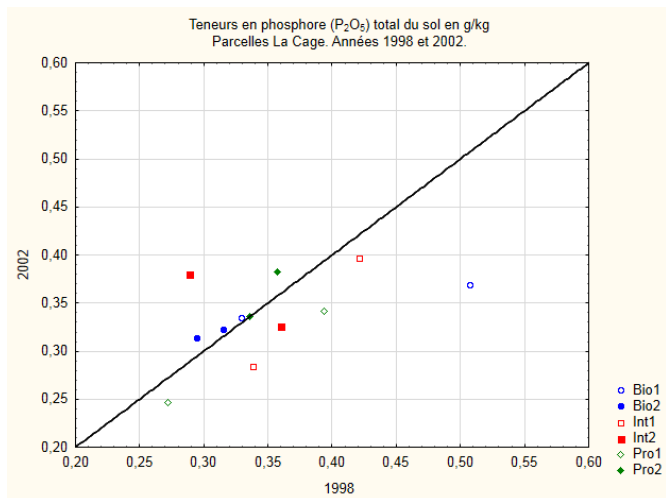
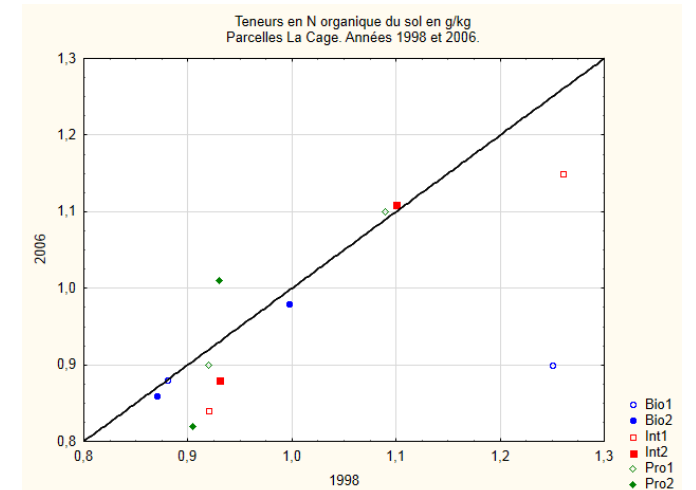
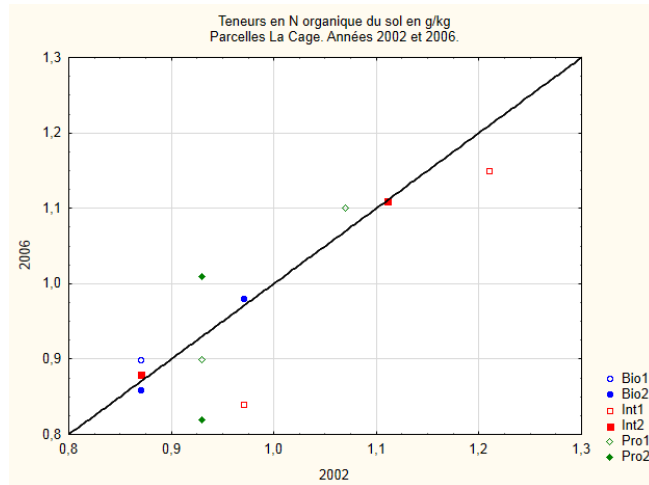
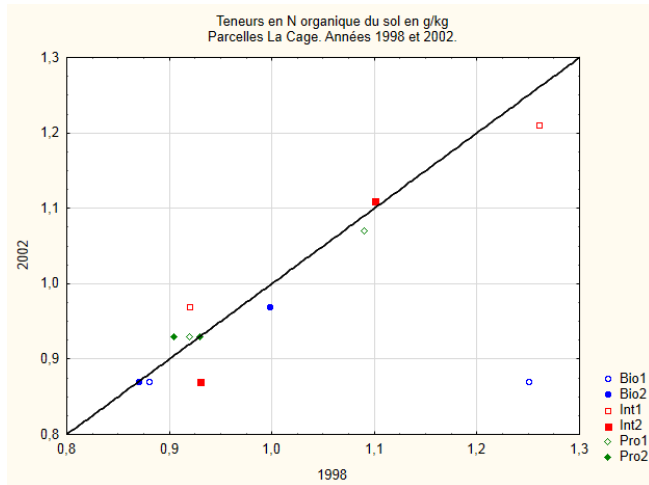
Nom de la parcelle :

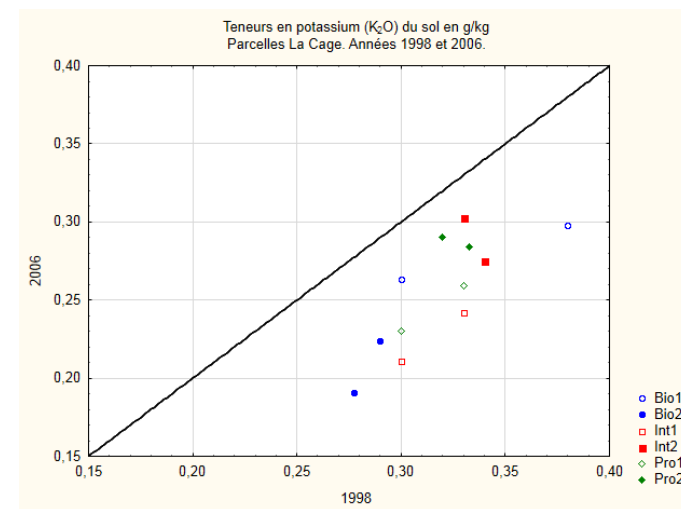
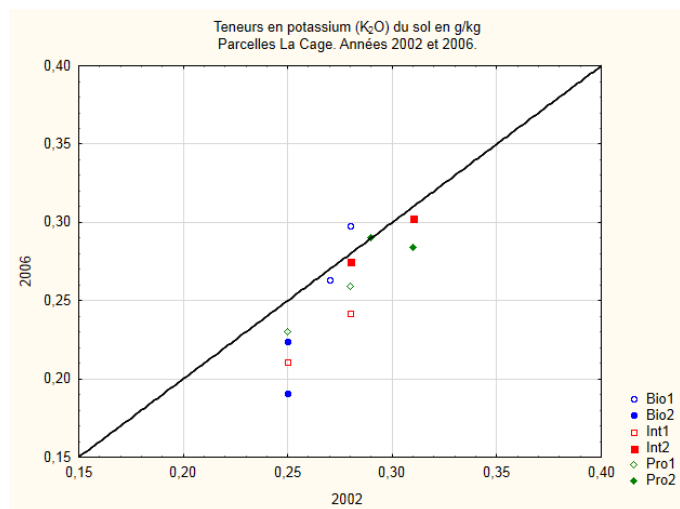
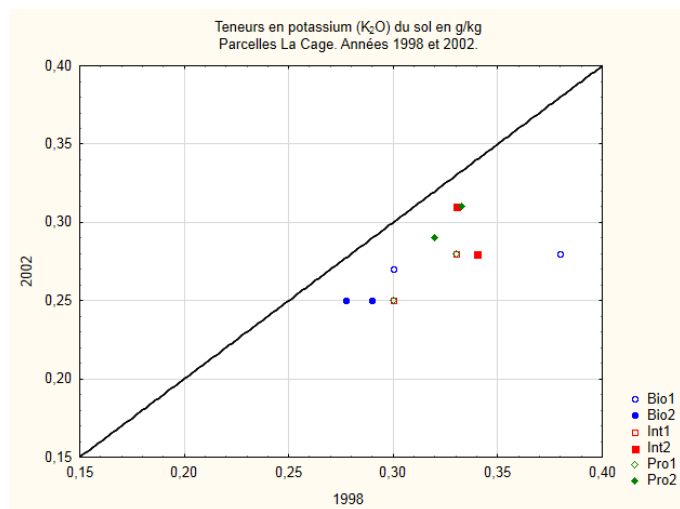
Superficie (ha) :

Année de conversion AB :

Année	Culture(s)	Rendement (unité à préciser)	Nature de l'engrais utilisé	Dose d'engrais (unité à préciser)	Devenir des résidus de culture	Légumineuses en interculture/couvert
2012						
2011						
2010						
2009						
2008						

A5. Evolution des teneurs en N organique, P total et K échangeable sur La Cage entre 1998, 2002 et 2006





A6. Tableau de calcul des balances minérales de La Cage

Année	Culture(s)	N engrais	N déposé	N fixé	N entrées	P engrais	K engrais	Rendement	N exporté	P exporté	K exporté	N Balance	P Balance	K Balance
Système de culture biologique														
Parcelle 13.1														
1998	Soja	0	12	157	169	0	0	15.9	92	22	22	77	-22	-22
1999	Blé	55	12	0	67	15	10	55.8	95	37	28	-28	-22	-19
2000	Lupin	0	12	244	256	0	0	34	151	24	36	105	-24	-36
2001	Blé	59	12	0	71	0	0	20.2	34	13	10	36	-13	-10
2002	Luzerne	0	12	407	420	0	0	10.7	100	22	80	320	-22	-80
2003	Blé	0	12	0	12	0	0	43.9	75	29	22	-62	-29	-22
2004	Blé	0	12	0	12	0	0	69.3	118	46	35	-106	-46	-35
2005	Colza	79	12	0	91	19	12	5	14	6	4	77	12	8
2006	Blé	0	12	0	12	0	0	41.4	70	27	21	-58	-27	-21
2007	Pois	0	12	105	117	0	0	23.4	75	19	28	42	-19	-28
2008	Luzerne	0	12	407	420	0	0	10.7	100	22	80	320	-22	-80
2009	Blé	0	12	0	12	0	0	69.5	118	46	35	-106	-46	-35
2010	Blé	0	12	0	12	22	82	71.3	121	47	36	-109	-26	46
2011	Orge+Pois	0	12	0	12	0	0	26.2	60	19	18	-48	-19	-18
2012	Luzerne	0	12	407	420	0	0	10.7	100	22	80	320	-22	-80
Parcelle 13.2														
1998	Blé	54	12	0	66	14	15	67.9	115	45	35	-49	-31	-20
1999	Colza	55	12	0	67	15	10	17.2	48	22	13	19	-7	-4
2000	Blé	0	12	0	12	0	0	26.6	45	18	14	-33	-18	-14
2001	Pois	0	12	145	157	0	0	32.6	104	27	39	53	-27	-39
2002	Blé	54	12	0	66	0	0	59.1	100	39	30	-34	-39	-30
2003	Luzerne	0	12	407	420	0	0	10.7	100	22	80	320	-22	-80
2004	Luzerne	0	12	407	420	0	0	10.7	100	22	80	320	-22	-80
2005	Blé	0	12	0	12	0	0	75.6	129	50	39	-116	-50	-39
2006	Colza	0	12	0	12	0	0	3	8	4	2	4	-4	-2
2007	Blé	0	12	0	12	0	0	51.4	87	34	26	-75	-34	-26
2008	Blé	0	12	0	12	0	0	34.4	58	23	18	-46	-23	-18
2009	Luzerne	0	12	407	420	0	0	10.7	100	22	80	320	-22	-80

Année	Culture(s)	N engrais	N déposé	N fixé	N entrées	P engrais	K engrais	Rendement	N exporté	P exporté	K exporté	N Balance	P Balance	K Balance
2010	Luzerne	0	12	407	420	22	82	10.7	100	22	80	320	-1	2
2011	Blé	0	12	0	12	0	0	90.4	154	60	46	-141	-60	-46
2012	Blé	0	12	0	12	0	0	56.35	96	37	29	-84	-37	-29
Parcelle 16.1														
1998	Blé	54	12	0	66	14	15	74.1	126	49	38	-60	-35	-23
1999	Colza	55	12	0	67	15	10	15.2	42	19	12	25	-4	-2
2000	Blé	0	12	0	12	0	0	25.3	43	17	13	-31	-17	-13
2001	Pois	0	12	141	153	0	0	31.6	101	26	38	52	-26	-38
2002	Blé	54	12	0	66	0	0	50.3	86	33	26	-19	-33	-26
2003	Luzerne	0	12	407	420	0	0	10.7	100	22	80	320	-22	-80
2004	Luzerne	0	12	407	420	0	0	10.7	100	22	80	320	-22	-80
2005	Blé	0	12	0	12	0	0	69.4	118	46	35	-106	-46	-35
2006	Colza	0	12	0	12	0	0	4.7	13	6	4	-1	-6	-4
2007	Blé	0	12	0	12	0	0	52.8	90	35	27	-78	-35	-27
2008	Blé	0	12	0	12	0	0	26.2	45	17	13	-32	-17	-13
2009	Luzerne	0	12	407	420	0	0	10.7	100	22	80	320	-22	-80
2010	Luzerne	0	12	407	420	22	82	10.7	100	22	80	320	-1	2
2011	Blé	0	12	0	12	0	0	85.2	145	56	43	-133	-56	-43
2012	Blé	0	12	0	12	0	0	48.7	83	32	25	-71	-32	-25
Parcelle 16.2														
1998	Soja	0	12	128	140	0	0	13.1	76	18	18	64	-18	-18
1999	Blé	55	12	0	67	15	10	56.8	97	38	29	-30	-22	-19
2000	Lupin	0	12	214	227	0	0	30	133	21	32	94	-21	-32
2001	Blé	59	12	0	71	0	0	24	41	16	12	30	-16	-12
2002	Luzerne	0	12	407	420	0	0	10.7	100	22	80	320	-22	-80
2003	Blé	0	12	0	12	0	0	53.4	91	35	27	-79	-35	-27
2004	Blé	0	12	0	12	0	0	57.8	98	38	29	-86	-38	-29
2005	Colza	79	12	0	91	19	12	3	8	4	2	83	15	10
2006	Blé	0	12	0	12	0	0	46.4	79	31	24	-67	-31	-24
2007	Pois	0	12	89	101	0	0	19.8	63	16	23	38	-16	-23
2008	Luzerne	0	12	407	420	0	0	10.7	100	22	80	320	-22	-80

Année	Culture(s)	N engrais	N déposé	N fixé	N entrées	P engrais	K engrais	Rendement	N exporté	P exporté	K exporté	N Balance	P Balance	K Balance
2009	Blé	0	12	0	12	0	0	70.4	120	47	36	-107	-47	-36
2010	Blé	0	12	0	12	22	82	63.9	109	42	33	-96	-21	50
2011	Orge P+Pois	0	12	0	12	0	0	32.2	74	23	23	-62	-23	-23
2012	Luzerne	0	12	407	420	0	0	10.7	100	22	80	320	-22	-80
Système de culture intégré														
Parcelle 14.1														
1998	Pois	0	12	317	329	44	83	72	230	59	85	99	-15	-2
1999	Blé	156	12	0	168	0	0	94.9	161	63	48	7	-63	-48
2000	Colza	174	12	0	186	0	0	27	75	34	21	111	-34	-21
2001	Blé	201	12	0	213	0	0	68.8	117	46	35	96	-46	-35
2002	Pois	0	12	240	252	22	42	54.3	174	44	64	78	-23	-23
2003	Blé	139	12	0	151	22	42	90.2	153	60	46	-2	-38	-5
2004	Colza	164	12	0	176	22	42	41.7	116	53	32	61	-31	9
2005	Blé	124	12	0	136	0	0	99.8	170	66	51	-34	-66	-51
2006	Pois	0	12	206	218	44	70	46.5	149	38	55	69	6	15
2007	Blé	124	12	0	136	0	0	85.4	145	57	44	-9	-57	-44
2008	Colza	158	12	0	170	44	83	43.5	121	55	34	49	-12	49
2009	Blé	141	12	0	153	0	0	97.1	165	64	50	-12	-64	-50
2010	Pois	0	12	308	320	0	0	69.8	223	57	83	97	-57	-83
2011	Blé	124	12	0	136	19	40	96.2	164	64	49	-27	-45	-9
2012	Colza	181	12	0	193	33	62	39.6	110	50	31	83	-18	32
Parcelle 14.2														
1998	Blé	125	12	0	137	44	83	88.6	151	59	45	-13	-15	38
1999	Colza	201	12	0	213	0	0	50.8	141	65	39	72	-65	-39
2000	Blé	198	12	0	210	33	62	76.3	130	51	39	80	-18	23
2001	Pois	0	12	120	132	0	0	26.8	86	22	32	46	-22	-32
2002	Blé	131	12	0	143	22	42	95.3	162	63	49	-19	-41	-7
2003	Colza	174	12	0	186	22	42	43.2	120	55	33	66	-33	8
2004	Blé	141	12	0	153	0	0	107.1	182	71	55	-29	-71	-55
2005	Pois	0	12	186	198	0	0	42	134	34	50	64	-34	-50
2006	Blé	111	12	0	123	22	35	87.6	149	58	45	-26	-36	-10

Année	Culture(s)	N engrais	N déposé	N fixé	N entrées	P engrais	K engrais	Rendement	N exporté	P exporté	K exporté	N Balance	P Balance	K Balance
2007	Colza	176	12	0	188	26	0	19.7	55	25	15	133	1	-15
2008	Blé	166	12	0	178	0	0	99.2	169	66	51	9	-66	-51
2009	Pois	20	12	121	153	38	80	27	86	22	32	66	16	48
2010	Blé	146	12	0	158	38	80	89.5	152	59	46	6	-21	34
2011	Colza	161	12	0	173	0	0	39.3	109	50	30	64	-50	-30
2012	Blé	141	12	0	153	0	0	76.8	131	51	39	22	-51	-39
Parcelle 19.1														
1998	Blé	125	12	0	137	44	83	99.8	170	66	51	-32	-22	32
1999	Colza	201	12	0	213	0	0	43.3	120	55	33	93	-55	-33
2000	Blé	198	12	0	210	33	62	70.6	120	47	36	90	-14	26
2001	Pois	0	12	250	263	0	0	56.7	181	46	67	81	-46	-67
2002	Blé	131	12	0	143	22	42	94	160	62	48	-17	-40	-6
2003	Colza	174	12	0	186	22	42	40.6	113	52	31	74	-30	10
2004	Blé	141	12	0	153	0	0	106.5	181	71	54	-28	-71	-54
2005	Pois	0	12	204	217	0	0	46.2	148	38	55	69	-38	-55
2006	Blé	84	12	0	96	22	35	88.7	151	59	45	-55	-37	-10
2007	Colza	176	12	0	188	26	0	24.9	69	32	19	119	-6	-19
2008	Blé	166	12	0	178	0	0	97.7	166	65	50	12	-65	-50
2009	Pois	20	12	87	119	38	80	19.3	62	16	23	57	23	57
2010	Blé	146	12	0	158	38	80	89.5	152	59	46	6	-21	34
2011	Colza	161	12	0	173	0	0	35.9	100	46	28	73	-46	-28
2012	Blé	141	12	0	153	0	0	86.6	147	57	44	6	-57	-44
Parcelle 19.2														
1998	Pois	0	12	263	275	44	83	59.6	191	49	71	85	-5	12
1999	Blé	156	12	0	168	0	0	78.9	134	52	40	34	-52	-40
2000	Colza	174	12	0	186	0	0	26.5	74	34	20	113	-34	-20
2001	Blé	201	12	0	213	0	0	99	168	66	50	45	-66	-50
2002	Pois	0	12	234	246	22	42	53	170	43	63	77	-21	-21
2003	Blé	139	12	0	151	22	42	78.2	133	52	40	18	-30	2
2004	Colza	164	12	0	176	22	42	36.3	101	46	28	76	-24	13
2005	Blé	124	12	0	136	0	0	88.6	151	59	45	-14	-59	-45

Année	Culture(s)	N engrais	N déposé	N fixé	N entrées	P engrais	K engrais	Rendement	N exporté	P exporté	K exporté	N Balance	P Balance	K Balance
2006	Pois	0	12	232	245	22	35	52.6	168	43	62	76	-21	-28
2007	Blé	124	12	0	136	0	0	80.6	137	53	41	-1	-53	-41
2008	Colza	158	12	0	170	22	42	26.1	72	33	20	98	-11	21
2009	Blé	141	12	0	153	0	0	98.5	167	65	50	-15	-65	-50
2010	Pois	0	12	234	246	0	0	53	170	43	63	77	-43	-63
2011	Blé	124	12	0	136	19	40	98.2	167	65	50	-31	-46	-10
2012	Colza	181	12	0	193	33	62	31.5	87	40	24	106	-7	38
Système de culture productif														
Parcelle 15.1														
1998	Pois	0	12	357	369	44	83	81.1	259	66	96	110	-23	-13
1999	Blé	219	12	0	232	0	0	108.8	185	72	55	47	-72	-55
2000	Colza	201	12	0	213	0	0	30.8	85	39	24	128	-39	-24
2001	Blé	250	12	0	262	0	0	118.7	202	79	61	60	-79	-61
2002	Pois	0	12	245	257	33	62	55.4	177	45	66	80	-12	-3
2003	Blé	144	12	0	156	22	42	96	163	64	49	-7	-42	-7
2004	Colza	178	12	0	190	33	62	45.7	127	58	35	63	-25	27
2005	Blé	181	12	0	193	0	0	103.4	176	69	53	17	-69	-53
2006	Pois	0	12	161	173	22	35	36.3	116	30	43	57	-8	-8
2007	Blé	208	12	0	220	0	0	76.9	131	51	39	89	-51	-39
2008	Colza	160	12	0	172	22	42	48.1	134	61	37	39	-39	4
2009	Blé	147	12	0	160	0	0	95.1	162	63	49	-2	-63	-49
2010	Pois	0	12	205	218	0	0	46.4	148	38	55	69	-38	-55
2011	Blé	191	12	0	203	19	40	105.2	179	70	54	24	-51	-14
2012	Colza	201	12	0	213	33	62	47.6	132	61	37	81	-28	25
Parcelle 15.2														
1998	Blé	157	12	0	170	0	0	104.3	177	69	53	-8	-69	-53
1999	Colza	221	12	0	233	0	0	54.6	152	70	42	82	-70	-42
2000	Blé	247	12	0	259	33	62	92	156	61	47	103	-28	15
2001	Pois	0	12	166	178	0	0	37.3	119	30	44	58	-30	-44
2002	Blé	208	12	0	220	33	62	93.7	159	62	48	61	-29	14
2003	Colza	248	12	0	260	22	42	45.5	126	58	35	134	-36	6

Année	Culture(s)	N engrais	N déposé	N fixé	N entrées	P engrais	K engrais	Rendement	N exporté	P exporté	K exporté	N Balance	P Balance	K Balance
2004	Blé	198	12	0	210	0	0	116.7	198	77	60	11	-77	-60
2005	Pois	0	12	162	174	0	0	36.4	116	30	43	57	-30	-43
2006	Blé	181	12	0	193	22	35	72.9	124	48	37	69	-26	-2
2007	Colza	176	12	0	188	26	0	36.3	101	46	28	87	-20	-28
2008	Blé	190	12	0	202	0	0	93.7	159	62	48	43	-62	-48
2009	Pois	20	12	137	169	38	80	30.7	98	25	36	71	13	43
2010	Blé	188	12	0	200	38	80	103.5	176	69	53	24	-30	27
2011	Colza	141	12	0	153	0	0	47.9	133	61	37	20	-61	-37
Parcelle 18.1														
2012	Blé	211	12	0	223	0	0	86.9	148	58	44	76	-58	-44
1998	Blé	157	12	0	170	0	0	107.8	183	71	55	-14	-71	-55
1999	Colza	221	12	0	233	0	0	50.8	141	65	39	92	-65	-39
2000	Blé	247	12	0	259	33	62	88.3	150	59	45	109	-26	17
2001	Pois	0	12	266	278	0	0	60.2	193	49	71	85	-49	-71
2002	Blé	208	12	0	220	33	62	90.1	153	60	46	67	-27	16
2003	Colza	248	12	0	260	22	42	47	130	60	36	130	-38	5
2004	Blé	198	12	0	210	0	0	116.6	198	77	59	12	-77	-59
2005	Pois	0	12	191	203	0	0	43.1	138	35	51	65	-35	-51
2006	Blé	181	12	0	193	44	70	66.8	114	44	34	80	-1	36
2007	Colza	176	12	0	188	26	0	35.8	99	46	28	89	-19	-28
2008	Blé	190	12	0	202	0	0	96.3	164	64	49	39	-64	-49
2009	Pois	20	12	192	224	38	80	43.3	139	35	51	86	3	28
2010	Blé	188	12	0	200	38	80	112	190	74	57	9	-36	23
2011	Colza	141	12	0	153	0	0	45.9	127	58	36	26	-58	-36
2012	Blé	211	12	0	223	0	0	79.7	135	53	41	88	-53	-41
Parcelle 18.2														
1998	Pois	0	12	316	328	44	83	71.7	229	59	85	99	-15	-2
1999	Blé	219	12	0	232	0	0	105.1	179	70	54	53	-70	-54
2000	Colza	201	12	0	213	0	0	31.1	86	40	24	127	-40	-24
2001	Blé	250	12	0	262	0	0	116.4	198	77	59	64	-77	-59
2002	Pois	0	12	171	183	33	62	38.6	123	32	46	60	1	16

Année	Culture(s)	N engrais	N déposé	N fixé	N entrées	P engrais	K engrais	Rendement	N exporté	P exporté	K exporté	N Balance	P Balance	K Balance
2003	Blé	228	12	0	240	22	42	97.5	166	65	50	74	-43	-8
2004	Colza	178	12	0	190	33	62	43	119	55	33	70	-22	29
2005	Blé	181	12	0	193	0	0	108.1	184	72	55	9	-72	-55
2006	Pois	0	12	178	190	44	70	40.1	128	33	48	62	11	22
2007	Blé	208	12	0	220	0	0	74	126	49	38	94	-49	-38
2008	Colza	160	12	0	172	44	83	52	144	66	40	28	-23	43
2009	Blé	147	12	0	160	0	0	96	163	64	49	-4	-64	-49
2010	Pois	0	12	238	250	0	0	53.8	172	44	64	78	-44	-64
2011	Blé	191	12	0	203	19	40	104.8	178	69	53	25	-50	-14
2012	Colza	201	12	0	213	33	62	45.4	126	58	35	87	-25	27
Système SCV														
Parcelle 12.1														
1998	Pois	0	12	288	300	44	83	65.3	209	53	77	91	-10	6
1999	Blé	156	12	0	168	0	0	95	162	63	48	6	-63	-48
2000	Maïs	191	12	0	203	0	0	50	69	26	20	134	-26	-20
2001	Blé	168	12	0	180	0	0	77.9	132	52	40	47	-52	-40
2002	Pois	0	12	150	162	22	42	27.3	87	22	32	75	0	9
2003	Blé	166	12	21	199	0	0	69.4	118	46	35	81	-46	-35
2004	Maïs	106	12	0	118	22	42	48.8	68	25	20	50	-3	22
2005	Blé	152	12	0	165	0	0	58.8	100	39	30	65	-39	-30
2006	Pois	50	12	187	249	22	35	42.1	135	34	50	114	-13	-15
2007	Blé	136	12	0	148	0	0	79.1	134	52	40	13	-52	-40
2008	Blé	254	12	0	266	0	0	59.7	101	40	30	165	-40	-30
2009	Luzerne	0	12	407	420	0	0	10.7	100	22	80	320	-22	-80
2010	Blé	159	12	0	171	38	80	62.4	106	41	32	65	-3	48
2011	Luzerne	0	12	407	420	0	0	10.7	100	22	80	320	-22	-80
2012	Avoine	0	12	0	12	0	0	32.4	54	22	17	-42	-22	-17
Parcelle 12.2														
1998	Blé	131	12	0	143	44	83	83.2	141	55	42	1	-11	41
1999	Maïs	168	12	17	197	0	0	99.6	138	51	41	59	-51	-41
2000	Blé	198	12	0	210	33	62	69.7	118	46	36	91	-13	27

Année	Culture(s)	N engrais	N déposé	N fixé	N entrées	P engrais	K engrais	Rendement	N exporté	P exporté	K exporté	N Balance	P Balance	K Balance
2001	Pois	0	12	219	231	0	0	43.9	140	36	52	91	-36	-52
2002	Blé	141	12	0	153	22	42	87	148	58	44	5	-36	-3
2003	Maïs	150	12	0	162	0	50	52	72	27	21	90	-27	29
2004	Blé	146	12	0	158	0	0	90	153	60	46	5	-60	-46
2005	Pois	0	12	114	126	0	0	25.5	82	21	30	45	-21	-30
2006	Blé	151	12	0	163	22	35	70	119	46	36	44	-25	-1
2007	Blé	157	12	0	170	0	0	83.2	141	55	42	28	-55	-42
2008	Blé	254	12	0	266	0	0	81.2	138	54	41	128	-54	-41
2009	Luzerne	0	12	407	420	0	0	10.7	100	22	80	320	-22	-80
2010	Blé	159	12	0	171	38	80	66	112	44	34	59	-5	46
2011	Luzerne	0	12	407	420	38	80	10.7	100	22	80	320	16	-1
2012	Luzerne	0	12	407	420	0	0	10.7	100	22	80	320	-22	-80
Parcelle 17.1														
1998	Blé	131	12	0	143	44	83	86.4	147	57	44	-4	-14	39
1999	Maïs	168	12	17	197	0	0	95.5	133	49	39	64	-49	-39
2000	Blé	198	12	0	210	33	62	65.3	111	43	33	99	-11	29
2001	Pois	0	12	191	203	0	0	37.6	120	31	45	83	-31	-45
2002	Blé	141	12	0	153	22	42	80.2	136	53	41	17	-31	1
2003	Maïs	150	12	0	162	0	25	50	69	26	20	93	-26	5
2004	Blé	146	12	0	158	0	0	73.9	126	49	38	32	-49	-38
2005	Pois	0	12	105	117	0	0	23.5	75	19	28	42	-19	-28
2006	Blé	151	12	0	163	22	35	65	111	43	33	52	-21	2
2007	Blé	157	12	0	170	0	0	72.5	123	48	37	46	-48	-37
2008	Blé	254	12	0	266	0	0	59.6	101	40	30	165	-40	-30
2009	Luzerne	0	12	407	420	0	0	10.7	100	22	80	320	-22	-80
2010	Blé	159	12	0	171	38	80	54.1	92	36	28	79	3	52
2011	Luzerne	0	12	407	420	38	80	10.7	100	22	80	320	16	-1
2012	Luzerne	0	12	407	420	0	0	10.7	100	22	80	320	-22	-80
Parcelle 17.2														
1998	Pois	0	12	312	324	44	83	70.8	227	58	84	98	-14	-1
1999	Blé	156	12	0	168	0	0	93.2	158	62	48	10	-62	-48

Année	Culture(s)	N engrais	N déposé	N fixé	N entrées	P engrais	K engrais	Rendement	N exporté	P exporté	K exporté	N Balance	P Balance	K Balance
2000	Maïs	191	12	0	203	0	0	50	69	26	20	134	-26	-20
2001	Blé	168	12	0	180	0	0	73.6	125	49	38	55	-49	-38
2002	Pois	0	12	138	151	22	42	24.7	79	20	29	71	2	12
2003	Blé	166	12	21	199	0	0	75.7	129	50	39	70	-50	-39
2004	Maïs	106	12	0	118	22	42	42.1	59	21	17	59	0	24
2005	Blé	152	12	0	165	0	0	56	95	37	29	69	-37	-29
2006	Pois	50	12	186	248	22	35	41.9	134	34	50	114	-12	-15
2007	Blé	136	12	0	148	0	0	78.9	134	52	40	14	-52	-40
2008	Blé	254	12	0	266	0	0	60.3	103	40	31	164	-40	-31
2009	Luzerne	0	12	407	420	0	0	10.7	100	22	80	320	-22	-80
2010	Blé	159	12	0	171	38	80	54	92	36	28	80	3	52
2011	Luzerne	0	12	407	420	0	0	10.7	100	22	80	320	-22	-80
2012	Avoine	0	12	0	12	0	0	20.4	34	14	10	-22	-14	-10

A7. Tableau de calcul des balances minérales annuelles à l'échelle de l'exploitation agricole

Exploitation agricole		EA1		EA2		EA3		EA4	
Années renseignées		2010	2011	2011	2012	2011	2012	2011	2012
Entrées d'azote	Apport par les engrais (chimiques inclus)	85	76	57	7	12	34	26	5
	Apport par fixation atmosphérique de N ₂	22	79	64	82	25	53	49	71
	Apport par l'alimentation animale	0	0	4	0	2	2	4	4
	Apport par les animaux	0	0	0	0	1	1	0	0
	Déposition atmosphérique d'azote	13	13	13	13	13	13	13	13
Sorties d'azote	Exportation par les cultures	91	74	57	35	41	50	58	44
	Exportation par les produits animaux	0	0	10	10	11	11	0	0
	Exportation par les animaux	0	0	2	2	2	2	2	1
Balances azotées		29	94	68	54	-1	41	31	48
<i>Moyenne en kg.ha⁻¹.an⁻¹</i>			61		61		20		39
Entrées de phosphore	Apport par les engrais (chimiques inclus)	8	13	7	3	2	7	1	1
	Apport par l'alimentation animale	0	0	1	0	1	1	1	1
	Apport par les animaux	0	0	0	0	0	0	0	0
Sorties de phosphore	Exportation par les cultures	27	23	21	11	12	15	18	12
	Exportation par les produits animaux	0	0	2	2	1	1	0	0
	Exportation par les animaux	0	0	1	1	0	0	1	0
Balances en phosphore		-19	-10	-16	-10	-11	-8	-18	-11
<i>Moyenne en kg.ha⁻¹.an⁻¹</i>			-14		-13		-10		-14
Entrées de potassium	Apport par les engrais (chimiques inclus)	54	58	14	9	20	53	5	6
	Apport par l'alimentation animale	0	0	5	0	1	1	2	2
	Apport par les animaux	0	0	0	0	0	0	0	0
Sorties de potassium	Exportation par les cultures	23	20	26	19	17	27	18	17
	Exportation par les produits animaux	0	0	3	3	1	1	0	0
	Exportation par les animaux	0	0	0	0	0	0	0	0
Balances en potassium		30	38	-10	-13	3	26	-11	-9
<i>Moyenne en kg.ha⁻¹.an⁻¹</i>			34		-12		15		-10

A8. Tableau de calcul des balances minérales annuelles à la parcelle en réseau de fermes

Exploitation	EA1		EA2		EA3		EA4	
Parcelle	P1/EA1	P2/EA1	P1/EA2	P2/EA2	P1/EA3	P2/EA3	P1/EA4	P2/EA4
Surface cultivée (ha)	11.8	4.2	1.63	5.15	8	4	11.1	6.4
Azote								
Entrées	<i>kg/ha/an</i>	<i>kg/ha/an</i>	<i>kg/ha/an</i>	<i>kg/ha/an</i>	<i>kg/ha/an</i>	<i>kg/ha/an</i>	<i>kg/ha/an</i>	<i>kg/ha/an</i>
Apport par les engrais organiques	27	10	44	58	31	77	1	44
Apport par fixation atmosphérique de N2	19	208	86	161	20	11	169	47
Déposition atmosphérique de NH3	13	13	13	13	13	13	13	13
Sorties								
Exportation par les cultures	68	191	113	193	61	95	133	94
Balances azotées	-10	40	29	39	3	6	49	9
Phosphore								
Entrées	<i>kg/ha/an</i>	<i>kg/ha/an</i>	<i>kg/ha/an</i>	<i>kg/ha/an</i>	<i>kg/ha/an</i>	<i>kg/ha/an</i>	<i>kg/ha/an</i>	<i>kg/ha/an</i>
Apport par les engrais organiques	3	2	19	12	11	25	0	14
Sorties								
Exportation par les cultures	22	46	24	45	20	24	49	25
Balances en phosphore	-19	-44	-6	-33	-9	1	-49	-10
Potassium								
Entrées	<i>kg/ha/an</i>	<i>kg/ha/an</i>	<i>kg/ha/an</i>	<i>kg/ha/an</i>	<i>kg/ha/an</i>	<i>kg/ha/an</i>	<i>kg/ha/an</i>	<i>kg/ha/an</i>
Apport par les engrais organiques	46	18	52	64	30	76	0	54
Sorties								
Exportation par les cultures	57	127	44	142	23	88	135	37
Balances en potassium	-10	-109	8	-78	7	-12	-135	17

Résumé

La balance minérale, définie comme étant le solde entre les flux entrants et sortants à la surface du sol d'une parcelle donnée ou à la porte de l'exploitation agricole, reste avant tout un indicateur et non une estimation d'impact. La durabilité et les impacts environnementaux de systèmes de culture biologique sont sujets à débat. Comme une première approche de la quantification des impacts environnementaux, liés aux flux des éléments azote, phosphore et potassium, en système de culture biologique, la méthode des balances minérales a été appliquée à deux cas d'étude différents. Pour l'azote, sa valeur exprime simplement la quantité potentielle de pertes vers le milieu, sans en préciser le devenir. Pour le phosphore et le potassium, le solde minéral indique globalement l'état d'enrichissement ou d'appauvrissement du sol ou de l'exploitation considéré. Sur les parcelles expérimentales de l'essai de longue durée de « La Cage », la gamme de valeurs des balances minérales, moyennées sur quinze ans, varient de +36 à +115 kg.ha⁻¹.an⁻¹ pour l'azote, de -43 à +23 kg.ha⁻¹.an⁻¹ pour le phosphore, et de -34 à +12 kg.ha⁻¹.an⁻¹ pour le potassium. En exploitation agricole biologique de la région Picardie, les balances moyennes sur deux ans s'étendent de +20 à +61 kg.ha⁻¹.an⁻¹ pour l'azote, et de respectivement -10 à -15 kg.ha⁻¹.an⁻¹ et -12 à +34 kg.ha⁻¹.an⁻¹ pour les éléments phosphore et potassium. L'influence du système de culture sur les balances minérales est vérifiée. Cependant il est difficile de statuer en faveur d'une amélioration systématique (diminution des surplus d'azote et des déficits de phosphore et potassium) des résultats obtenus en système de culture biologique. La culture de luzerne (*Medicago sativa*), légumineuse fourragère fréquemment introduite en « bio » pour gérer les adventices et assurer l'autonomie azotée, contribue à elle seule à renverser les tendances. Les balances en azote et potassium sont en effet déterminées principalement par les flux entrants en élément, tandis que le solde en phosphore est lié aux flux sortants.

Mots-clés : azote, balances minérales, phosphore, potassium, système de culture biologique

Abstract

Nutrient balance, defined as the difference between incoming and outgoing flows at field or farm scale, is not meant to be an impact assessment tool. Its value indicates the enrichment or depletion status of a given plot or farm, thus expresses the potential nutrient losses to the environment without specifying their fate. Nutrient budget method was carried out on two different case studies of organic farming systems. On the long-term "La Cage" experiment, nutrient balances averaged over fifteen years ranged from +36 to +115 kg.ha⁻¹.year⁻¹ for nitrogen, from -43 to +23 kg.ha⁻¹.year⁻¹ for phosphorus, and from -34 to +12 kg.ha⁻¹.year⁻¹ for potassium. On the sampled Picardy organic farms, farm-gate balances averaged over two years respectively ranged from +20 to +61 kg N.ha⁻¹.year⁻¹, from -10 to -15 kg P.ha⁻¹.year⁻¹ and from -12 to +34 kg K.ha⁻¹.year⁻¹. Although the effect of cropping systems on nutrient balances was significant, we could not assert that organic farming systems systematically generate either the least nitrogen surpluses or the least phosphorus and/or potassium deficits. Alfalfa (*Medicago sativa*), a forage legume frequently used to manage weeds and ensure nitrogen autonomy in organic agriculture, is able to solely reverse the trends. Nitrogen and potassium balances are indeed determined mainly by nutrient inflows, while the phosphorus balance is linked to the outflows.

Key words: cropping systems, nitrogen, nutrient budget, organic farming, phosphorus, potassium.