



HAL
open science

Caractérisation et évaluation des pratiques d'entretien de la fertilité phosphorique des sols de grandes cultures en agriculture biologique

Maxime Toublant

► **To cite this version:**

Maxime Toublant. Caractérisation et évaluation des pratiques d'entretien de la fertilité phosphorique des sols de grandes cultures en agriculture biologique. Sciences du Vivant [q-bio]. 2009. hal-02821177

HAL Id: hal-02821177

<https://hal.inrae.fr/hal-02821177>

Submitted on 6 Jun 2020

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

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



AGROCAMPUS OUEST

65 rue de Saint Briec
CS 84215
35042 Rennes Cedex
Tél : 02 23 48 55 00

UMR 1220 INRA – ENITAB Transfert sol-plante et Cycle des Eléments Minéraux dans les écosystèmes cultivés (TCEM)

Domaine de la Grande Ferrade
71, Avenue Edouard Bourlaux
BP81
33883 Villenave d'Ornon
Tel : 05 57 12 25 25

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

DIPLOME D'INGENIEUR AGRONOME D'AGROCAMPUS OUEST

Spécialité : **Sciences des Productions Végétales**
Option : **Ingénierie des Agrosystèmes**

CARACTERISATION ET EVALUATION DES PRATIQUES D'ENTRETIEN DE LA FERTILITE PHOSPHORIQUE DES SOLS DE GRANDES CULTURES EN AGRICULTURE BIOLOGIQUE

Par : M. TOUBLANT Maxime

*Devant le Jury : M. LETERME, M. POULAIN, M. BELAN,
M. AUROUSSEAU ET M. NESME.*

Sous la présidence de LETERME Philippe

Maître de stage : NESME Thomas

Enseignant responsable : BISSUEL Christine

Tuteur scientifique : MENASSERI Safya

Soutenu le 16 Septembre 2009

"Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST".

Avec le soutien d'AgroBio Périgord – 20, rue du Vélodrome – 24640 Périgueux. Tel 05 53 35 88 18

Diffusion du mémoire

A remplir par l'auteur avec le maître de stage.

Aucune confidentialité ne sera prise en compte si la durée n'en est pas précisée.

Préciser les limites de la confidentialité ⁽¹⁾ :

Mémoire de fin d'études

Consultable sur place : oui non

Reproduction autorisée : oui non

Prêt autorisé : oui non

Confidentialité absolue : oui non
(ni consultation, ni prêt)

Si oui 1 an 5 ans 10 ans

Diffusion de la version numérique : oui non

Fiche de résumé du mémoire de fin d'études :

Résumé diffusable : oui non

Si oui, l'auteur complète l'autorisation suivante :

Je soussigné(e) _____, propriétaire des droits de reproduction dudit résumé, autorise toutes les sources bibliographiques à le signaler et le publier.

Date :

Signature :

Rennes, le

Le Maître de stage⁽²⁾,

L'auteur,

L'Enseignant responsable⁽²⁾,

(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation du Pôle Agronomique de Rennes s'engagent à respecter cette confidentialité.

(2) Signature et cachet de l'organisme.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu M. Thomas Nesme de m'avoir encadré durant mon stage de fin d'étude, ainsi que toute l'unité TCEM pour son accueil et son aide, notamment M. Pellerin, M. Morel, M. Denoroy, M. Mollier et Mme Gonzales avec qui nous avons interagi au cours de ce travail.

Un grand merci tout particulièrement aux agriculteurs qui ont pris le temps de me recevoir et de participer à l'étude, ainsi qu'à l'association de développement de l'agriculture biologique en Périgord (AgroBio Périgord) pour son accueil et son aide.

SOMMAIRE

1. Introduction	1
1.1. Contexte	1
1.2. L'Agriculture Biologique	1
1.3. Introduction de la problématique	3
1.4. L'élément Phosphore	4
1.5. Le Phosphore dans les sols	6
1.6. Les stratégies des plantes pour augmenter leurs prélèvements de Phosphore	8
1.7. L'augmentation de la disponibilité en Phosphore par les pratiques agricoles	9
1.8. Les solutions en Agriculture Biologique pour augmenter la disponibilité du Phosphore	9
1.9. Evaluation des pratiques agricoles	10
1.10. Problématique	12
2. Matériels et Méthodes	14
2.1. Méthode d'enquête	14
2.2. La zone d'étude	16
2.3. Mise en œuvre des bilans entrées/sorties	18
2.4. Mesure de la biodisponibilité du P dans les sols	19
2.5. Analyse de la dynamique du P au sein des exploitations vues comme des écosystèmes	20
2.6. Traitements du jeu de données	21
3. Résultats	22
3.1. Les pratiques de fertilisation Phosphorique	22
3.2. Les bilans entrées/sorties de P à l'exploitation agricole	28
3.3. Analyse de la dynamique du P au sein des exploitations vues comme des écosystèmes	33
3.4. Les bilans entrées/sorties de P à la parcelle agricole	34
4. Discussion	42
4.1. Critique du travail réalisé	42
4.2. Retour sur les hypothèses de l'étude	44
4.3. Retour critique sur les résultats	45
4.4. Perspectives du travail réalisé	47
5. Conclusion	48

LISTE DES ANNEXES

Annexe I : Les matières fertilisantes et amendements autorisés en agriculture biologique

Annexe II : Cartographie des agriculteurs enquêtés dans le département de la Dordogne et du Lot-et-Garonne

Annexe III : Questionnaire d'enquête

Annexe IV : Carte géologique du département de la Dordogne

Annexe V : Carte pédologique du département de la Dordogne

Annexe VI : Composition des différentes sources de phosphore utilisées

Annexe VII : Sources des compositions phosphatées des différentes matières

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Cycle et dynamique du Phosphore dans le sol.....	7
Figure 2 : Distribution des exploitations en fonction de leur antériorité en agriculture biologique.....	15
Figure 3 : Carte du département de la Dordogne	16
Figure 4 : Evolution du nombre d'exploitations agrobiologiques et des surfaces cultivées en agriculture biologique depuis le début des années 2000 en Dordogne.	17
Figure 5 : Schémas de fonctionnement types des exploitations avec ou sans élevage et exemples de calcul de connectance pour chacun des types d'exploitations.....	21
Figure 6 : Surfaces cultivées par principaux types de productions à partir des assolements 2008 des exploitations étudiées.....	22
Figure 7 : Quantités moyennes de Phosphore apportées (en kgP/ha/an) en fonction du type de cultures.	26
Figure 8: Bilan moyen de Phosphore pour chaque exploitation agricole étudiée.....	28
Figure 9 : Distribution des bilans de Phosphore moyens sur 3 ans à l'échelle de l'exploitation agricole.....	29
Figure 10: Relation entre le bilan de P et les importations de MO à l'échelle de l'exploitation	29
Figure 11 : Détail des quantités moyennes de P entrant dans les exploitations.	30
Figure 12 : Relation entre les bilans moyens de P et les sorties moyennes de P du système...	30
Figure 13 : Détail des quantités moyennes de Phosphore sortant des exploitations.....	31
Figure 14: Distribution des bilans de Phosphore moyens sur 3 ans à l'échelle de l'exploitation agricole pour les situations en présence ou non d'élevage.	32
Figure 15 : Classification des exploitations selon leurs orientations de production.	32
Figure 16 : Relation entre les valeurs de connectance des exploitations et leur efficacité d'utilisation du P.....	33
Figure 17 : Projection sur les plans 1 et 2 de l'ACP entre les variables caractérisant la connectance des exploitations (connectance, nombre de nœuds) et la dynamique du P (entrées moyennes, sorties moyennes, bilan moyen, cumul de bilan, efficacité du P sur 3 ans par ha).	34
Figure 18 : Représentation des bilans moyens de P des parcelles agricoles en kg P/ha/an.	35

Figure 19 : Distribution des bilans moyens de P calculés à la parcelle.....	35
Figure 20 : Relations entre les bilans moyens à la parcelle et les entrées de P ou les entrées de MO seules.....	36
Figure 21 : Distributions comparées des bilans moyens des parcelles suivant le type d'exploitation agricole.	37
Figure 22 : Relation entre les bilans moyens de P à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation.	37
Figure 23 : Distribution des disponibilités en P (en mg P/ kg de sol sec à 105°C) dans les sols des parcelles étudiées.	39
Figure 24 : Relations entre la biodisponibilité du Phosphore (méthode d'extraction Olsen) et les antécédents des parcelles en sols argilo calcaires: relation entre la biodisponibilité du P et les bilans moyens entrées/sorties sur la période d'étude, les quantités de P accumulées sur la période d'étude et l'antériorité des parcelles en AB.	40

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Description des exploitations enquêtées par leur orientation de production.....	15
Tableau 2 : Détail théorique des facteurs entrant dans les calculs des bilans de Phosphore pour les deux échelles spatiales étudiées.....	18
Tableau 3 : Types de MO utilisés en nombre d'exploitations par type d'exploitation.	23
Tableau 4 : Fréquences d'utilisation des différents types de MO par les agriculteurs enquêtés.	23
Tableau 5 : Importations moyennes de P (et <i>écart-types</i>) par type d'exploitation.	24
Tableau 6 : Nombres d'exploitations agricoles par tranches de bilans avec ou sans élevage. .	31
Tableau 7 : Caractérisation de la complexité et de l'efficacité d'utilisation du P par type d'exploitation agricole.	33

LISTE DES ABREVIATIONS

AB : Agriculture Biologique

ADAP : Association de Développement de l'Agriculture biologique en Périgord

BRDA-Hérody : Bureau de Recherche et de Développement Agricole de M. Yves Hérody

CTE : Contrat Territorial d'Exploitation

ETP : EvapoTranspiration Potentielle

HV : Humus Vrai

K : Potassium

MO : Matière Organique

MOF : Matière Organique Fugitive

MTO : Matière organique Totale Oxydable

MS : Matière Sèche

M : Molaire

N : Azote

OGM : Organisme Génétiquement Modifié

P : Phosphore

SAU : Surface Agricole Utile

UGB : Unité Gros Bovin

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte

L'agriculture est à un nouveau tournant de son histoire. La première Révolution Verte, à la sortie de la Seconde Guerre Mondiale, a permis à l'Europe d'atteindre la souveraineté alimentaire. Cependant cette prouesse agronomique s'est faite au dépend des facteurs environnementaux et sociaux. Les rendements se sont vus augmentés, le niveau de vie des agriculteurs amélioré et la pénibilité du travail considérablement diminuée. En contre partie, les exploitations agricoles sont de moins en moins à dimension humaine, les campagnes souffrent de l'exode, les problèmes de nuisances environnementales sont courants et l'image de la profession agricole a mauvaise presse.

La démographie mondiale est en plein essor. Les estimations fluctuent entre 9 et 12 milliards d'êtres humains à l'horizon 2050. 9 à 12 milliards d'êtres humains à qui notre planète devra fournir une alimentation suffisante, saine et respectueuse de l'environnement, tout en faisant face aux contraintes du réchauffement climatique, d'une probable crise de l'énergie et des inégalités d'accès à l'eau et aux progrès techniques.

La question de ou des Agricultures de demain se pose donc d'elle-même. Il faudra trouver des solutions pour relever tous ces défis à la fois, des solutions durables.

Les limites de l'agriculture productiviste, telle qu'elle est connue en France par exemple, sont désormais visibles. Parmi les différentes voies qui s'offrent à nous, comme l'agriculture durable, l'agriculture raisonnée, ou encore l'agriculture de précision pour ne pas toutes les citer, nous allons nous attacher dans cette étude à l'Agriculture Biologique (AB), en cherchant à évaluer sa durabilité, ici au regard du recyclage des éléments minéraux.

1.2. L'Agriculture Biologique

1.2.1. Présentation

A l'échelle mondiale, seulement 26 millions d'hectares (ha) sur les 3.2 milliards de terres arables sont cultivés en AB. L'Europe comptabilise environ 24% de cette surface, avec bien sûr une grande variabilité entre pays. A titre d'exemple, la France est le 5^{ème} pays de l'Union Européenne en terme de surface cultivée en AB, soit environ 556 550 ha. Mais avec seulement 2% de sa surface agricole utile (SAU), elle se voit rétrogradée au 21^{ème} rang européen, loin derrière les 13% de l'Autriche (Agence Bio ; FAO).

Si en France l'AB est reconnue depuis le début des années 80 avec la Loi d'Orientation Agricole du 4 Juillet 1980, les premiers règlements au niveau européen ne sont apparus que dans les années 90 (Règlement n°2092/91 entré en vigueur en 1992 ; Règlement n°1804/99).

La définition de l'Agriculture Biologique qui est donnée par différentes sources, ainsi que par la plupart des gens à qui on pose simplement la question, est trop souvent réduite à un concept de mode de production exempt de produits chimiques de synthèse et d'organismes génétiquement modifiés (OGM).

Certes, l'agriculture biologique se démarque de ses consœurs en partie par ce point, purement technique. Elle se distingue aussi des autres modes de production, non seulement par sa composante environnementale et agronomique, mais aussi d'un point de vue social, grâce à l'image positive qu'elle véhicule et son rapprochement avec les consommateurs, ou encore économique par l'intermédiaire de la création d'emplois et de valeur ajoutée (transformation) (Hansen et al., 2001 ; Lamine et Bellon, 2009).

1.2.2. Les principes à l'origine de l'Agriculture Biologique

Les fondements de l'AB reposent sur des principes agroécologiques énoncés pendant la première moitié du XX^{ème} siècle par ses pères fondateurs, dont les plus connus sont Rudolph Steiner (1861-1925) et Albert Howard (1873-1947).

Ils privilégient une approche globale et à long terme des systèmes agricoles, dans l'optique de s'insérer et de se rapprocher au plus des milieux naturels, par le respect des équilibres et la compréhension du fonctionnement des milieux gérés en terme de régulations écologiques, tout en prônant l'autonomie maximale des exploitations agricoles vis-à-vis de l'extérieur.

Cette approche globale passe par la remise du système "sol" au centre des préoccupations agronomiques. C'est pourquoi, dans l'idéal, en AB « on gère de la matière organique afin de nourrir le sol, qui en retour nourrira la plante ».

Dans ce mode de production on adapte les productions aux milieux, et non l'inverse. L'emploi de pratiques plus respectueuses vis-à-vis de l'environnement et des ressources naturelles (eau, sol, air et biodiversité), intégré dans une gestion paysagère, permet aux agrobiologistes de bénéficier au mieux des services écologiques des écosystèmes (régulation des parasites, recyclage des éléments, fonctionnement des sols, gestion des adventices, pollinisation, etc.) (Hansen et al., 2001 ; Nelson et Janke, 2007 ; Sandhu et al., 2008).

Toujours dans cette logique globale, c'est le principe de prévention qui est appliqué, quand un problème survient en AB, c'est à sa racine que l'on s'attaque. En protection des cultures contre les parasites par exemple, ce principe se traduira par la mise en place de rotations culturales longues et diversifiées, par la gestion paysagère (favoriser les auxiliaires des cultures), par le travail du sol, mais aussi par des périodes et densités de semis adaptées, par la gestion des résidus et de la fertilisation (cette liste ne se veut pas exhaustive).

Cependant, si les principes de l'AB sont séduisants, ils ne sont pas toujours tous mis en pratique, ce qui contribue à sa grande diversité.

1.2.3. Evaluation environnementale de l'Agriculture Biologique

Parmi la littérature scientifique, les études relatives à la durabilité environnementale de l'AB sont nombreuses. En effet, plusieurs d'entre elles montrent que ce mode de production permet en général d'augmenter les taux de matières organiques (MO) des sols, contribuant ainsi à leur préservation par un meilleur état structural (Hansen et al., 2001 ; Nelson et Janke, 2007). Ceci s'explique sous l'effet des pratiques agricoles (engrais de ferme, amendements organiques, engrais verts, gestion des résidus, etc.) et de la présence d'espèces pérennes dans la rotation (prairies, vergers). Cet enrichissement en MO a pour conséquence directe de stimuler l'activité

du sol, et d'améliorer la fonction de recyclage des éléments (Hansen et al., 2001 ; Martin et al., 2007 ; Nelson et Janke, 2007 ; Pellerin et al., 2006a).

L'AB permet aussi de lutter contre l'érosion de la biodiversité en milieux cultivés en n'employant pas de produits biocides chimiques de synthèse. Ce qui permet ainsi de préserver les ressources naturelles et de produire une alimentation de qualité aux yeux du consommateur, même si les rendements sont en général inférieurs par rapport aux autres modes de productions.

Elle contribue aussi à la lutte contre le réchauffement climatique en n'employant pas de produits issus de l'agrochimie (engrais minéraux, produits phytosanitaires), ainsi qu'en accumulant le carbone dans les sols sous forme de MO (Hansen et al., 2001).

Cependant, si l'AB est considérée comme une forme d'agriculture durable, elle peut tout de même être source de pollutions dans certaines situations (élevage de porcs en plein air, mauvaise gestion des effluents d'élevage, etc.) (Hansen et al., 2001).

1.2.4. Les trajectoires d'évolution de l'agriculture biologique

Du fait de la grande diversité de l'AB, sa dynamique d'évolution est très complexe à cerner. Elle nécessite une approche pluridisciplinaire, combinant sciences agronomiques, écologiques, sociales et économiques (Capitaine et al., 2009 ; Lamine et Bellon, 2009,; Lichtfouse et al., 2008).

Plusieurs dynamiques d'évolution ont été caractérisées (Lamine et Bellon, 2009). La première est qualifiée d'*écologisation de l'agriculture*, où les agriculteurs repensent leur système de production, pour élever l'AB à un niveau supérieur. La seconde est définie par le terme de *modernisation écologique*, qui est caractérisée par une substitution de moyens. Souvent dans cette seconde stratégie, les exploitations se spécialisent, tout comme en agriculture conventionnelle. Ce phénomène est appelé *conventionnalisation* de l'AB. Cela correspond à ce que les auteurs qualifient de *réversion*, ou encore de *déconversion*.

Ce phénomène de conventionnalisation augmente la dépendance des exploitations agricoles vis-à-vis de l'extérieur, ce qui est en inadéquation avec le principe d'autonomie cité précédemment. Les exploitations qui se spécialisent en grandes cultures dépendent de l'extérieur pour les matériaux nécessaires à l'entretien de la fertilité de leurs sols, et dans le cas des élevages spécialisés cette dépendance se ressentira au niveau de l'alimentation des animaux.

1.3. Introduction de la problématique

Les effets combinés de la recherche d'autonomie vis-à-vis de l'extérieur et de la spécialisation, par le biais de la conventionnalisation, peuvent engendrer des problèmes de durabilité à long terme des exploitations. C'est le cas notamment en matière d'éléments minéraux et d'entretien de la fertilité des sols.

C'est sur ces questions d'entretien de la fertilité des sols que nous avons concentré notre démarche, avec un regard exclusivement porté sur l'élément Phosphore (P). Contrairement à

l'azote (N), le P est un élément très peu mobile dans les sols, il ne peut entrer dans les exploitations que sous forme d'intrants. En AB les fertilisants phosphatés sont moins efficaces que ceux autorisés en agriculture conventionnelle (exemple des phosphates naturels), ou à des prix dissuasifs et coûteux énergétiquement (fertilisants organiques du commerce). Les engrais de fermes restent alors une des solutions les plus adoptées par les agrobiologistes, ce qui pose un problème potentiel en absence d'élevage dans les exploitations en termes d'approvisionnement de P et de durabilité de la production à long terme.

D'un autre côté, le danger de l'emploi de certains engrais de ferme et autres fertilisants organiques, à des fins de satisfaction de besoins de la culture en N, conduit souvent à des apports importants et non maîtrisés, ou subits, de P (Nelson et Janke, 2007). Il en résulte alors une accumulation dans les sols, augmentant potentiellement le risque de fuites de P vers les milieux naturels (Bennett et al., 2001 ; Ehlert et al., 2003 ; Fangueiro et al., 2008 ; Gourley et al., 2007 ; Sharpley, 1995).

Les questions relatives à la durabilité des pratiques d'entretien de la fertilité des sols méritent d'être posées, d'autant plus que les perspectives d'évolution pour l'AB sont très ambitieuses (6% des surfaces pour 2012 en France, soit un facteur 3) et que les enjeux futurs à relever sont de taille (nourrir la planète de manière durable).

1.4. L'élément Phosphore

1.4.1. Le Phosphore : facteur de production

Le P joue un rôle majeur dans le fonctionnement physiologique des végétaux. En effet, il rentre dans la composition de plusieurs types de molécules organiques comme les nucléotides, les acides nucléiques ainsi que les membranes plasmiques (Djodjic et al., 2005 ; Morel, 2002; Nelson et Janke, 2007). Il est donc d'une très grande importance de conserver dans les sols des teneurs en P compatibles avec des enjeux de production agricole durable.

Une carence en P, qui se traduit par une disponibilité trop faible dans les sols, entraîne une perte de rendement significative de la production (Pellerin et al., 2006b) par le biais d'une diminution de l'apparition et de l'expansion des organes végétaux (Assuero et al., 2004 ; Chiera et al., 2002 ; Mollier et Pellerin, 1999).

Les exportations moyennes d'une culture sont de 30 kilogrammes de P par hectare et par an (kg/ha/an) (Morel, 2002). Cependant elles n'ont pas toutes les mêmes besoins. Certaines seront plus sensibles à une baisse de disponibilité de P que d'autres. On peut donc faire la distinction entre des cultures exigeantes, comme la betterave sucrière, la pomme de terre, et le maïs fourrage, et des cultures comme le blé tendre d'hiver qui le sont moins (REGIFER, 1999).

Contrairement aux écosystèmes naturels, où les cycles des éléments sont quasiment fermés, les agro-écosystèmes sont soumis à des exportations plus ou moins fréquentes suivant les espèces cultivées, ce qui appauvrit le milieu en éléments minéraux. C'est dans le but de compenser les sorties du système et de satisfaire les besoins des cultures que les pratiques d'entretien de la fertilité des sols ont été développées, notamment par la fertilisation minérale.

1.4.2. Le Phosphore : facteur de pollution et ressource finie

Si l'élément P a des vertus agronomiques reconnues, il représente aussi une menace pour l'environnement, en particulier pour les écosystèmes aquatiques. De nombreux auteurs sont d'accord pour dire que malgré une faible solubilité dans l'eau (0,05 à 2 mg P.L⁻¹ (Pellerin et al., 2006b)), l'accumulation de P dans les sols augmente le risque potentiel de fuites vers les eaux de surfaces suite à des épisodes d'érosion et de ruissellements (Bennett et al., 2001 ; Ehlert et al., 2003 ; Fangueiro et al., 2008 ; Gourley et al., 2007 ; Sharpley, 1995). En France, le secteur agricole participe à hauteur de 50% des rejets phosphatés dans les réseaux hydrographiques, et sa contribution relative augmente au fur et à mesure que l'efficacité des traitements des rejets industriels et domestiques s'améliore (Pellerin, 2008).

Cet enrichissement nutritionnel des masses d'eaux provoque un chamboulement des équilibres écologiques, notamment par une surexpression du compartiment primaire (phytoplanctons, diatomées, algues et végétaux supérieurs). Cela engendre une dégradation sévère de la qualité de ces écosystèmes, pouvant avoir des répercussions sur la santé humaine et animale et sur la biodiversité. Ce phénomène est plus connu sous le nom d'eutrophisation, ou dystrophie, pour trancher avec la connotation positive du premier (CORPEN, 1998 ; Djodjic et al., 2005 ; Morel, 2002).

En Europe, le contexte d'intensification agricole d'après guerre s'est traduit par une sur fertilisation des terres agricoles avec un recours massif aux engrais minéraux solubles, ce qui a eu pour conséquence d'entraîner des accumulations énormes de P dans les sols ces dernières décennies.

A titre d'exemple, nous pouvons citer l'Irlande, qui a vu sa concentration moyenne de P soluble dans ses sols agricoles multipliée par 8 entre 1950 et 1990 (Tunney, 1990). Beaucoup d'autres exemples du même type en Europe peuvent être recensés dans la littérature internationale (Portugal (Fangueiro et al., 2008) ; Royaume-Uni (Withers et al., 2001) ; etc.). Et pour cause, une étude de Runge-Metzger (1995), citée par Bennett et al. (2001), montre que sur les 25 pays étudiés, tous étaient accumulateurs nets de P. Cette observation à l'échelle nationale est le reflet des politiques intensives appliquées à des échelles plus locales.

Le P n'est pas une ressource inépuisable, et au rythme d'utilisation actuel les spécialistes estiment la durée de vie des réserves minières terrestres entre 60 et 130 années d'exploitation, selon l'optimisme des auteurs (Djodjic et al., 2005). Une meilleure gestion de cet élément paraît donc inévitable pour atteindre les enjeux de la durabilité.

BILAN SUR LE PHOSPHORE

Dans les paragraphes précédents nous avons abordé successivement le P comme facteur de production, avant de le voir comme un facteur de pollution. Il semble maintenant clair que le P est au cœur d'un débat agronomique et environnemental, et que l'optimisation des stratégies de gestion de cette ressource non renouvelable est capitale.

Afin de mieux comprendre les enjeux liés au P, nous allons nous pencher sur son comportement dans les sols.

1.5. Le Phosphore dans les sols

L'élément Phosphore se concentre dans les couches supérieures des sols, généralement dans l'horizon travaillé pour les sols cultivés. Cela est principalement dû à sa forte capacité à interagir avec la phase solide, aux apports répétés de matières fertilisantes, ainsi qu'à une activité biologique plus importante dans les horizons de surface (Sharpley et al., 1995).

En moyenne dans les sols cultivés des régions tempérées, les quantités de P total sont comprises entre 0.1 à 2 g P.kg⁻¹ de sol sec, ce qui représente 350 à 7000 kg P.ha⁻¹ dans l'horizon labouré. On le retrouve en général à hauteur de 80% sous forme minérale et 20% sous forme organique (Morel, 2002). Ces proportions peuvent varier suivant la quantité et la nature des matières apportées ou restituées, mais aussi suivant le système de culture (Sharpley, 1995).

1.5.1. Les différentes formes du Phosphore dans le sol

La spéciation du P est très complexe. Autrement dit, les différentes formes sous lesquelles nous pouvons le retrouver dans les phases liquide et solide du sol se comptent par centaines. Malgré tout, il ressort de cette variabilité quelques grandes familles entre lesquelles existe tout un continuum de formes chimiques.

Le Phosphore inorganique

Le P inorganique est présent sous sa forme ionique libre, en très petite quantité dans la solution du sol du fait de sa faible solubilité (0.05 à 2 mg P.L⁻¹), ou adsorbée à la phase solide (Pellerin et al., 2006b). Ces anions peuvent aussi se complexer avec des cations ou autres molécules organiques. Ce sont les orthophosphates, HPO₄²⁻ et H₂PO₄⁻, qui représentent la forme ionique la plus communément rencontrée en solution dans les sols cultivés, pour des valeurs de pH comprises entre 4,5 à 8.5 (Morel, 2002). Ce sont ces derniers qui représentent le P directement assimilable par les végétaux.

Les constituants phosphatés qui composent la grande majorité du P dans le sol sont des formes minérales plus ou moins cristallisées (avec le Fer, l'Aluminium ou le Calcium). Ces minéraux sont plus ou moins amorphes et substitués. De plus le P peut réagir de façon énergétique avec les oxydes-hydroxydes (Fer, Aluminium et carbonates de Calcium par exemple) allant jusqu'à former des liaisons covalentes.

Le Phosphore organique

Le P organique est, tout comme la forme inorganique, caractérisé par une grande diversité de composés. Nous pouvons en citer quelques formes plus ou moins stables, comme par exemple les acides nucléiques, les phospholipides, les sucres phosphatés, les fulvines, les humines, etc. A l'intérieur de ce compartiment, nous pouvons distinguer la matière organique morte de la matière organique vivante (25% du compartiment organique, soit 5% du P total). Cette dernière, dont le turn-over est plus ou moins rapide, va jouer le rôle d'intermédiaire entre le compartiment minérale et organique via la minéralisation.

1.5.2. La dynamique du Phosphore dans le sol

Comme nous l'avons vu précédemment, la solution du sol renferme la forme directement assimilable du P par les végétaux, en la présence des ions orthophosphates. Si à un instant donné nous comparons ce compartiment au besoin moyen d'une culture, on s'aperçoit que la solution du sol ne peut le satisfaire qu'à hauteur de seulement 1%. Ce qui veut dire que 99% du P prélevé est fourni par la phase solide du sol (Morel, 2002). Nous sommes en train d'aborder la notion de disponibilité du P. Elle caractérise la mise à disposition du P pour les plantes, et est définie par le couple concentration de P dans la solution du sol et réactivité du sol. Cette dernière étant sa capacité à réapprovisionner la solution du sol après son appauvrissement. La biodisponibilité du P dans un sol donné va dépendre de son pouvoir tampon (Ehlert et al., 2003), et donc de sa texture, mais aussi des conditions physico-chimiques qui y règnent (Morel, 2002 ; Nelson et Janke, 2007) et des pratiques des agriculteurs (Sharpley, 1995).

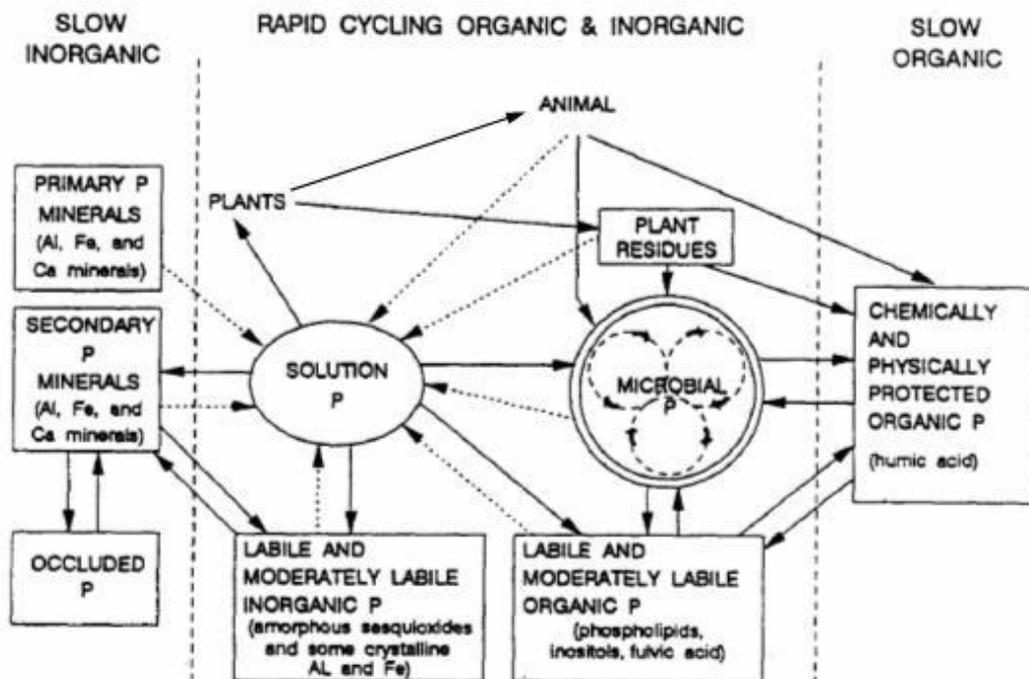


Figure 1 : Cycle et dynamique du Phosphore dans le sol. (adaptée de Sharpley, 1995)

Ce sont donc toutes les formes chimiques que peut prendre le P qui contribueront, à hauteur de leur labilité, des conditions physico-chimiques du milieu et des quantités en présence, à la

réalimentation de la solution du sol. Par conséquent, il est aisé de comprendre que la diversité de celles-ci va faire appel à un grand nombre de réactions d'ordre chimique, physique et biologique (Figure 1).

Sans être exhaustifs, aux vues de la complexité du comportement du P dans les sols, nous pouvons en citer quelques-unes comme l'adsorption/désorption des orthophosphates, la précipitation/dissolution des formes plus ou moins cristallisées, ou encore l'organisation/minéralisation par les êtres vivants. Les équilibres chimiques influenceront sur le sens des réactions dans le sol, ce qui conduira à l'enrichissement ou à l'appauvrissement de la solution du sol en P (Figure 1).

Des études ont été menées afin de déterminer quelles formes du P dans le sol contribuaient majoritairement au réapprovisionnement de la solution du sol. Cependant, la complexité du système sol-solution-plante de plein champ, la diversité des formes de P et des mécanismes qui régissent la dynamique de cet élément dans les sols sont telles que l'étude mécaniste de ces questions reste délicate. Néanmoins, il a été montré que ce sont les formes dissoutes ainsi que les groupements phosphatés adsorbés à la phase solide qui constituent la majeure partie du P phytodisponible. Les autres compartiments comme le P organique et microbien jouent un rôle négligeable en raison des faibles flux nets qu'ils engendrent (Morel, 2002). Toutefois, il ne faut pas faire l'amalgame entre P organique, dont les flux nets sont négligeables au regard des besoins de la culture, et la matière organique (résidus, fumiers, etc.) dont la dégradation permet de libérer du P inorganique (75 à 90% (Nelson et Janke 2007)) ou organique facilement minéralisable contribuant à la nutrition des couverts végétaux.

Le transfert des ions phosphates au sein de la solution du sol vers les racines va se faire par diffusion et convection suite à l'activité racinaire (création d'un gradient de concentration par absorption du P en solution et de flux d'eau par transpiration du végétal).

Le coefficient de diffusion des ions phosphates étant le plus faible des trois éléments minéraux majeurs (Azote (N) ; Phosphore (P) ; Potassium (K)), la racine ne peut les prélever que sur un rayon de 1mm (Pellerin, 2008 ; Pellerin et al., 2006b). Ce qui fait du transport du P dans la solution l'étape limitante à son absorption par la plante, d'où le rôle primordial du développement du système racinaire des végétaux.

1.6. Les stratégies des plantes pour augmenter leurs prélèvements de Phosphore

Pour les raisons précédentes les plantes vont mettre en œuvre des stratégies afin d'augmenter la disponibilité du P pour leur croissance, et la rhizosphère va être la plaque tournante des échanges qui vont s'effectuer dans le système "sol – solution – plante – microorganismes".

En effet, les plantes vont pouvoir stimuler la minéralisation en favorisant les micro-organismes par excrétion de composés organiques, c'est la rhizodéposition (Morel, 2002). Il y a aussi des stratégies d'associations symbiotiques avec des champignons mycorhiziens, qui vont permettre à la plante de prélever de manière plus efficace le P du sol. Cela passera par l'augmentation de la surface d'échange et du volume de terre prospectée, ainsi que par la sécrétion d'acides organiques et de phosphatases (Bolan, 1991). Ce genre de coopération est

très courant, environ 80% des espèces végétales en sont capables (Nelson et Janke, 2007). Du reste, l'activité biologique du sol va permettre de modifier localement les conditions physico-chimiques (acidification, gradient de concentration, etc.) et donc les équilibres chimiques, pouvant conduire à la libération du P de la phase solide du sol (Morel, 2002).

1.7. L'augmentation de la disponibilité en Phosphore par les pratiques agricoles

Dans le cas particulier des écosystèmes cultivés, l'homme joue un rôle très important dans la nutrition minérale des plantes par le biais des pratiques agricoles. Toutes interventions favorisant la disponibilité du P (nature et période de la fertilisation, enfouissement, localisation, irrigation, etc.), la vie du sol (absence de biocides, travail du sol, etc.) et limitant les pertes par dégradation des sols (couverture du sol, gestion paysagère, travail du sol, etc.), toutes ces pratiques faciliteront le prélèvement du P par les plantes (Nelson et Janke, 2007).

Les pratiques de fertilisation sont basées sur les besoins de la culture à planter, ainsi que sur les réserves d'éléments facilement disponibles dans le sol. Dans le cas du P, il existe plusieurs méthodes d'extraction permettant de quantifier ce dernier compartiment. Les trois plus connues, et employées en routine dans le but de fournir un conseil, sont la Méthode Dyer (acide citrique 2%), Joret-Hébert (oxalate d'ammonium 0,1 molaire) et Olsen (bicarbonate de sodium 0,5 molaire à pH 8,5). Cependant, toutes ces méthodes manquent de précisions. En effet, elles extraient toutes une partie, plus ou moins importante, de P difficilement accessible à la culture, et par conséquent surestiment cette quantité biodisponible. La méthode qui engendre le biais le plus faible, et qui est donc la plus fiable, est la méthode Olsen (Fardeau et al., 1988).

En outre, des méthodes qui abordent plus précisément cette disponibilité du P ont été mises au point, comme la dilution isotopique (Fardeau, 1996 ; Morel, 2002), mais leur faisabilité en routine n'est pas envisageable et elles restent réservées à des questions de recherche.

Les méthodes de quantification et de connaissance de la dynamique du P dans le sol, applicables en routine, sont donc indispensables pour améliorer la gestion de cet élément.

1.8. Les solutions en Agriculture Biologique pour augmenter la disponibilité du Phosphore

L'AB est très règlementée, et les solutions en matière de fertilisation phosphatée sont réduites par rapport aux autres formes d'agriculture. En effet, l'emploi d'engrais minéraux solubles, comme le triple superphosphate par exemple, y est interdit. Les matières autorisées sont moins efficaces qu'en agriculture conventionnelle (phosphates naturels peu solubles). Leur coût énergétique est important, que ce soit pour leur production ou pour leur acheminement (farines de plumes, d'arrêtes, de viande, etc. ; guano ; phosphates naturels), ce qui est en désaccord avec les principes de localité et d'économie d'énergie de l'AB. Avec tous ces éléments et un prix dissuasif, l'une des meilleures solutions en AB reste les engrais de fermes. Une liste plus détaillée des produits autorisés en matière de fertilisation et d'amendement en AB est consultable en annexe I.

Par ailleurs, les effets améliorants de l'AB sur les fonctions écologiques des agrosystèmes comme l'activité biologique, ainsi que le comportement du milieu "sol" avec l'amélioration de l'état structural (enrichissement en MO) ne sont pas pris en compte dans les analyses conventionnelles. C'est pourquoi on peut se poser la question de la pertinence de ces outils pour une utilisation en AB (Cornish, 2009 ; Pellerin et al., 2006a). C'est pourquoi les agrobiologistes ont tendance à se tourner vers des méthodes alternatives plus systémiques du type BRDA-Hérody.

Cette méthode approche le potentiel de fertilité d'un sol par la qualité de son complexe organo-minéral. Il est défini comme l'association entre les fractions minérales actives (argiles granulométriques et limons fins) et la fraction organique active¹ d'un sol (humus vrai) par des liaisons ferriques, le tout saturé et stabilisé par des alcalino-terreux, principalement calciques et magnésiens. Le compartiment minéral du sol (quantité et nature des particules actives) va déterminer sa capacité de fixation, sur laquelle des préconisations en termes de gestion de matières organiques (nature et fréquence d'apport) vont être réalisées en intégrant l'existant organique, fer, alcalino-terreux et éléments nutritifs du sol. Cette méthode agro-pédologique combine l'étude du terrain (paysage, topographie, profils de sols, systèmes de culture) à des mesures en laboratoire. Cependant, si elle est très utilisée en AB, elle n'est pas forcément bien reconnue par le monde scientifique pour son manque de transparence (Pérès et Cluzeau, 2004).

1.9. Evaluation des pratiques agricoles

Le champ de l'évaluation de la durabilité des systèmes agricoles, notamment en AB, a été beaucoup développé ces dernières années. Dans le cas de la gestion des éléments nutritifs, ce sont les méthodes de bilans entrées/sorties d'éléments qui se sont imposées.

1.9.1. La méthode des bilans

Ces méthodes se basent sur le principe de conservation de la matière et permettent de quantifier des flux de nutriments au travers de systèmes à partir de calculs simples entrées/sorties (Öborn et al., 2003). La réalisation de ces bilans entrées/sorties passe par quatre étapes, qui sont : (1) la définition du système d'étude (échelle spatio-temporelle) ; (2) la définition des entrées et des sorties de ce système ; (3) le calcul des entrées et sorties (collecte des données, estimations, conversion d'unité) et (4) le calcul du solde des entrées et sorties de ce système.

Il existe un grand nombre d'exemples d'applications de ces méthodes de bilans, plus de 45 en Europe (Gourley et al., 2007 ; Öborn et al., 2003). La grande diversité de ces outils est principalement due aux hypothèses de calcul qui sont faites ainsi qu'à la définition de leur domaine d'application. Elles diffèrent dans leur échelle d'étude, le type et nombre de flux pris en compte, le type de données à acquérir, etc.

¹ Dans cette approche, la matière organique (ou Matière organique Totalement Oxydable, MTO) est décomposée en plusieurs fractions : les Matières Organiques Fugitives (MOF) rapidement minéralisées ; l'Humus Vrai (HV) qui correspond à la fraction active de la MTO qui est liée à la fraction minérale active ; la 3^{ème} Fraction représentant la fraction organique polymérisée et non active.

Cependant, nous pouvons en recenser trois principaux types, du plus simple au plus complexe, allant de l'exploitation agricole (*farm-gate balance*), à la parcelle (*soil surface balance*), puis au système de l'exploitation agricole dans sa totalité (*farm-system balance*).

L'approche la plus simple et la plus communément employée est celle de l'exploitation agricole. Elle considère son objet d'étude comme une boîte noire. Ne s'attachant pas aux flux internes au système. Elle consiste à faire le décompte des entrées et des sorties de nutriments de l'exploitation. Cette méthode est transposable à différentes échelles autres que celle de l'exploitation agricole (pays, région, etc.) et requiert des données chiffrées facilement disponibles. Elle est utilisée comme indicateur environnemental, cependant, elle ne renseigne pas sur le devenir des nutriments étudiés (fuites vers l'environnement, fixation), car elle ne prend pas en compte les facteurs de risques liés aux types de sols, aux stratégies de distribution des nutriments à l'intérieur du système étudié, etc.

L'approche à la parcelle agricole est identique à celle de l'exploitation, mais appliquée à une échelle spatiale plus petite. Cependant, elle requiert des données d'un niveau de précision supérieur (restitutions et exportations au pâturage par exemple) et permet d'avoir un aperçu sur le statut de la parcelle vis-à-vis des éléments étudiés (accumulation, érosion des réserves). Les résultats de ces bilans ne peuvent pas être extrapolés au niveau de l'exploitation, mais ils donnent une vision des pratiques de l'agriculteur (schémas de distribution des nutriments au sein d'une exploitation, quantité de MO apportées, etc.).

Enfin, l'approche du système de l'exploitation agricole est la plus complète. Elle ne considère plus le système étudié comme un boîte noire, mais intègre les flux internes qui ont lieu entre compartiments de ce système. Cela permet de mieux comprendre la circulation des nutriments au sein de l'exploitation et ainsi de détecter les points clés d'amélioration du système en termes d'efficacité d'utilisation et de durabilité. Les données nécessaires à cette approche sont très complètes et spécifiques au système étudié, pour cette raison, elle est surtout utilisée en recherche et combinée avec des outils de modélisation.

L'interprétation des résultats de bilans nécessite une certaine vigilance, car elles ne sont pas révélatrices de la complexité de leur élaboration. C'est pourquoi il faut les analyser au regard de leurs composantes entrées et sorties. En effet, un bilan équilibré peut dissimuler soit une logique intensive (entrées et sorties du système importantes), ou au contraire une logique extensive (entrées et sorties faibles). Il faut aussi garder à l'esprit la composante spatiale des bilans calculés. Un bilan déficitaire, ou excédentaire, sur une petite surface et une courte durée ne représentera pas les mêmes dangers qu'à des échelles d'espace et de temps plus grandes. Enfin, comme le rappelle (Öborn et al., 2003), une valeur de bilan se doit de s'interpréter en fonction des caractéristiques du sol concerné (fertilité et capacité de fixation). Des pratiques engendrant des bilans positifs sur des sols pauvres et à fort pouvoir fixateur seront considérées comme plus durables que des pratiques générant des bilans équilibrés, dans l'optique de l'entretien de la fertilité à long terme des sols.

Ces méthodes de calculs des bilans ont prouvé leur utilité et jouent un rôle de plus en plus important dans des démarches d'évaluation environnementale, de sensibilisation et d'éducation des agriculteurs, de conseil en fertilisation des cultures et de recherche. Ces méthodes servent

aussi d'outils dans l'élaboration de réglementations environnementales et une harmonisation Européenne serait un premier pas vers des politiques agro-environnementales cohérentes (Öborn et al., 2003 ; Watson et al., 2002).

1.9.2. Un constat en Agriculture Biologique

L'évaluation des impacts environnementaux de l'AB a fait l'objet de nombreuses publications dans la littérature, notamment dans le domaine de la gestion de la fertilité phosphorique des sols. Cette question a été abordée par des méthodes de bilans de P, principalement à l'échelle des exploitations agricoles et des parcelles. Le constat des travaux existants en Europe vient mettre l'accent sur la question de la durabilité des pratiques de gestion du P en AB. En effet, il y est souvent mis en avant des bilans déficitaires, que ce soit au niveau de l'exploitation (Ekholm et al., 2005 ; Gosling et Shepherd, 2005 ; Pellerin et al., 2006a ; Watson et al., 2002) ou de la parcelle cultivée (Berry et al., 2003 ; Oehl et al., 2002 ; Pellerin et al., 2006a). Ces bilans étant d'autant plus négatifs en absence d'élevage (Berry et al., 2003). Cette tendance actuelle est mise en évidence de longue date (Capillon et al., 1972). Toutes proportions gardées à la vue des différences entre systèmes agricoles, ce même constat est fait dans d'autres pays (Canada (Martin et al., 2007) ; Australie (Cornish, 2007 et 2009)).

Cependant d'autres auteurs (Öborn et al., 2005 ; Pellerin et al., 2006a), mettent en évidence des bilans phosphoriques équilibrés ou positifs. Mais la communauté scientifique s'accorde à dire que les surplus de P en AB sont inférieurs à ceux que l'on peut observer en agriculture conventionnelle (Hansen et al., 2001).

La comparaison des bilans entre études est à aborder avec précaution, d'une part par la variété des méthodes employées, il faut s'assurer que les méthodes de calculs et la définition du système d'étude soient les mêmes, et d'autre part par les nombreuses sources d'incertitudes des données qui servent à les calculer. En effet, les teneurs en éléments des matériaux sont variables d'une exploitation à l'autre et dans le temps (Cornish, 2009 ; Öborn et al., 2003). Mais il faut aussi être critique sur la précision des données fournies par les agriculteurs eux-mêmes, surtout quand il faut remonter dans le temps (quantités de matériaux et variations de stocks).

Si à court terme aucune baisse de productivité n'est observée dans les exploitations déstockant le P de ses sols (Cornish, 2009), qui a été accumulé dans les périodes antérieures à la conversion, la question de la durabilité à long terme de ces exploitations prend tout son sens. Dans cette continuité, les sols des exploitations font souvent l'objet d'une évaluation de leur fertilité, par le biais de mesures de disponibilité du P. L'observation faite est que cette disponibilité dans les sols d'AB est plus faible, et diminue avec l'antériorité de conversion (Oehl et al., 2002 ; Pellerin et al., 2006a).

1.10. Problématique

L'AB est au centre d'un débat au sein de la communauté scientifique. Sa durabilité à long terme en matière de maintien de la fertilité des sols est controversée, notamment pour le phosphore.

L'étude réalisée a donc porté sur la caractérisation et l'évaluation des pratiques d'entretien de la fertilité phosphorique des sols de grandes cultures en Agriculture Biologique, par analyse conjointe à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation.

Ce qui rend ce travail exploratoire intéressant, par rapport à plusieurs études sur la durabilité à long terme des systèmes agrobiologiques, réside dans la combinaison de plusieurs méthodes et échelles spatiales d'approches, en rompant avec la traditionnelle comparaison entre systèmes de production biologique et conventionnelle.

La réalisation d'enquêtes de terrain auprès d'agrobiologistes a cherché à connaître et comprendre les pratiques de fertilisation des agriculteurs, mais aussi de constater leur diversité. L'application de la méthode des bilans entrées/sorties de P a visé à évaluer ces pratiques à l'échelle de l'exploitation et de la parcelle. Ces calculs de bilans ont été couplés à des mesures de la disponibilité en P du sol (méthode Olsen) pour une meilleure interprétation à l'échelle des parcelles étudiées.

Les constats faits dans la littérature internationale au sujet de la durabilité des pratiques d'entretien de la fertilité phosphorique des sols nous ont conduit à émettre quelques hypothèses de recherche qui ont guidées notre travail et l'exploitation des données collectées :

- En accord avec les principes de l'AB, nous faisons l'hypothèse que les agrobiologistes gèrent la fertilité de leurs sols de façon globale et à la rotation (hypothèse 1).
- Les méthodes conventionnelles d'analyse de la fertilité des sols ne sont pas jugées comme pertinentes par les agriculteurs et seront délaissées au profit de méthodes alternatives (hypothèse 2).
- Au cours de cette étude, nous nous attendons à observer des bilans équilibrés à négatifs dans les exploitations agricoles, et nous faisons l'hypothèse que ces bilans seront d'autant plus déficitaires en situation sans élevage (hypothèse 3).
- Les valeurs des bilans à l'échelle de l'exploitation s'expliquent par ceux à l'échelle de la parcelle (hypothèse 4), et sont liés à la complexité du fonctionnement des exploitations (hypothèse 5).
- La disponibilité en phosphore de plus en plus faible avec l'antériorité en AB (hypothèse 6).
- La structuration du parcellaire engendrera des différences de gestion de la fertilité au sein des exploitations qui s'en ressentiront sur les bilans à la parcelle (hypothèse 7).

Après cette introduction bibliographique présentant les enjeux de durabilité liés à la gestion du Phosphore en AB et la problématique de l'étude, nous allons consacrer la seconde partie du mémoire à la description de la méthodologie employée pour mener à bien l'acquisition et le traitement des données recueillies. Puis nous exposerons les résultats obtenus, que nous discuterons dans une quatrième partie, avant de tirer les conclusions de cette étude.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Méthode d'enquête

La collecte des informations nécessaires aux besoins de l'étude ont été recueillies lors d'enquêtes auprès de 23 agrobiologistes, dont 20 dans le département de la Dordogne, et 3 dans un département limitrophe, le Lot-et-Garonne (Annexe II).

Etant donné l'importante charge de travail des agriculteurs pendant la période d'enquête et le nombre d'exploitations agricoles à étudier, les entretiens ont été menés de manière directive à semi directive afin ne pas excéder une durée moyenne de 2 heures.

2.1.1. Le questionnaire

Le questionnaire a été construit dans le but de répondre aux objectifs de l'étude, qui sont : (1) la caractérisation et (2) l'évaluation des pratiques de fertilisation phosphorique des agriculteurs en grandes cultures biologiques (questionnaire consultable en annexe III).

Ce questionnaire se décompose en trois parties. Une première permettant de caractériser les exploitations, grâce au recueil de données factuelles, comme la Surface Agricole Utile (SAU), l'assolement général, et les ateliers de productions par exemple.

Ensuite une deuxième, où est abordée la gestion de la fertilité phosphorique des sols. Cette étape vise à comprendre les stratégies d'entretien de la fertilité des sols des agriculteurs en termes de raisonnement, de matières apportées, etc.

Enfin, une dernière partie est consacrée à la collecte des informations chiffrées permettant le calcul des différents bilans phosphatés à l'échelle de l'exploitation et de la parcelle (cf. Méthode des bilans).

2.1.2. Objet d'étude : les agriculteurs enquêtés

Tout comme le questionnaire, le choix des agriculteurs enquêtés a été dirigé par la thématique et les questions sous-jacentes de l'étude.

Les 23 exploitations de l'échantillon ont comme trame commune la culture de céréales à paille (blé, orge, méteil, seigle, etc.), et environ la moitié ne possède pas d'atelier d'élevage (12 sur 23).

Les 3 exploitations hors du département de la Dordogne ont été étudiées dans la nécessité de compléter l'échantillon en situations sans élevages. Dans un souci d'homogénéité pédoclimatique, nous nous sommes cantonnés au Nord-Ouest du département du Lot-et-Garonne.

Les exploitations en polycultures sont à forte dominance céréalière, les autres productions secondaires pouvant être des fourrages (luzerne, foin), des légumes de plein champ (carottes, pommes de terre, poireaux), ou encore des fruits (kiwi, noix). Nous nous sommes donc affranchis des exploitations spécialisées en viticulture, en arboriculture et en maraîchage, dans

le but de rester dans la thématique *grandes cultures*, et ainsi limiter la variabilité de l'échantillon.

Les exploitations avec élevage comportent des ateliers de production animale divers (Tableau 1). La majorité de l'échantillon est constituée d'exploitations élevant des vaches allaitantes. Le reste des situations étudiées sont des exploitations laitières (brebis, chèvres) et une exploitation mixte vaches laitières et allaitantes.

Tableau 1 : Description des exploitations enquêtées par leur orientation de production.

	Vaches allaitantes	Mixte	Brebis Laitières	Chèvres laitières	Grandes cultures
Nombre d'exploitations	7	1	2	1	12
Numéros	2 ; 4 ; 7 ; 8 ; 11 ; 16 ; 18	13	6 ; 9	12	1 ; 3 ; 5 ; 10 ; 14 ; 15 ; 17 ; 19 ; 20 ; 21 ; 22 ; 23

La SAU moyenne de l'échantillon est de 77.64 ha. Les exploitations en polycultures élevage sont en moyenne plus grandes d'environ un tiers que les exploitations sans élevage (97.26 ha contre 61.03 ha), ce qui traduit l'extensivité des élevages en AB (0,77 UGB/ha de SAU (de 0,37 à 1,46 UGB/ha de SAU)).

L'antériorité en AB des exploitations de l'échantillon varie de 2 ans à 39 ans, avec une surreprésentation de la classe comprise entre 5 et 10 années, qui correspond au développement des Contrats Territoriaux d'Exploitation (CTE) (Figure 2).

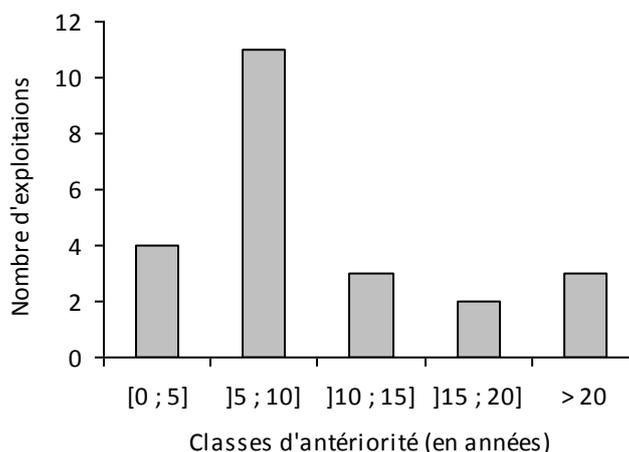


Figure 2 : Distribution des exploitations en fonction de leur antériorité en agriculture biologique.

La prise de rendez-vous avec les agriculteurs à été rendue possible grâce à une liste de contacts correspondants aux profils recherchés, établie par le directeur de l'association de développement de l'AB en Dordogne (AgroBio Périgord), ainsi que par la consultation de l'annuaire en ligne de l'Agence Bio.

2.2. La zone d'étude

2.2.1. Le contexte pédoclimatique

Le département de la Dordogne se situe à mi-chemin entre l'Océan Atlantique et le Massif Central, dans la région Aquitaine, ce qui lui vaut son climat océanique ponctué de régulières influences continentales.

Le paysage Périgourdin est assez varié, et on peut y distinguer quatre types qui sont (Figure 3) : le Périgord Vert, vallonné, couvert de verdure et sillonné de cours d'eau et de rivières (au Nord) ; le Périgord Blanc, formé de plateaux calcaires et de larges vallées herbagères (d'Ouest en Est) ; le Périgord Pourpre, caractérisé par de nombreux vignobles (au Sud-Ouest) ; et le Périgord Noir très forestier (au Sud-Est).



Figure 3 : Carte du département de la Dordogne
(source : www.perigord-geothermie.fr)

Il existe une grande diversité de sols sur le territoire de la Dordogne. Des sols acides et grossiers à argileux sur des roches cristallines (granites et gneiss) dans le Nord-est, aux calcaires secondaires recouverts par de nombreux placages silico-argileux au centre, dominants et donnant au département l'essentiel de son caractère (Annexes IV et V).

Les conditions climatiques sont plutôt douces au regard des températures moyennes mensuelles (3,5°C en Janvier et 21,5°C en Juillet). Cependant il n'est pas rare d'observer des températures extrêmes en hiver comme en été, tout comme des variations non négligeables d'un endroit à l'autre du département.

Au niveau de la pluviométrie la Dordogne est considérée comme bien arrosée, avec des hauteurs d'eau de 812 millimètres en moyenne par an à Bergerac (mm/an), pour une évapotranspiration potentielle (ETP) de 808 mm/an. Mais la mauvaise répartition des pluies sur l'année et la demande évaporative donne naissance à des épisodes de sécheresse en période estivale (météo France).

2.2.2. Le secteur agrobiologique en Dordogne

L'agriculture en Dordogne représente un secteur relativement important. En effet, 3,7% de la population y travaille en tant que permanents ou main d'œuvre saisonnière, alors que les moyennes pour la région Aquitaine et la France Métropolitaine sont respectivement de 3% et 1% (Agreste). La SAU représente environ 39% du territoire départemental, c'est le troisième en Aquitaine en terme de surfaces cultivées derrière les Pyrénées Atlantiques et le Lot-et-Garonne.

Dans tout cela, l'AB ne représente qu'une toute petite part de l'activité agricole de la Dordogne, avec 2,3% de sa SAU en 2008 (soit 7255 ha) et 2,8% des exploitations agricoles en 2007 (soit 257 sur 8306) (Agence Bio).

Une chose importante à noter est que malgré l'érosion continue et généralisée du nombre d'exploitations agricoles sur le territoire français, le nombre d'agrobiologistes continue de progresser sur le territoire comme dans le département de la Dordogne depuis le début des années 2000 (Figure 4).

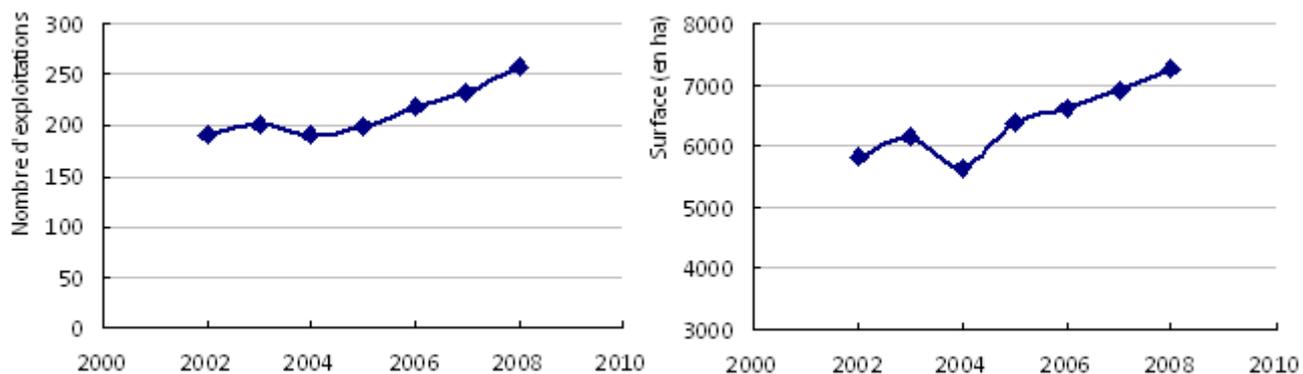


Figure 4 : Evolution du nombre d'exploitations agrobiologiques (gauche) et des surfaces cultivées en agriculture biologique (droite) depuis le début des années 2000 en Dordogne. (source : Agence Bio)

2.2.3. AgroBio Périgord

AgroBio Périgord est l'association de développement de l'agrobiologie en Périgord (anciennement ADAP). Elle fédère environ 300 exploitations agricoles biologiques, dont une cinquantaine en cours de conversion, ainsi que quelques agriculteurs conventionnels, pour la transposition de pratiques agricoles entre modes de production (pré-conversion).

L'association est un partenaire pour l'installation en agrobiologie et l'accompagnement dans les démarches de conversion des agriculteurs. Elle est aussi en charge de la représentation des intérêts de l'AB auprès des instances politiques et économiques.

Elle fournit un appui technique (viticulture, maraîchage) et propose des formations en agrobiologie dispensées par les acteurs du réseau départemental.

AgroBio Périgord permet, par ses actions et sa démarche collective, de garantir une agriculture biologique vivante et dynamique dans le département.

2.3. Mise en œuvre des bilans entrées/sorties

2.3.1. Les échelles spatiales et temporelles

Dans cette étude, nous avons appliqué la méthode des bilans pour l'élément Phosphore à deux échelles spatiales, (1) l'exploitation agricole et (2) la parcelle agricole.

Dans le cas des exploitations agricoles, les bilans apparents de P ont été calculés sur 3 années, de 2006 à 2008. Pour chaque exploitation, nous avons calculé le bilan de P sur une à deux parcelles. Le nombre de parcelles considéré dépendant de la présence ou non de plusieurs systèmes de culture. Dans le cas où il était possible d'en prendre en compte deux, il a été choisi des parcelles au mode de gestion contrasté en termes de fertilisation, d'amendement, de rotation, ou d'éloignement au siège de l'exploitation par exemple. A cette échelle, les bilans ont été calculés sur une période de temps pouvant aller jusqu'à 6 cycles annuels de culture (4 à 5 années en moyenne) pour essayer de raisonner à la rotation culturale.

Ces deux échelles de travail nous ont permis de caractériser le statut phosphaté général des exploitations agricoles (accumulatrice, équilibrée ou déficitaire), ainsi que les stratégies d'entretien de la fertilité P des sols pour les parcelles étudiées. La comparaison des bilans à ces deux échelles permettra de définir, ou non, si ces valeurs sont dépendante l'une de l'autre.

2.3.2. Le calcul des bilans entrées/sorties de Phosphore

Quelle que soit l'échelle d'espace, le calcul des bilans correspond à la différence entre les entrées et les sorties des systèmes. Les différents facteurs entrants en ligne de compte dans leurs calculs sont listés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Détail théorique des facteurs entrant dans les calculs des bilans de Phosphore pour les deux échelles spatiales étudiées. (source : Gourley et al., 2007)

Echelle d'espace	Entrées de P	Sorties de P
Exploitation agricole	Achat d'animaux Alimentation animale (concentrés, fourrages, ...) Semences Amendements, fertilisants	Animaux et sous-produits (viande, lait, laine, etc.) Cultures (céréales, pailles, fourrages, fruits, ...) Amendements, fertilisants
Parcelle agricole	Amendements fertilisants Semences Restitutions au pâturage	Cultures (céréales, pailles, fourrages, fruits, ...) Exportations au pâturage

Les flux relatifs aux phénomènes de dépositions atmosphériques et de transfert de P (érosion, lixiviation, ruissellement) ont été négligés. Ils sont généralement faibles et difficiles à quantifier, de l'ordre du kilogramme de P par hectare et par an (Morel, 2002 ; Bery et al., 2003 ; Tunney et al., 2003). L'autoconsommation et les variations de stocks n'ont pas été prises en compte dans les calculs de bilan, les flux engendrés par les achats et les ventes étant très supérieurs.

Les références qui nous ont servis pour les calculs de bilans proviennent de plusieurs sources les plus à jour possible et consultables en annexe VI (sources en annexe VII).

2.4. Mesure de la biodisponibilité du P dans les sols

Suite au calcul des bilans de P à l'échelle de la parcelle agricole, nous avons déterminé, pour chacune d'entre-elles, la quantité de P disponible pour la culture.

Cette méthode de détermination de la disponibilité en P se déroule en plusieurs étapes, qui sont (1) le prélèvement des échantillons de sol, (2) leur préparation et (3) l'extraction - dosage.

2.4.1. Prélèvement et préparation des échantillons de sols

Les prélèvements de sols ont été effectués suivant une méthode normée (NF X 31-100), sur une zone représentative de chaque parcelle étudiée, en présence de l'agriculteur. Conformément à la norme, un échantillon de terre constitué d'une quinzaine de prélèvements par parcelle a été réalisé.

Compte tenu de la faible mobilité de P dans les sols, les prélèvements ont été effectués à l'aide de tarières dans l'horizon de surface correspondant à l'horizon travaillé (20 cm en général, et 10 cm pour les prairies permanentes et le semis direct).

Une fois homogénéisés et débarrassés de leurs cailloux (diamètre supérieur à 2 cm), les échantillons de terre ont été séchés à l'air libre et tamisés à 2 mm.

Préalablement aux prélèvements et en vue de l'interprétation des résultats, les informations relatives aux antécédents des parcelles ont été collectées (assolement, nature du sol, profondeur, fertilisation des années précédentes et pour la culture en place, etc.).

2.4.2. Extraction et Dosage du Phosphore

L'extraction du P disponible, c'est-à-dire du P en solution et facilement remobilisable de la phase solide vers la solution du sol, a été réalisé avec la méthode d'extraction Olsen. Cette méthode fait l'objet d'une norme (ISO 11263:1994(F)). Selon Fardeau et al. (1988), même si elle extrait aussi une partie du P non disponible pour les cultures, elle reste la méthode la plus fiable en routine pour de sols neutres et alcalins.

Cette méthode d'extraction utilise une solution d'hydrogénocarbonate de sodium 0,5 Molaire (M) à pH 8,5 dans un rapport masse sur volume de 1/20. C'est-à-dire 1 gramme de sol sec à 105°C en agitation pendant 30 minutes avec 20 mL de solution d'hydrogénocarbonate de sodium (0,5 M ; pH 8,5). Le principe de cette méthode d'extraction est la libération des ions phosphates dans la solution du sol suite à une réaction de substitution par les ions carbonates et hydroxydes (formation de carbonate de calcium et d'hydroxydes d'aluminium et de fer (III)).

Après réaction et filtrage, les ions phosphates ont été dosés par colorimétrie au vert de malachite (van Veldhoven et Mannaerts, 1987).

La manipulation a été répétée par deux fois, et en présence d'échantillons de référence. La quantité de P extractible par la méthode Olsen de ces échantillons de référence était connue et a permis de valider la manipulation *a posteriori*.

2.5. Analyse de la dynamique du P au sein des exploitations vues comme des écosystèmes

En écologie, de nombreux écologues partagent l'idée que la complexité des réseaux trophiques conduit à une plus grande stabilité des systèmes, ainsi qu'à une meilleure efficacité d'utilisation des nutriments et de l'énergie. On peut aussi voir l'exploitation agricole comme un écosystème comprenant plusieurs compartiments qui échangent de la matière et de l'énergie entre eux. Ces compartiments considérés sont alors les systèmes de culture et les ateliers d'élevage. Par analogie, nous avons donc émis l'hypothèse que plus le fonctionnement des exploitations serait complexe (recyclages par passages des nutriments d'un compartiment à un autre), et plus l'efficacité d'utilisation de P serait grande. Cette augmentation de l'efficacité d'utilisation du P, qui correspond au rapport entre les sorties et les entrées de P des exploitations, se traduirait donc par des bilans plus équilibrés et un recyclage accru.

La variable utilisée pour cette méthode est la connectance (C) entre compartiments ou nœuds. En écologie elle permet d'aborder la complexité des réseaux trophiques. Elle correspond au rapport entre le nombre de liaisons trophiques (L) entre nœuds au sein d'un réseau et le nombre total de liaisons possibles (S², avec S le nombre de compartiments présents dans le réseau) :

$$C = L/S^2$$

Pour chaque exploitation de l'étude nous avons réalisé un schéma de fonctionnement de celle-ci, représentant l'exploitation par ses différents systèmes de culture et ateliers d'élevage, et mentionnant les échanges de matière entre eux (alimentation des animaux, déjections au pâturage, transport de fumier, etc.) ou avec l'extérieur. Chaque système de culture ou atelier d'élevage est appelé un nœud, l'ensemble de ces nœuds étant le réseau. Puis, pour chaque exploitation, nous avons déterminé le nombre de nœuds, le nombre de liaisons et in fine la connectance du réseau. Enfin, nous avons cherché à relier les connectances des exploitations avec leurs performances en terme d'entrées, sorties, bilans et efficacité d'utilisation du P. Les liaisons entre nœuds n'ont pu être élaborées que de façon qualitative (Figure 5). Nous aurions souhaité pouvoir les pondérer par des informations supplémentaires sur les flux de P (quantités, fréquences) pour atteindre un degré de précision supérieure, mais les informations collectées n'ont pas pu rendre l'opération possible.

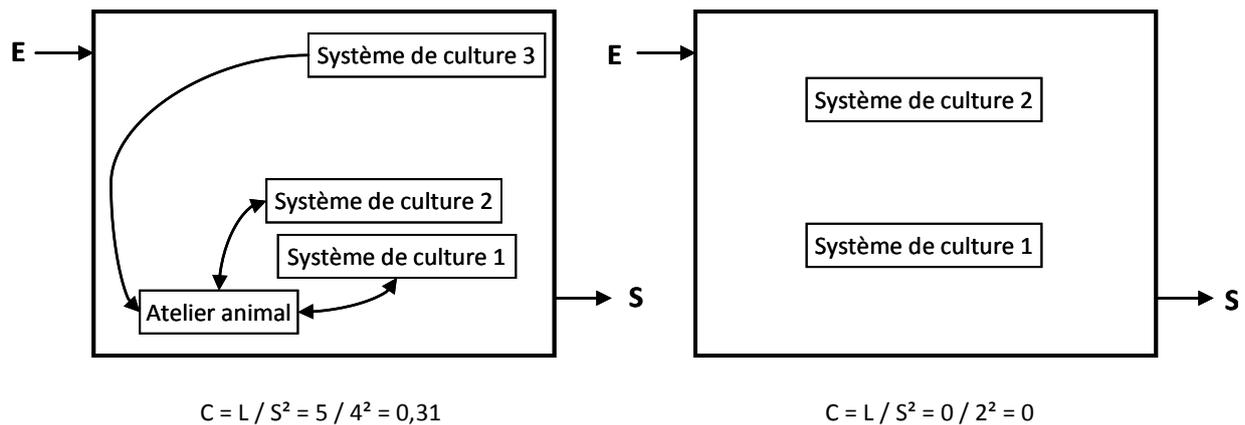


Figure 5 : Schémas de fonctionnement types des exploitations avec (gauche) ou sans élevage (droite) et exemples de calcul de connectance pour chacun des types d'exploitations (en dessous des schémas).

(les compartiments sont représentés par les systèmes de culture et le(s) atelier(s) d'élevage ; une double flèche correspond à un nombre de liaisons égal à 2 et une simple flèche est égale à une liaison ; les lettres E et S symbolisent respectivement les entrées et les sorties de P des exploitations)

2.6. Traitements du jeu de données

Toutes les informations récoltées sur le terrain ont été saisies et organisées dans un tableur Excel en vue de traitements statistiques avec le logiciel R.

Dans un premier temps, nous avons appréhendé la variabilité des données avec des statistiques descriptives univariées. Puis nous avons cherché à les comprendre (facteurs déterminants, test des hypothèses de recherche) avec des méthodes de traitement multivariées du type régressions linéaires et analyse en composante principale.

3. RESULTATS

Dans la partie qui suit, nous allons exposer les différents résultats de notre étude, en commençant par la description des pratiques d'entretien de la fertilité des sols des agriculteurs périgourdins. Ensuite, nous nous attacherons à la description et à la compréhension des bilans de P aux différentes échelles d'étude, l'exploitation et la parcelle agricole.

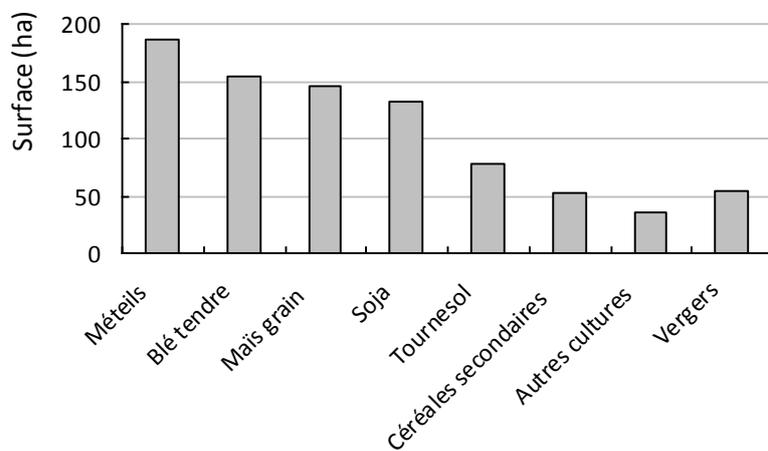
3.1. Les pratiques de fertilisation Phosphorique

3.1.1. Les cultures pratiquées

La Figure 6 montre les principales productions végétales cultivées en 2008 dans les exploitations agrobiologiques enquêtées. Quatre cultures dominantes sont produites : des méteils (pour l'alimentation animale et bénéficiant de la fixation de l'azote atmosphérique par les légumineuses en mélange dans les rotations culturales) ; du blé tendre, du maïs grain et du soja (pour la vente principalement). Ces quatre principales cultures sont organisées au sein de successions culturales avec d'autres productions plus marginales comme des céréales secondaires par exemple. Les surfaces en prairies sont importantes et sont principalement concentrées dans les exploitations avec élevage (357 ha de prairies permanentes et 514 ha de prairies temporaires). Elles permettent de fournir les fourrages pour les animaux et constituent une phase de reconstruction de la fertilité des sols pour les prairies temporaires qui intègrent les successions. Les surfaces réellement gelées sont rares (32 ha) du fait de l'autorisation de leur valorisation en AB.

Figure 6 : Surfaces cultivées (en hectares) par principaux types de productions à partir des assolements 2008 des exploitations étudiées.

(Méteils : mélanges divers de céréales (ex : blé-triticales), ici nous considérons aussi les associations céréales et légumineuses ; Céréales secondaires : orge, avoine, seigle, petit épeautre ; Autres cultures : anecdotiques dans l'assolement 2008 (féverole, lentilles, pois chiche, colza, légumes de plein champ, sorgho, sarrasin) ; Vergers : kiwis et noyers)



3.1.2. Les matières utilisées

La totalité des exploitations agricoles étudiées utilise exclusivement des sources de P d'origine organique et relativement locales. Les phosphates naturels, peu solubles, ne sont pas utilisés dans les sols carbonatés du Périgord. En effet, un pH d'au moins 5,5 dans le sol serait nécessaire pour justifier cette pratique (faible solubilité des phosphates naturels dans les sols basiques).

Comme le montre le Tableau 3, la majorité des exploitations (14 sur 23), basent leurs apports d'éléments minéraux sur les engrais de ferme (exemple : fumiers de bovins, équins, caprins, ovins compostés ou non ; fumiers de poulets Label Rouge etc.) et autres sources de matières organiques facilement disponibles dans le département (composts de déchets verts par exemple). Cependant, les schémas d'utilisation des matières organiques sont très contrastés entre les exploitations avec et sans élevage.

Tableau 3 : Types de MO utilisés en nombre d'exploitations par type d'exploitation.

	Engrais de ferme et Amendements	Fertilisants organiques	Aucune matière	Total
Avec élevage	8	3	0	11
Sans élevage	6	4	2	12
Total	14	7	2	23

Dans cette première catégorie, la totalité des exploitations disposent d'effluents produits par les animaux, ce qui représente, dans 72% des situations, la source principale de fumure des cultures. Néanmoins, toutes les exploitations, à l'exception d'une seule, se procurent des matières organiques exogènes pour compléter leur fumure.

Dans le cas des exploitations sans élevage, les situations sont plus diverses. Dans deux situations les agriculteurs n'apportent aucun amendement ou fertilisant phosphaté. Pour le reste des céréaliers, nous observons deux comportements différents du à une différence de pratiques entre les agriculteurs de la Dordogne, qui emploient des engrais de fermes, et ceux du Lot-et-Garonne qui utilisent exclusivement des fertilisants organiques du commerce.

Le Tableau 4 donne le détail des MO utilisées par les agriculteurs enquêtés, ceux-ci combinent souvent l'utilisation de plusieurs types de MO pour satisfaire leurs besoins. Les fumiers et les composts de fumiers sont les plus fréquemment utilisés par rapport aux fertilisants organiques du commerce.

Tableau 4 : Fréquences d'utilisation des différents types de MO par les agriculteurs enquêtés.

Type de MO	Nombre d'agriculteurs
Composts de déchets verts	6
Sciure	1
Cendres	1
Fumiers	10
Composts de fumiers	10
Fientes de poules	1
Lisiers aérés	1
Farines de viande	7
Farines de plumes	1
Recettes commerciales	4

Au regard des entrées de P dans les exploitations (Tableau 5), nous remarquons qu'en présence d'atelier animal celles-ci sont beaucoup moins dépendantes vis-à-vis de l'extérieur pour la fumure de leurs cultures.

Tableau 5 : Importations moyennes de P (et écart-types) par type d'exploitation.
(des valeurs au sein d'une même colonne suivies de lettres différentes sont significativement différentes au seuil de 5% ; les valeurs sont exprimées en kg P/ha/an)

	Effectifs	Fertilisants	Amendements	Entrées Totales de P
Avec élevage	11	3.33 a (3.63)	3.34 a (5.28)	6.67 a (4.41)
Sans élevage	12	9.18 a (20.38)	11.18 a (14.72)	20.36 b (20.91)

Cette différence est significative en ce qui concerne les entrées totales de P dans les exploitations agricoles, mais pas pour leur détail, du fait de la variabilité des pratiques des agriculteurs en termes de types de matières organiques apportés (effet agriculteur, département et présence d'arboriculture).

3.1.3. Approvisionnement des exploitations en MO exogènes

L'origine des produits organiques reste très locale (quelques kilomètres) à l'exception des fertilisants du commerce comme les farines de viandes qui sont importées de Bretagne.

Si pour les exploitations de grandes cultures, les raisons d'un approvisionnement extérieur à l'exploitation en MO sont facilement compréhensibles, celles qui poussent les éleveurs à s'en procurer sont les suivantes. En premier lieu, ils évoquent le manque d'effluents d'élevage produits ou collectés (faible densité d'élevage, type de logement des animaux). Ces matières fertilisantes sont donc achetées comme complément de fumures des cultures. Une autre raison est pour pallier la contrainte de l'éclatement du parcellaire, grâce à des matériaux concentrés et plus facilement transportables dans les exploitations concernées. Les fertilisants organiques les plus rencontrés sont les farines de viandes, ce sont des engrais binaires dont la composition en Azote et en acide Phosphorique est respectivement de 9 et 12% en masse. Enfin, ils supposent une meilleure efficacité à court terme de ces fertilisants.

Mis à part dans le département du Lot-et-Garonne, les céréaliers se procurent des MO locales, ce qui donne lieu à une dynamique d'échange au sein du département (déchets verts communaux, échange paille/fumier, compost de champignonnière²). Par opposition aux systèmes avec élevage, ils ne voient pas le morcellement de leur exploitation comme une contrainte réelle pour l'entretien de la fertilité des sols, grâce à une bonne organisation des chantiers d'épandage (emplacement des tas de MO importées à proximité des parcelles à fertiliser).

² Après le cycle de culture, les supports organiques sur lesquels les champignons ont poussé sont compostés. Ces supports sont composés de paille, de différents types de fumiers et de gypse.

Une autre pratique permettant de pallier cette contrainte d'éloignement est le compostage des effluents. Ce procédé permet de réduire les quantités à épandre à l'hectare et d'améliorer l'homogénéité de l'épandage, à condition d'être équipé du matériel nécessaire (épandeur à tables d'épandage centrifuges). Le compostage permet aussi d'assainir les MO (germes et graines d'adventices), ce pourquoi il est beaucoup pratiqué, au moins pour partie, dans les élevages enquêtés (8 éleveurs sur 11). Cependant, ce processus se doit d'être bien maîtrisé, car en fonction de son degré de maturité (MO plus ou moins stabilisées), un compost ne conviendra pas aux mêmes types de sol (Méthode de gestion de la Matière Organique, BRDA-Hérody).

3.1.4. Modes de raisonnement de la gestion de la fertilité

Contrairement à l'agriculture conventionnelle, où la fertilisation peut-être raisonnée élément par élément, en AB l'emploi de matières organiques oblige à un raisonnement conjoint des nutriments. Dans toutes les exploitations agrobiologiques étudiées, l'entretien de la fertilité est donc raisonné de manière globale. Cependant, à travers le discours des agriculteurs, nous percevons, plus ou moins clairement, le souci de satisfaire les besoins des cultures en azote. Cela se ressent principalement chez les agriculteurs du Lot-et-Garonne ainsi que pour les parcelles arboricoles.

Cette focalisation concernant la nutrition azotée des cultures se traduit par une gestion de la fertilité par rapport à la culture à planter, ce qui conduit à des apports fréquents de MO. A fréquence de cultures égale, les éleveurs apportent des MO plus souvent mais en plus petites quantités que les céréaliers. Rares sont les agriculteurs rencontrés qui gèrent vraiment la fertilité de leurs sols à la rotation (6 sur 23), en amendant les parcelles en tête de rotation ou de reconstruction de la fertilité, puis en jouant sur l'insertion de légumineuses, qui fixent l'azote atmosphérique, et sur des cultures moins exigeantes en fin de rotation qui profiteraient d'arrière effets des MO appliquées les années précédentes (fumiers, composts, résidus de cultures).

3.1.5. Le raisonnement des apports de MO

Le raisonnement des apports de MO est très varié d'un agriculteur à un autre, que ce soit en matière de quantités apportées, de types de MO, ou de fréquence d'apport. En faire une énumération exhaustive serait beaucoup trop longue, cependant, à quelques exceptions, certaines grandes caractéristiques communes de la gestion de la fertilité des sols par les agriculteurs rencontrés ressortent.

Comme nous l'avons vu précédemment, les craintes vis-à-vis de l'azote dans les systèmes agrobiologiques ont conduit souvent à un raisonnement de l'entretien de la fertilité des sols à la culture à planter. Ce constat se reflète bien dans la Figure 7 qui fait état des quantités moyennes de P apportées en fonction du type de cultures par les agriculteurs. Mis à part la production de kiwis, si les parcelles étaient toutes gérées à la rotation, les MO se retrouveraient en grande partie sur les têtes de rotation comme le maïs et les prairies temporaires, dans la phase de reconstruction de la fertilité des sols.

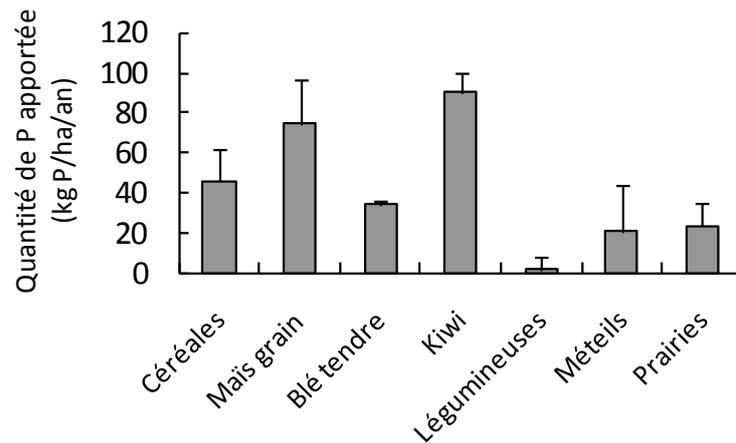


Figure 7 : Quantités moyennes de Phosphore apportées (en kgP/ha/an) en fonction du type de cultures. (Céréales : céréales dont maïs grain et blé tendre ; Légumineuses : soja, lentilles, pois chiche, féverole ; Méteils : mélanges multi espèces céréales/légumineuses ; Prairies : prairies temporaires, dont luzernières ; les écarts type sont symbolisés par les barres d'erreur)

Les cultures à forte valeur ajoutée, comme les kiwis et les céréales (maïs grain et blé principalement), sont celles qui reçoivent la plus grande quantité de P, soit respectivement 90 et 45 kg P/ha. Ce sont ces mêmes cultures qui engendrent des bilans de P positifs, d'où l'intérêt de les mettre en rotation avec d'autres moins exigeantes en MO, dans le cas des céréales, comme les légumineuses par exemple, pour balancer ces surplus.

Les légumineuses sont les cultures qui ne sont quasiment jamais fertilisées du fait de leur capacité à prélever l'azote atmosphérique ainsi que des arrières effets des MO sur les précédents culturaux.

En revanche, les méteils bénéficient d'apports intermédiaires, de l'ordre d'une vingtaine de kilogramme de P par hectare, malgré la présence de légumineuses.

Enfin, nous remarquons que les prairies reçoivent des quantités non négligeables de P (23 kg P/ha/an en moyenne). A l'exception des prairies permanentes, les prairies temporaires entrent dans les rotations culturales des agriculteurs et constituent une étape de reconstruction de la fertilité des sols, ce qui explique ces quantités de P qui sont apportées.

De façon générale, si le type de culture joue un rôle prépondérant dans le raisonnement d'apports de MO des agriculteurs, il n'en est pas de même pour le type de sol (micro-hétérogénéité dans les parcelles ; ne peuvent pas diminuer les doses appliquées plus bas avec leur matériel). Cependant, dans certaines exploitations, ces apports sont modulés entre parcelles. Les prairies et les sols à structures fragiles vont recevoir des MO moins riches en N ou moins rapidement minéralisables comme des composts matures de fumiers ou de déchets verts, dans le but reconstruire la fertilité des sols et de stabiliser leur structure via un enrichissement en MO. Tandis que les matières plus riches (composts jeunes, fientes et fumier

de poules, fumiers frais, farines de viande etc.) seront réservées à des cultures à forte valeur ajoutée (maïs grain, blé, kiwis, légumes de plein champ).

En ce qui concerne le calcul des doses, les agriculteurs ne se basent pas sur des résultats d'analyses de sols, sauf en ce qui concerne les parcelles arboricoles. Pour cause, ils ne jugent pas l'approche des analyses de terres conventionnelles pertinente pour l'AB. Ils préfèrent se fier à des méthodes alternatives plus systémiques de type BRDA-Hérody, au comportement de leurs sols, à l'aspect de leurs prairies et des précédents culturaux, ainsi qu'aux plantes indicatrices. Les doses choisies sont fonction de leurs habitudes dans la grande majorité des cas. Néanmoins, nous avons rencontré un agriculteur ayant des pratiques intensives et axées sur l'azote, conduisant à une fertilisation phosphorique subie, entraînant de grosses accumulations dans les sols.

Ces doses de MO apportées restent très variables d'un agriculteur à un autre pour une même culture (cf. écarts type Figure 7). Elles dépendront aussi de déterminants comme par exemple la disponibilité des MO, leur prix, les fenêtres climatiques et le temps que les agriculteurs auront pour épandre leurs fumures.

En AB la fertilité des sols ne se résume pas à apporter des MO. En effet, toutes autres pratiques permettant de préserver les sols ou de recycler les minéraux sont encouragées. Cela se traduit sur le terrain par la mise en place de rotations culturales les plus indépendantes vis-à-vis de l'extérieur allant jusqu'à une dizaine d'années (enfouissement des résidus ; insertion de cultures de légumineuses pures ou en mélanges chez tous les agriculteurs). Mais aussi en intégrant des cultures à enracinement profond pour favoriser le phénomène de remontée biologique des éléments pour 4 exploitations (trèfles, radis fourragers, navettes, agroforesterie, jachères de légumineuses broyées (trèfle, vesce, luzerne)), et en limitant les pertes de nutriments par lixiviation ou érosion grâce à des engrais verts (3 exploitations), et des techniques de couverture permanente du sol avec des semis de prairies sous couvert de céréales (10 exploitations).

Concernant spécifiquement le P, il est source de questionnement chez les agriculteurs quant à sa disponibilité dans leurs sols argilo calcaires. Seul quelques uns d'entre eux ont observés des symptômes de carence sur leurs cultures (feuilles rouges sur maïs). Cependant, ces symptômes n'ont jamais été associés à des pertes de rendements. Le Phosphore n'est pas considéré comme problématique pour le moment, la difficulté venant plus de la gestion des adventices et des maladies.

3.2. Les bilans entrées/sorties de P à l'exploitation agricole

3.2.1. Description des bilans de P à l'exploitation agricole

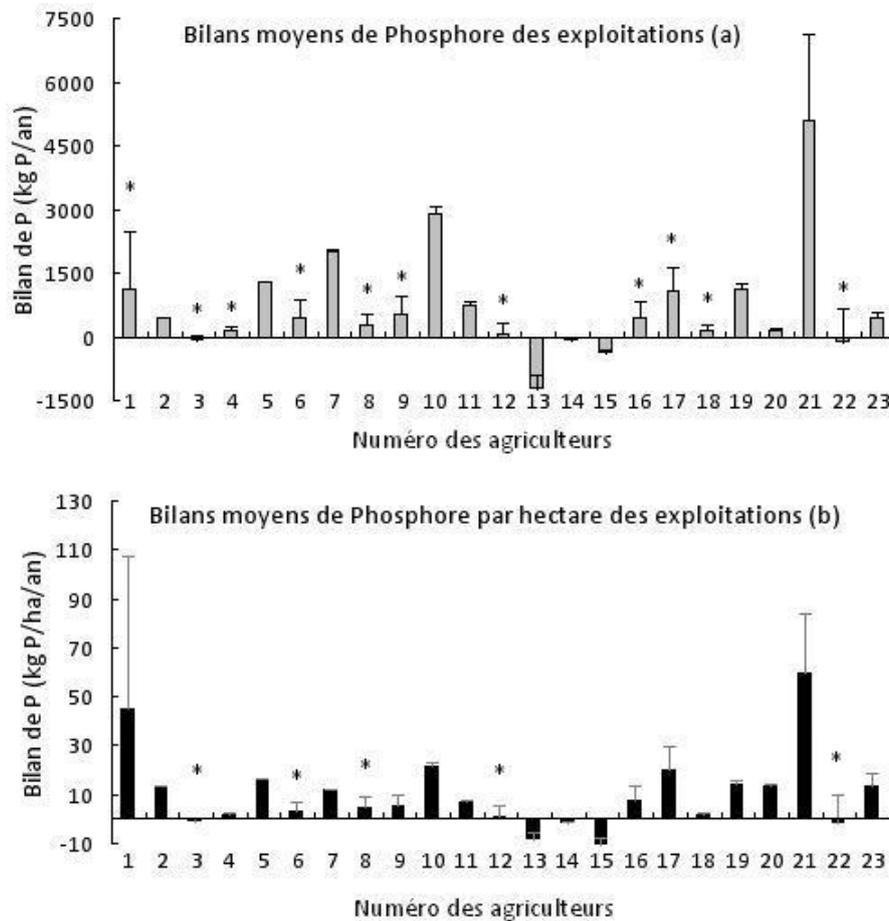


Figure 8: Bilan moyen de Phosphore pour chaque exploitation agricole étudiée. (les bilans sont exprimés en kg P/an (a) puis en kg P/ha/an (b) sur une période de trois ans ; les écarts types sont symbolisés par les barres d'erreur ; les individus dont le bilan moyen n'est pas significativement différent de 0 sont signalés par une étoile)

La Figure 8 met en évidence la dépendance des bilans à leur dimension spatiale. La pondération par unité de surface agricole utile (SAU) permet de travailler avec des données plus pertinentes et de diminuer leur variabilité (cf. Méthode des bilans). Les résultats seront donc exprimés en kg P/ha, et non simplement en kg P.

D'une année sur l'autre, pour un même agriculteur, les bilans sont relativement stables, à l'exception des agriculteurs 1 et 21. Pour le premier, la variation de stock n'a pas été prise en compte pour 2008 (stockage d'une quantité de déchets verts inestimable), ce qui explique cette variabilité dans le temps. Pour l'agriculteur 21, la variation de bilan est expliquée par son type d'assolement, car contrairement à 2006 et 2007, la moitié de ses surfaces cultivées n'a pas été fertilisée en 2008 (soja). L'individu 1 a donc été retiré de l'échantillon pour la suite du traitement des bilans à l'échelle de l'exploitation agricole, de même que l'individu 13 qui génère des bilans de P négatifs du fait de son mode de fonctionnement exceptionnel. Jusqu'à cette année, seules les cultures de cette exploitation mixte (vaches laitières et vaches allaitantes) étaient certifiées en AB. La totalité des cultures (grains, fourrages) étaient vendues

sous la certification AB, et les stricts besoins en aliments pour le bétail étaient achetés à des agriculteurs conventionnels.

En comparant ces valeurs moyennes de bilans à 0 il apparaît que seulement 2 exploitations sont significativement déficitaires en P, et 14 sont significativement accumulatrices de P. Ce qui porte à 5 le nombre d'exploitations ayant un bilan phosphorique équilibré (test de Student au risque 5%).

Les exploitations enquêtées génèrent des surplus de P inférieurs à 25 kg P/ha/an, sauf pour une exploitation très accumulatrice, individu 21, du fait d'une utilisation massive de fertilisants organiques dans l'objectif de satisfaire les cultures en azote. En raison de son caractère extrême et afin d'éviter un biais potentiel, cet individu sera aussi écarté des analyses des bilans à l'exploitation (Figure 9). Il faudra garder à l'esprit que même en AB des pratiques peuvent être potentiellement dangereuses pour l'environnement.

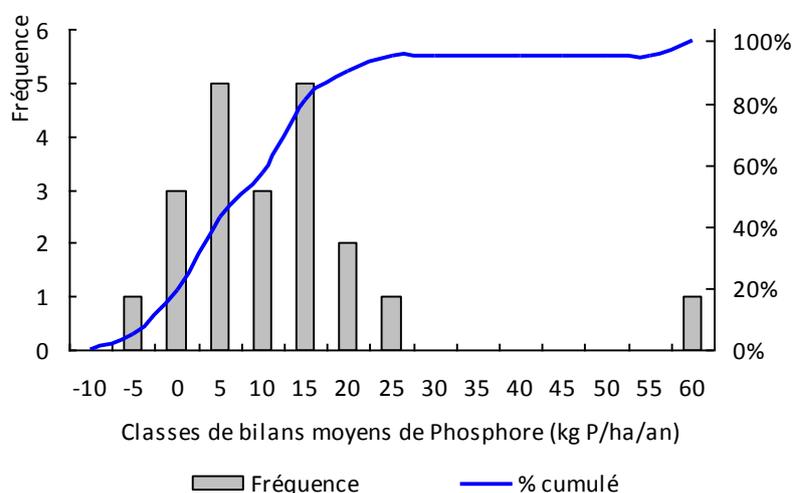


Figure 9 : Distribution des bilans de Phosphore moyens sur 3 ans à l'échelle de l'exploitation agricole.

(les distributions sont exprimées en nombre d'exploitations (axe des ordonnées de gauche) ; le cumul des distributions, en %, est symbolisé par l'axe des ordonnées de droite)

3.2.2. Les déterminants des bilans de P à l'exploitation agricole

Les facteurs principaux de contribution aux bilans sont les entrées de P ($R^2=0,74$), notamment sous forme de MO ($R^2=0,80$) (Figure 10).

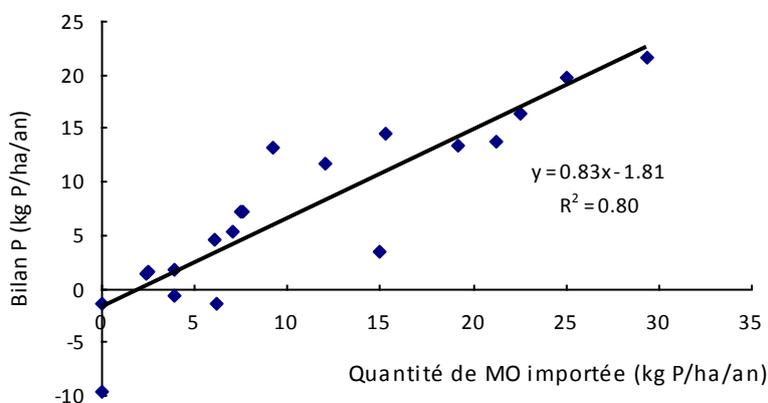


Figure 10: Relation entre le bilan de P et les importations de MO à l'échelle de l'exploitation. (sans la contribution des individus 1, 13 et 21)

Le détail des importations de P, présenté dans la Figure 11, permet de bien illustrer la forte participation des MO aux entrées (engrais de ferme et fertilisants confondus), et par conséquent aux bilans.

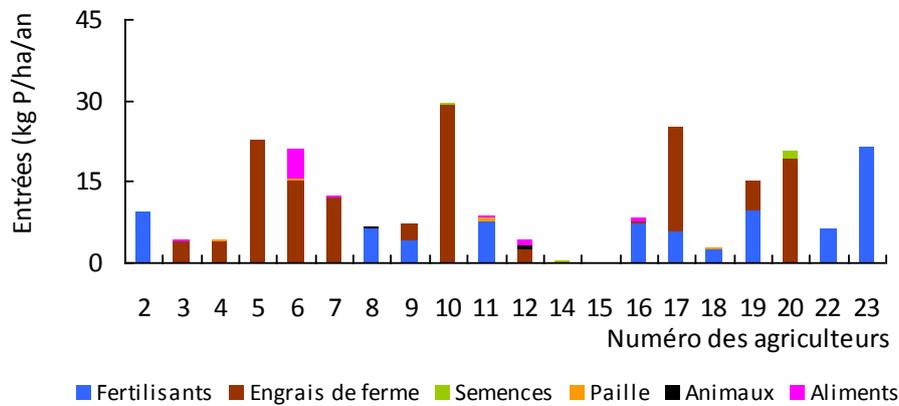


Figure 11 : Détail des quantités moyennes de P entrant dans les exploitations.
(Les engrais de fermes réunissent les engrais de ferme et les autres amendements organiques ; les fertilisants correspondent aux fertilisants organiques du commerce)

Quand nous subdivisons les MO importées en deux classes, que sont les fertilisants organiques du commerce, et les engrais de fermes et autres amendements, aucune d'entre elles ne permet d'expliquer clairement les bilans observés (respectivement $R^2=0,09$ et $R^2=0,45$). Ce résultat est dû aux différences de pratiques entre les agriculteurs. Dans les élevages et en grandes cultures dans le Lot-et-Garonne, il est majoritairement importé des fertilisants du commerce, tandis que les polyculteurs périgourdiens raisonnent presque exclusivement leurs apports avec des engrais de fermes et des amendements organiques (cf. Approvisionnement des exploitations en MO exogènes).

Quant aux sorties, si elles ne permettent pas d'expliquer les bilans ($R^2=0$) (Figure 12), elles peuvent s'expliquer différemment selon le type d'exploitation. En effet, les polyculteurs verront leurs sorties de P guidées par les ventes de produits végétaux (grains, fourrages, fruits, etc.) tandis que pour les éleveurs ce seront les sorties par les animaux et leur produits qui domineront (viande et lait) (Figure 13).

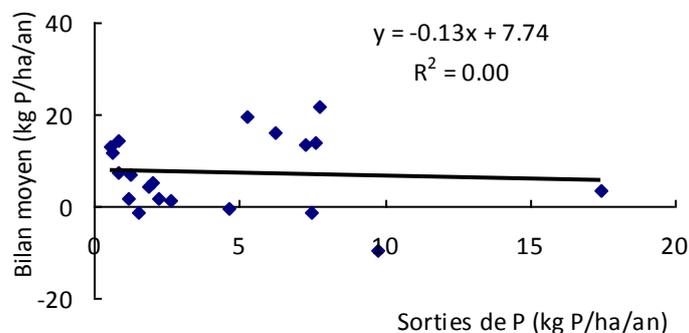


Figure 12 : Relation entre les bilans moyens de P et les sorties moyennes de P du système.

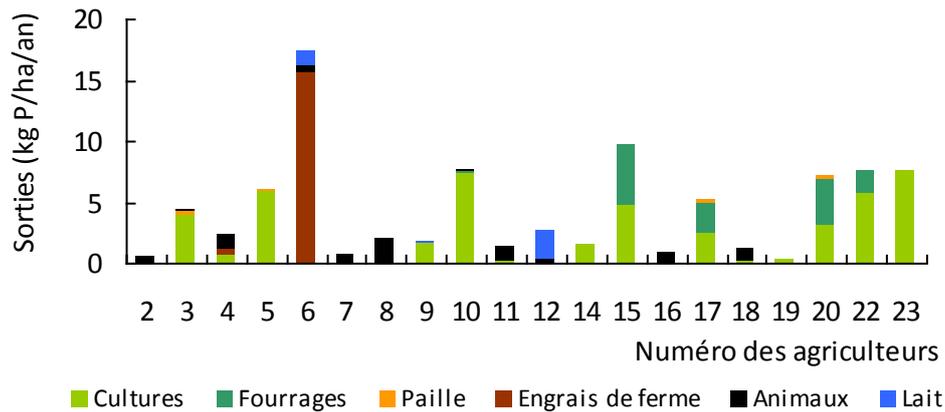


Figure 13 : Détail des quantités moyennes de Phosphore sortant des exploitations.

L'exploitation 6 procède à des échanges de fumier importants chaque année pour approvisionner une champignonnière biologique, qui en retour lui fournit du compost (le retrait ou non de cet individu ne change pas la relation entre les bilans et les sorties de P à l'échelle de l'exploitation).

3.2.3. Effet des orientations de productions sur les bilans de P à l'exploitation agricole

Le Tableau 6 et la Figure 14 abordent la distribution des différents types d'exploitations selon leur bilan phosphorique.

Tableau 6 : Nombres d'exploitations agricoles par tranches de bilans avec ou sans élevage.

(les classes de bilans de P sont exprimées en kg de P/ha en moyenne sur trois ans ; les bilans équilibrés sont des bilans non différents de 0 statistiquement)

	Bilans négatifs		Bilans équilibrés	Bilans positifs	
	< à -5	[-5 ; 0[]0 ; 5]	> à 5
Avec élevage	0	0	3	2	5
Sans élevage	1	1	2	0	6
Total	1	1	5	2	11

Si nous considérons comme équilibrée une tranche de valeurs de bilan de 5 kg P/ha/an autour de 0, nous pouvons recenser 8 cas dans cette situation, dont 5 possèdent un élevage. Ce constat est donc favorable à une plus grande durabilité des systèmes en polyculture élevage vis-à-vis du P.

Comme le montre la Figure 14, la distribution des élevages en matière de bilan phosphaté est beaucoup plus centrée autour de leur moyenne (5,7 kg P/ha/an (*écart type* = 4,1)) que ne le sont les exploitations de grandes cultures (8,63 kg P/ha/an (*écart type* = 10,8)). Malgré la tendance que ces dernières ont à générer des bilans excédentaires de P par rapport aux élevages, la variabilité des pratiques d'entretien de la fertilité ne permet pas d'observer de

différence significative entre ces deux groupes (comparaison de moyenne à un facteur, probabilité critique de 0,44).

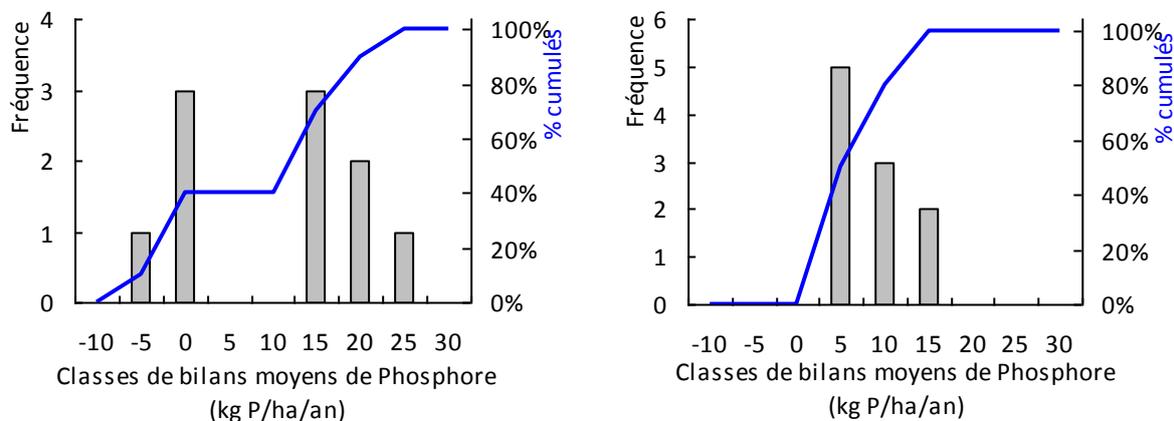


Figure 14: Distribution des bilans de Phosphore moyens sur 3 ans à l'échelle de l'exploitation agricole pour les situations en présence (à droite) ou non d'élevage (à gauche). (les distributions sont exprimées en nombre d'exploitations (axe des ordonnées de gauche) ; le cumul des distributions, en %, est symbolisé par l'axe des ordonnées de droite ; les individus 1, 13 et 21 ne sont pas pris en compte dans l'analyse)

Une seconde distinction a été réalisée entre les exploitations en fonction du type d'élevage pour les éleveurs, et par mixité d'activité ou non pour les céréaliers (Figure 15). Ce qui a conduit aux 4 classes suivantes : grandes cultures pures (Cer ; 6 individus) ; grandes cultures plus une autres activité (arboriculture ou très faible élevage) (Cer+ ; 4 individus) ; petits ruminants laitiers (PRL ; 3 individus) ; vaches allaitantes (VA ; 7 individus).

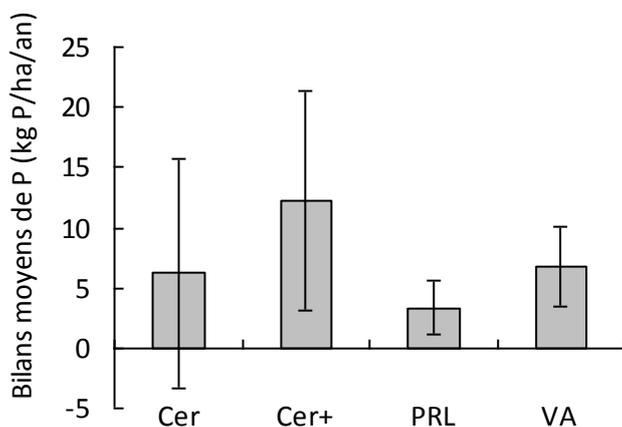


Figure 15 : Classification des exploitations selon leurs orientations de production. (les intervalles de confiance sont symbolisés par les barres d'erreur encadrant les valeurs moyennes des bilans pour les différentes classes)

Malgré la tendance observée envers une meilleure balance phosphorique des exploitations avec élevage, aucune différence significative n'a pu être mise en évidence par cette seconde

classification sur les critères conventionnels d'orientation de production (Analyse de variance à 1 facteur avec une probabilité critique de 0,45).

Ces niveaux de catégorisation simples ont été comparés à une approche de la complexité des exploitations, à l'aide de la variable de connectance, utilisée en écologie pour aborder la complexité des réseaux trophiques.

3.3. Analyse de la dynamique du P au sein des exploitations vues comme des écosystèmes

La variable de connectance, utilisée en écologie pour aborder la complexité des réseaux trophiques, a été appliquée à l'étude de la complexité des exploitations agricoles.

Le Tableau 7 met en avant la différence de complexité entre types d'exploitations. La présence d'élevage leur confère une plus grande complexité, de par un nombre plus grand de liaisons entre compartiments déterminés.

Tableau 7 : Caractérisation de la complexité et de l'efficacité d'utilisation du P par type d'exploitation agricole. (l'efficacité d'utilisation du P est définie par le rapport des sorties et des entrées de P du système concerné, ici l'exploitation ; les valeurs suivies par des lettres différentes au sein d'une même colonne sont significativement différentes au seuil de 5%)

	Connectance	Nombre de nœuds	Nombre de liaisons	Efficacités d'utilisation de P
Avec élevage	0,37 (a)	3.9 (a)	5.4 (a)	34,11 (a)
Sans élevage	0,07 (b)	2,6 (b)	1 (b)	25,28 (a)

La connectance des exploitations n'apparaît pas reliée à l'efficacité d'utilisation du P ou les bilans de P (Figure 16 et Figure 17).

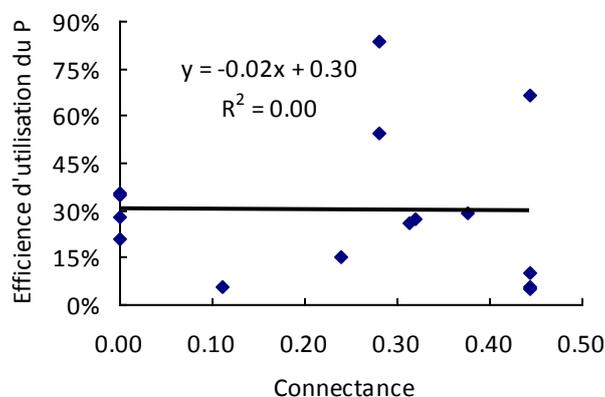


Figure 16 : Relation entre les valeurs de connectance des exploitations et leur efficacité d'utilisation du P.

Lorsque ces variables (ainsi que le cumul de bilan, les entrées et les sorties de P des exploitations) sont soumises à une ACP, l'absence de corrélation apparaît clairement entre la connectance et les variables caractérisant la dynamique du P (Figure 17).

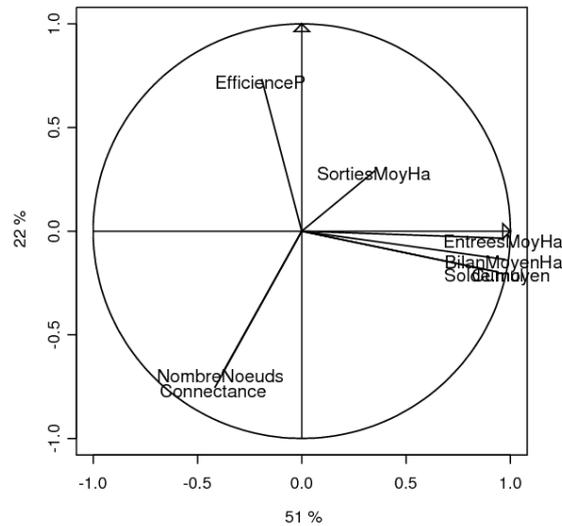


Figure 17 : Projection sur les plans 1 et 2 de l'ACP entre les variables caractérisant la connectance des exploitations (connectance, nombre de nœuds) et la dynamique du P (entrées moyennes, sorties moyennes, bilan moyen, cumul de bilan, efficience du P sur 3 ans par ha).

(les parts de variance extraites par chacun des axes sont indiquées en abscisses et ordonnées)

3.4. Les bilans entrées/sorties de P à la parcelle agricole

3.4.1. Description des bilans de P à la parcelle agricole

Les données présentées sont le résultat de calculs de bilans entrées/sorties de P à l'échelle parcellaire, moyennés sur une période d'étude de 3 à 5 années suivant les cas. Dans 15 exploitations il a été possible d'étudier plusieurs parcelles, et la totalité des parcelles étudiées ont servis au traitement des données.

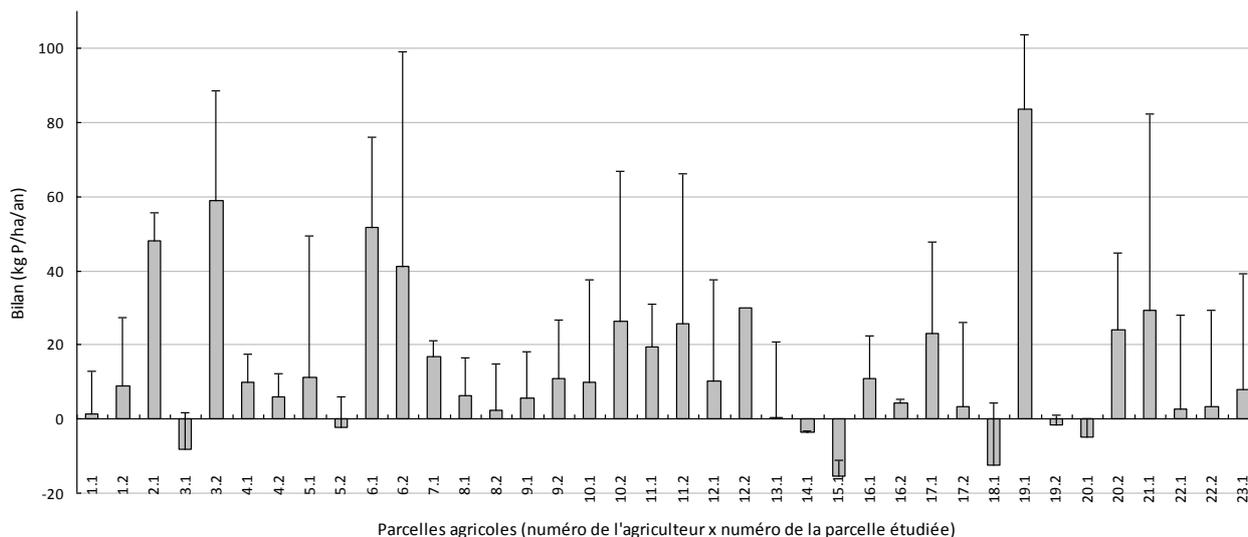


Figure 18 : Représentation des bilans moyens de P des parcelles agricoles en kg P/ha/an. (le premier numéro des identifiants des parcelles correspond au numéro de l'exploitation concernée, le second correspondant au numéro de la parcelle étudiée dans cette exploitation ; les écarts types sont symbolisés par les barres d'erreur)

La diversité des valeurs de bilans est importante entre parcelles, et contrairement aux bilans à l'échelle des exploitations elles le sont aussi dans le temps (Figure 18). Cette diversité s'explique par la présence de certaines cultures où des impasses sont réalisées (légumineuses), ou au contraire d'autres comme le maïs grain qui reçoivent d'importantes quantités de MO. Parmi les 38 parcelles étudiées, 7 ont un bilan moyen de P négatif (de -1 à -15 kg P/ha/an). Le reste des parcelles sont caractérisées par un bilan moyen plus ou moins excédentaire allant de 0 à 83 kg P/ha/an (Figure 19).

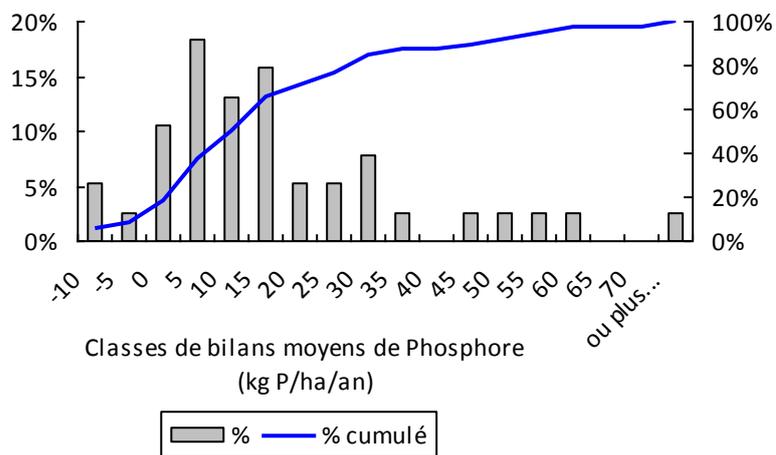


Figure 19 : Distribution des bilans moyens de P calculés à la parcelle. (les distributions sont exprimées en % (axe des ordonnées de gauche) ; le cumul des distributions, en %, est symbolisé par l'axe des ordonnées de droite)

Les calculs des bilans ne sont pas nécessairement faits sur la durée de la rotation, mais sur des durées parfois plus courtes. Cela peut avoir des conséquences sur l'obtention de bilans

négatifs (alors que le calcul n'intègre pas les apports pouvant être faits sur une culture habituellement très fertilisée) ou positifs (cas des individus 3, 11, 12, 18 et 20).

Les agriculteurs générant les bilans à la parcelle les plus positifs sont en général ceux qui raisonnent leurs apports de MO sur la base de leurs fournitures en N (individus 2, 10, 19 et 21), ceux qui apportent souvent des MO (fréquent en présence d'élevage (individus 6 et 7)), ou bien par un retour trop fréquent d'une même culture (blé pour l'individu 17).

3.4.2. Les facteurs explicatifs des bilans de P à la parcelle agricole

De la même façon qu'à l'exploitation agricole, les bilans de P à l'échelle de la parcelle s'élaborent principalement par les entrées dans le système ($R^2=0,93$), et en particulier les entrées de MO ($R^2=0,94$) (Figure 20).

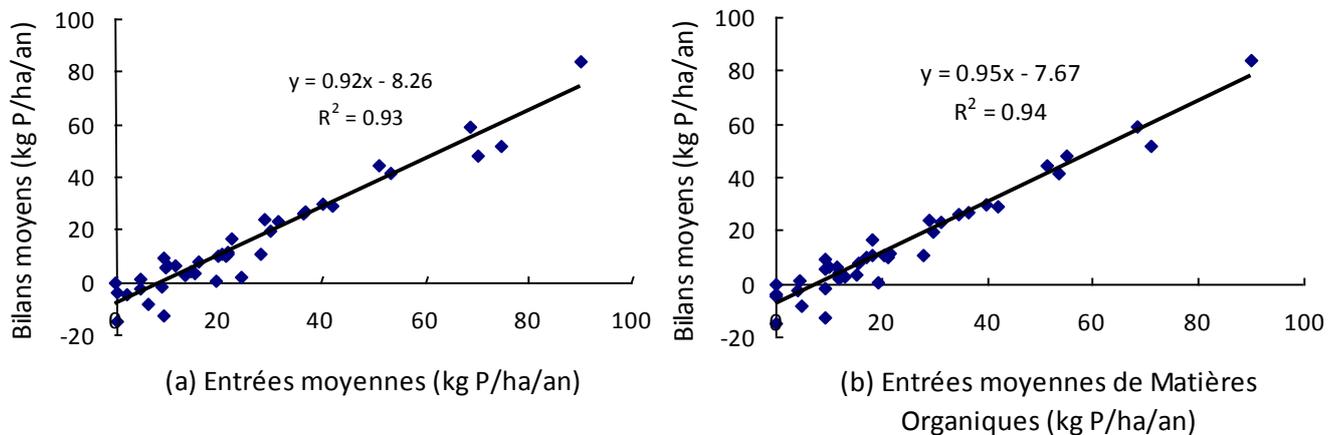


Figure 20 : Relations entre les bilans moyens à la parcelle et les entrées de P (a) ou les entrées de MO seules (b).

Les sorties ne permettent pas d'expliquer les bilans aux parcelles ($R^2=0,02$). Ceci peut s'expliquer par la présence de cultures de légumineuses qui ne reçoivent en général pas d'apports. Un autre facteur en relation avec les bilans est la fréquence d'apport de MO dans les parcelles ($R^2=0,47$). Plus une parcelle recevra des apports fréquemment et plus son bilan sera positif, ceci vient conforter l'observation de bilans excédentaires sur des parcelles en situation d'élevage qui ont tendance à recevoir plus souvent des MO qu'en l'absence d'élevage.

3.4.3. Effet des orientations de production et relations entre échelles d'étude

Dans cette analyse les exploitations 1, 13 et 21 ne sont pas prises en considération pour les raisons citées dans la partie relative aux bilans entrées/sorties de P à l'échelle des exploitations. Il n'existe pas de relation significative entre les résultats de bilan à la parcelle et les types d'exploitation définis par les catégories polyculture sans élevage vs polyculture avec élevage (probabilité critique = 0,58) (Figure 21). Il n'existe pas non plus de relation entre les bilans entrées/sorties de P calculés à l'échelle de l'exploitation et à la parcelle agricole (Figure 22).

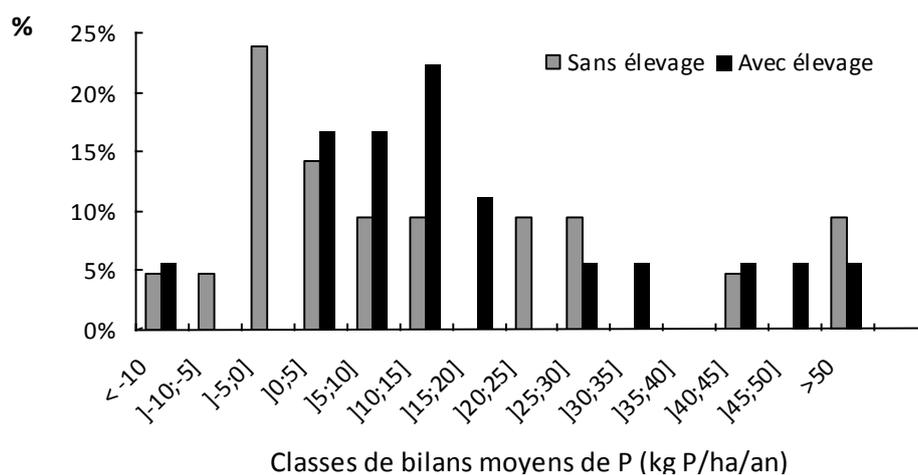


Figure 21 : Distributions comparées des bilans moyens des parcelles suivant le type d'exploitation agricole. (les distributions sont exprimées en % de l'effectif total par type d'exploitation agricole)

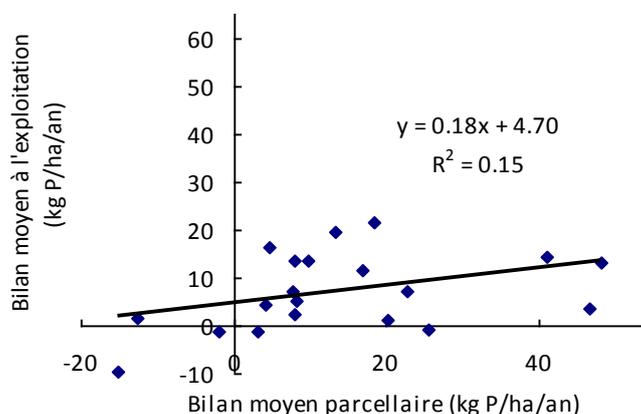


Figure 22 : Relation entre les bilans moyens de P à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation. (les bilans des couples de parcelles d'une même exploitation ont été moyennés afin de les mettre en relation avec les bilans à l'exploitation)

Plusieurs hypothèses permettent d'expliquer ce résultat. La première tient au fait que les parcelles étudiées étaient toutes en cultures et excluaient les prairies permanentes que l'on rencontre majoritairement dans les exploitations d'élevage. Ces parcelles étudiées recevaient donc des quantités significatives de P sous forme d'engrais et d'amendements, à la différence des prairies permanentes, en général peu fertilisées. Une spécificité importante des exploitations d'élevage a donc ainsi été gommée par la stratégie d'échantillonnage des parcelles. Nous pourrions espérer avoir une meilleure relation entre ces deux échelles de bilan en prenant en compte un échantillon représentatif de parcelles (supérieur à deux) dans chaque exploitation. La seconde hypothèse tient au fait que les pratiques d'approvisionnement en MO exogènes aux exploitations viennent estomper les différences attendues quant aux ressources en P disponibles entre exploitations d'élevage vs exploitations sans élevage. Cependant, sur les 7 parcelles caractérisées par un bilan entrées/sorties de P négatif, 6 appartiennent à des

exploitations sans élevage (toutes réserve gardées sur le biais engendré par la portion de rotation prise en compte pour le calcul du bilan).

3.4.4. Effet de la gestion à la sole ou à la rotation

Nous avons vu dans la partie consacrée aux pratiques de gestion de la MO que nous pouvions distinguer deux stratégies différentes en matière d'entretien de la fertilité, qui sont, la gestion à la sole, la plus fréquente, et la gestion à la rotation, qui concerne seulement quelques exploitations (6 sur les 23 étudiées, la totalité ne possède pas d'élevage).

Il n'est pas aisé de mettre une relation claire entre ce critère et les bilans de P à la parcelle pour plusieurs raisons. La première étant que souvent les bilans n'ont été étudiés sur un faible nombre d'années (portion de la rotation, accidents de culture), la seconde vient du fait que dans les deux stratégies nous trouvons des bilans équilibrés. Il n'y a donc pas d'effet d'une stratégie ou de l'autre, mais sans doute que plus qu'une de ces deux stratégies, ce sont les pratiques des agriculteurs qui peuvent être en cause.

3.4.5. Variabilité de bilans de P intra exploitations

L'étude de 15 couples de parcelles met en avant une variabilité des bilans interne aux exploitations. Ces variations sont expliquées par l'élaboration d'un schéma de redistribution de la fertilité, qui est propre à chaque agriculteur au sein de leur exploitation.

Les différences de bilans observées entre les parcelles d'une même exploitation sont en moyenne de 20 kg P/ha/an (avec un écart type de 24 kgP/ha/an). Ces stratégies de redistribution de la fertilité sont le fruit de la combinaison des contraintes qui s'imposent aux agriculteurs et de leurs objectifs. Parmi les contraintes à l'origine de ces gestions différentielles, la plus communément citée est l'éloignement des parcelles, 6 situations sur 15, dont 4 en situation d'élevage. Ce qui confirme le fait que les éleveurs sont plus sensibles à cette contrainte d'éloignement que les polyculteurs sans élevage. L'entretien de la fertilité de ces parcelles se traduit par des apports moins fréquents de MO, avec souvent une substitution des engrais de ferme par des fertilisants organiques du commerce (3/6 apportent des farines de viandes sur ces parcelles éloignées). Les bilans des parcelles éloignées sont plus faibles dans le cas où il n'y a pas de substitution des effluents d'élevage par des fertilisants plus concentrés et faciles à transporter (couples de parcelles 4, 5 et 6).

Dans deux autres situations, les différences observées entre parcelles d'un même couple sont le simple fait d'une importante différence de système de culture (kiwis - grandes cultures pour l'exploitation 19 ; jachère permanente (20 ans) – grandes cultures pour la 14).

Cependant, si pour quelques exploitations agrobiologiques les causes de ces stratégies de redistribution de la fertilité sont identifiables, ce n'est pas le cas pour toutes. Le fait de ne pas prendre en compte la rotation culturale dans son ensemble conduit à une confusion d'effet, et la différence entre bilans d'un même couple de parcelle n'est plus interprétable en terme de contraintes. C'est le cas pour les dernières situations étudiées, où les différences de bilans sont moins le fait des pratiques agricoles que du moment considéré de la rotation sur la parcelle étudiée.

3.4.6. Disponibilité du P dans les sols des parcelles étudiées

Les valeurs de bilans ne sont pas suffisantes quant à l'évaluation de la durabilité d'un système en terme de durabilité de la fertilité des sols. Il est judicieux de combiner ces approches avec des mesures de fertilité des sols.

La Figure 23 donne une vision d'ensemble de la fertilité des sols étudiés. Environ 90 % des sols présentent une disponibilité en P inférieure à 25 mg/kg de terre sèche, dont certains atteignent des valeurs critiques extrêmement faibles. Cependant, ces valeurs de disponibilité en P estimées par la méthode Olsen nécessitent une interprétation par type de sol. Pour la principale famille de sols rencontrée (argilo calcaires) les valeurs de disponibilité de P sont inférieures, dans 72 % des cas, au seuil utilisé en agriculture conventionnelle définissant la teneur en dessous de laquelle les rendements des cultures risque d'être pénalisé (L1p³ des références régionales et fertilisation raisonnée (REGIFER 1999)).

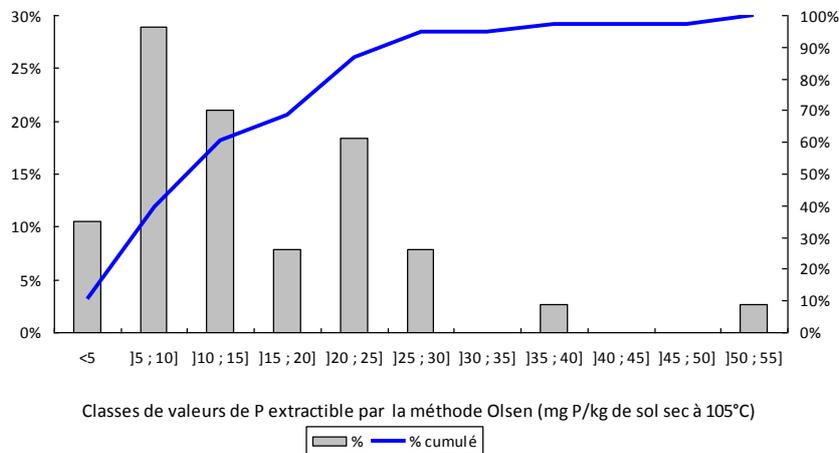


Figure 23 : Distribution des disponibilités en P (en mg P/ kg de sol sec à 105°C) dans les sols des parcelles étudiées. (P extrait par la méthode Olsen ; les distributions sont exprimées en % (axe des ordonnées de gauche) ; le cumul des distributions, en %, est symbolisé par l'axe des ordonnées de droite)

La disponibilité du P dans les sols est mal reliée aux pratiques culturales (Figure 24). Cette disponibilité n'est pas vraiment corrélée au bilan parcellaire moyen ou au cumul de P sur la période d'étude (Figure 24a et Figure 24b). Elle n'est pas corrélée non plus à l'antériorité de conversion en AB des parcelles (Figure 24c).

³ L1p : Cette valeur seuil de P extractible par la méthode Olsen correspond à une valeur de P biodisponible permettant aux cultures non exigeantes d'atteindre, sans fertilisation complémentaire et avec une fréquence au moins égale à 9 cas sur 10, 95% du rendement qui serait accessible en condition d'alimentation non limitante. Pour des sols argilo calcaires cette valeur de L1p est de l'ordre de 45 mg de P₂O₅/kg de sol, soit 19,65 mg P/kg de sol.

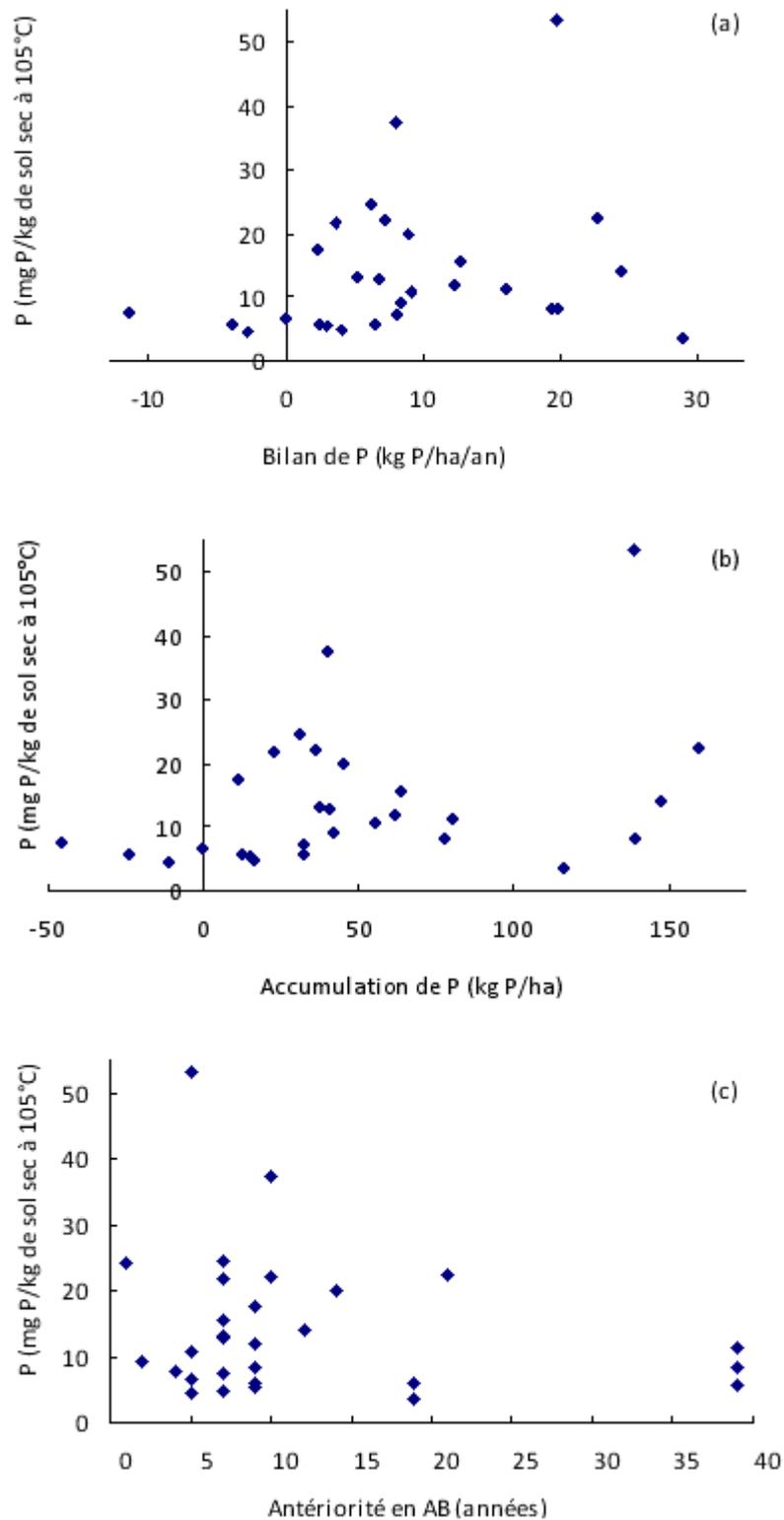


Figure 24 : Relations entre la biodisponibilité du Phosphore (méthode d'extraction Olsen) et les antécédents des parcelles en sols argilo calcaires: relation entre la biodisponibilité du P et (a) les bilans moyens entrées/sorties sur la période d'étude, (b) les quantités de P accumulées sur la période d'étude et (c) l'antériorité des parcelles en AB.

Il faut cependant garder à l'esprit que les données relatives aux pratiques réalisées sur ces parcelles ont été collectées sur des périodes de seulement quelques années alors que la dynamique du P est lente et nécessite une ou plusieurs décennies pour se traduire en terme de disponibilité du P dans les sols. Dit autrement, il aurait fallu calculer des bilans parcellaires sur une plus longue période (au moins 10 ou 15 ans) pour espérer observer une relation avec la disponibilité en P mesurée.

De plus, il faut garder un regard critique quant aux valeurs de P extractible dans les sols analysés, pour trois raisons. La première tient au fait que ces analyses chimiques ne prennent pas en compte d'autres phénomènes relatifs à la dynamique du P dans le sol (activité rhizosphérique, champignons mycorhiziens, rôle de la MO, etc.) dont on peut imaginer qu'ils ont un rôle accru dans les systèmes de culture en AB. La deuxième tient au fait que les mesures doivent être interprétées au regard des dates des prélèvements au sein de l'année (avant ou après un fort apport de P par exemple) ou sein de la succession culturale (avant ou après une phase de reconstruction de la fertilité par une longue jachère par exemple). La troisième raison tient à la relative homogénéité des sols dans la classe "argilo calcaire" que nous avons caractérisée : une subdivision plus fine de cette classe (selon la texture par exemple) aurait été nécessaire, mais peu compatible avec le faible effectif de parcelles étudié.

4. DISCUSSION

Le travail que nous avons mené a consisté à caractériser et à évaluer les pratiques d'entretien de la fertilité phosphorique des sols de grandes cultures en AB.

La discussion de l'étude s'oriente selon 4 axes majeurs, qui sont en premier lieu une critique du travail réalisé, avec ses perspectives d'amélioration en terme de méthodologie et d'outils utilisés. Dans une deuxième partie, nous reviendrons sur les hypothèses énoncées en début d'étude, avant de discuter les résultats obtenus au regard de leur cohérence et de la littérature internationale, pour finir sur les perspectives possibles de ce travail, en matière de recherche ou d'application.

4.1. Critique du travail réalisé

Nous allons revenir dans cette partie, de manière critique, sur les principales étapes de la production de ce travail : méthodologie mise en œuvre, outils mobilisés et échantillonnage.

4.1.1. Méthodologie

Une des premières critiques que nous pouvons faire à propos de ce travail est le degré d'exactitude des données recueillies au cours des enquêtes de terrain, qui font souvent l'objet d'approximations de la part des agriculteurs. Ceci est dû au fait que les agriculteurs devaient se souvenir des systèmes de culture qu'ils avaient pratiqués plusieurs années auparavant. Ainsi, les valeurs des rendements et quantités de matières achetées ou épandues peuvent être entachées d'imprécision. Cela pose la question de la pertinence de cette méthode pour l'acquisition de données quantifiées sur le long terme. Ce compromis entre l'antériorité d'étude et la précision des souvenirs des agriculteurs a été le facteur limitant principal dans ce travail. L'amélioration de la qualité des données collectées pourrait passer par un suivi plus régulier des exploitations (annuel ou bisannuel), ainsi que par la tenue à jour d'un carnet de bord par les agriculteurs pouvant s'engager dans une telle démarche de suivi.

Une seconde critique concerne la longueur de la période étudiée pour élaborer les bilans entrées/sorties. En effet, à l'élaboration de la méthode, nous nous étions fixés de remonter dans le temps sur quelques années. Cependant, l'échelle temporelle d'étude qui s'avère la plus pertinente est celle de la rotation culturale. Elle permet en effet de tenir compte de l'adaptation des pratiques des agriculteurs aux successions de culture pratiquées. On peut donc se poser la question de ce qu'aurait apporté cette étude sur une période plus longue de quelques années. Cela nous aurait sans doute permis de comparer entre elles des rotations en matière de durabilité de la fertilité phosphorique des sols au sein et entre les exploitations étudiées.

Cette étude a par ailleurs reflété une image de la durabilité de gestion du P à un instant donné. Cependant, les systèmes d'exploitation évoluent au fil du temps (réintroduction d'ateliers d'élevage, reconception du système d'exploitation vers des systèmes plus autonomes vis-à-vis de l'extérieur, augmentation de la part du système fourrager avec une grande prédominance des prairies en situation d'élevage, etc.). Il serait donc intéressant de reconduire ce travail sur une période plus longue, sur ces mêmes exploitations en portant un regard sur les

conséquences de ces évolutions au niveau de la durabilité de l'entretien de la fertilité phosphorique des sols.

4.1.2. Outils utilisés

Le calcul des bilans entrées/sorties de P est un des outils principaux utilisés dans ce travail, dont un des intérêts est le couplage de deux échelles d'étude (l'exploitation et la parcelle). Ces bilans sont calculés à l'aide de compositions de référence dont on sait que les valeurs peuvent varier dans le temps et d'une exploitation à l'autre (teneur en P dans les engrais de ferme ou dans les organes récoltés par exemple). Dans le calcul de ces bilans entrées/sorties, les systèmes étudiés sont considérés comme des boîtes noires, et la lumière n'est pas faite sur le devenir des éléments accumulés (fixation du P dans le sol ou transfert vers les milieux naturels), de même que sur l'homogénéité de leur répartition au sein de ce système. De plus, cet outil ne prend pas en compte la temporalité de la libération du P des différentes matières utilisées en AB dont on sait que la mise à disposition pour les plantes est plus lente. Cette pondération pourrait être intéressante pour améliorer la pertinence de la méthode aux systèmes agrobiologiques, mais serait sans doute antagoniste à son utilisation en routine du fait de l'augmentation de sa complexité.

La méthode des bilans est un outil facile à mettre en œuvre, cependant elle n'est pas suffisante pour juger de la durabilité d'un système car elle ne considère que les flux qui le traversent, sans donner d'indication sur l'état des stocks et de la capacité de stockage de ce système. C'est pourquoi nous avons couplé cette approche avec des mesures de la fertilité des sols.

L'indicateur que nous avons utilisé pour estimer la fertilité des sols est la quantité de P extractible par la méthode Olsen. Au delà des problèmes d'utilisation de cette méthode (la nature du P extrait n'est pas vraiment connue) et de sa mise en place (période de prélèvement des sols dans l'année et au sein de la rotation), nous pouvons nous poser la question de la pertinence de cet indicateur pour l'évaluation de la disponibilité de P dans les systèmes agrobiologiques, où l'importance d'autres mécanismes influant la dynamique de cet élément dans le sol peuvent être non négligeable (rôle de la MO, mycorhizes, activité biologique, importance du sous sol, etc.). Cette étude ouvre sur des questions de recherche comme la meilleure compréhension de la dynamique du P en AB. Cette compréhension accrue devrait permettre de développer un indicateur de disponibilité pertinent pour ces systèmes prenant en compte ces facteurs.

4.1.3. L'échantillonnage

Un des intérêts de l'étude a été d'essayer d'appréhender la diversité des systèmes agricoles agrobiologiques, sans la comparer avec d'autres modes de production comme c'est souvent le cas. Malgré un nombre peu conséquent d'exploitations enquêtées, nous avons tout de même réussi à couvrir une diversité d'exploitations non négligeable de la Dordogne. Nous pouvons donc penser que nos résultats reflètent la situation des exploitations que l'on peut rencontrer en dans ce département. Une limite à la généralisation des résultats est le fait que les échanges de matières entre exploitations (paille, fumiers, composts) sont bien structurés en Dordogne, alors qu'ils ne le sont pas partout autant. Ainsi, nous pouvons nous interroger sur la

transposition des résultats de ce travail à une région plus céréalière où la densité d'élevage et la disponibilité en MO sont plus faibles. Par exemple, les quelques entretiens menés en Lot-et-Garonne, département plus céréalière, nous ont montré des pratiques d'échanges de matières fertilisantes beaucoup plus faibles. Dans une autre perspective de transposition de ce travail, il ne serait pas inintéressant d'élargir l'étude à des systèmes viticoles ou arboricole par exemple pour voir ce qu'il en retourne.

4.2. Retour sur les hypothèses de l'étude

Dans cette partie nous allons revenir sur les hypothèses que nous avons formulées au début de l'étude.

En accord avec ce que nous avons pensé, les agrobiologistes raisonnent la fertilité de leurs sols de manière globale avec des matières organiques (engrais de fermes, autres amendements et des fertilisants du commerce) et non élément fertilisant par élément. Cependant on distingue toujours des préoccupations envers l'azote, et les apports sont rarement raisonnés à l'échelle de la rotation culturale, mais en fonction de la culture implantée. L'hypothèse 1 est ainsi partiellement vérifiée. Les cultures à fortes valeurs ajoutée comme le kiwi, le maïs grain et le blé tendre reçoivent de grandes quantités de MO, et donc de P.

Les quantités apportées ne se basent pas sur des analyses de sols qui sont considérées comme inadaptées à l'AB, et les dernières analyses pratiquées sont assez anciennes. La majorité des agriculteurs sont plus ouverts à des approches plus systémiques comme celle d'Yves Hérody par exemple, cependant ils n'y font pas tous appel. L'hypothèse 2 est donc vérifiée.

De manière générale les bilans calculés sont équilibrés à faiblement positifs, et les cas problématiques (bilans négatifs ou très positifs) sont observés en situation sans élevage. L'hypothèse 3 n'est donc vérifiée qu'en partie : ce n'est pas la seule présence ou absence d'élevage au sein de l'exploitation qui détermine la valeur du bilan de cette exploitation. Il convient en fait de tenir compte des pratiques développées pour estimer ces valeurs.

Il n'existe pas de relation simple entre les bilans à l'exploitation et la parcelle agricole, ce qui invalide l'hypothèse 4. Les bilans à l'exploitation ne sont pas plus expliqués par la complexité du fonctionnement des exploitations, ce qui invalide l'hypothèse 5. Cela est dû à la mise en place de schémas de redistribution de la fertilité au sein des exploitations qui sont fonctions des systèmes de culture ou d'autres contraintes comme l'éloignement des parcelles (l'hypothèse 7 est donc validée).

Les résultats des mesures de disponibilités ne sont pas fonction de l'antériorité des parcelles en AB (invalidation de l'hypothèse 6). Cela est dû au fait que les bilans ne sont pas structurellement négatifs en AB mais dépendent des pratiques de gestion de la MO développées par les agriculteurs. L'explication de ces disponibilités reste difficilement accessible avec des données récoltées sur le court terme (bilans de P, cumul de P par exemple) : il faudrait rallonger la période d'étude pour mieux expliquer les valeurs observées.

En conclusion, les hypothèses de départ sont partiellement validées, en particulier celles relatives à l'articulation entre échelles d'étude. Il faudrait d'avantage mettre l'accent sur l'étude des pratiques de gestion de la MO pour mieux comprendre les bilans observés.

4.3. Retour critique sur les résultats

4.3.1. Les bilans

Ce travail met en évidence des bilans de P équilibrés à positifs dans la plupart des exploitations agrobiologiques étudiées, ce résultat est moins évident pour le travail à l'échelle des parcelles agricoles. Dans la littérature internationale il est souvent fait état de bilans de P négatifs que ce soit à l'exploitation agricole ou à l'échelle de la parcelle (Ekholm et al., 2005 ; Watson et al., 2002 ; Cornish, 2009 ; Martin et al., 2007 ; Oehl et al., 2002, Pellerin et al., 2006a). Cependant nos résultats sont en accord avec les travaux d'autres auteurs comme Obörn et al. (2005) ou Hansen et al. (2001). Ces différences de résultats peuvent se surmonter de deux façons : la première tient au fait que les systèmes d'étude ne sont peut-être pas décrits de la même manière dans toutes les études. De même pour les hypothèses, valeurs de références, fiabilité des données collectées qui peuvent différer. Il faudrait donc, avant toutes choses, s'assurer de la pertinence des comparaisons, et pourquoi pas réfléchir à une harmonisation des méthodes de bilans pour faciliter ces comparaisons (Schröder et al., 2004 ; Tunney et al., 2003). La seconde s'explique par la différence entre systèmes d'études, notamment en ce qui concerne la disponibilité en MO, qui n'est pas la même dans des zones d'études où la densité d'élevage y est faible (zones céréalières du Canada et d'Australie). Nous n'avons pas pu mettre en évidence une réelle différence entre les exploitations avec ou sans élevage, même si les situations les plus sensibles (bilans entrées/sorties négatifs ou très positifs) concernent principalement les exploitations sans élevage, du fait de leur dépendance vis-à-vis de l'extérieur pour l'approvisionnement en MO (Berry et al., 2003).

Comme nous l'avons exprimé précédemment, la présence ou non d'animaux ne permet pas d'interpréter les bilans entrées/sorties de P. Ces bilans sont principalement déterminés par les entrées de MO dans les systèmes (exploitations agricoles et parcelles), ce qui est en accord avec Cornish (2009), Berry et al. (2003) et Watson et al. (2002). Plus que d'essayer de catégoriser les exploitations agricoles par orientation de production, il serait plus pertinent d'approfondir la piste des pratiques des agriculteurs en matière de gestion de la fertilité des sols, comme le souligne Cornish (2009), Watson et al. (2002) et Ekholm et al. (2005), et donc pourquoi pas de les classer selon ce critère (intensivité, extensivité par exemple).

4.3.2. Effet de la complexité des exploitations agricoles sur leur valeur de bilan

La complexité des exploitations, que nous avons caractérisée par la connectance de leur réseau, n'a pas permis d'expliquer les valeurs prises par les bilans. Ceci peut s'expliquer par le fait que les liaisons entre compartiments n'ont été que qualitatives. Une démarche similaire appliquée à l'azote a été employée par van Beek et al. (2009) pour appréhender son recyclage dans des exploitations agricoles kényanes. La variable utilisée, correspondant au rapport entre la quantité d'éléments recyclée au sein de l'exploitation et le nombre de flux internes pour cette même exploitation, caractérisait le taux de réutilisation de l'azote. Les auteurs ont mis en

avant une relation positive entre cette variable et l'efficacité d'utilisation de l'azote. Cependant, le lien avec le bilan azoté à l'échelle de l'exploitation reste faible et nécessite plus de recherche.

Il aurait été intéressant de pouvoir pondérer les flux entre compartiments par les quantités de P et leur fréquence, ce qui aurait pu nous aider à mieux discriminer les exploitations par une meilleure approche de la fonction de recyclage du P.

Ainsi, notre démarche est revenue indirectement à faire deux classes qui correspondent à celles des orientations de production, c'est-à-dire avec ou sans élevage. L'une avec des valeurs de connectance relativement élevées, caractérisant les nombreux échanges entre compartiments des exploitations avec élevage, et l'autre avec des valeurs plutôt très faibles, souvent nulles des exploitations sans ou avec très peu d'élevage.

Cependant, en écologie la connectance repose sur le principe de redondance fonctionnelle et de substitution des relations quand un compartiment disparaît, c'est ce principe qui est à la base de l'hypothèse de la stabilité des réseaux trophiques complexes (Lévêque, 2001). Dans une exploitation agricole, les liaisons entre compartiments (systèmes de culture et animaux) ne sont pas autorégulées comme dans un réseau trophique. En effet, la présence de l'homme et de l'élevage, joue un rôle prépondérant dans le fonctionnement et l'élaboration de la complexité du réseau de l'exploitation agricole (production et redistribution des effluents par exemple). Si nous voulons poursuivre notre démarche analogique, nous pouvons comparer respectivement l'agriculteur et les animaux à des espèces architecte et clé de voûte dans les écosystèmes. Ces questions de la fonction de la complexité des exploitations sur leur bilan entrées/sorties nécessitent d'autres recherches.

4.3.3. Relation entre bilans de P à différentes échelles

Nos résultats ont montré l'absence de relation simple entre les bilans observés à l'échelle de l'exploitation et des parcelles. Si logiquement ces deux échelles sont inter-dépendantes, l'absence de relation simple entre ces échelles d'étude nous oriente sur l'importance des transferts internes de P, et notamment des schémas de redistribution de la fertilité au sein des exploitations. Il semblerait plus pertinent d'étudier un échantillon de parcelles plus représentatif de chaque exploitation pour obtenir une relation plus significative. Nous pouvons imaginer étudier une parcelle par système de culture, en pondérant par leur importance relative au sein de l'exploitation par exemple. Selon Berry et al. (2003), cette approche est suffisante en l'absence d'élevage, mais l'échelle de l'exploitation est indispensable dès lors qu'il y a présence d'un atelier animal, et notamment d'importations d'aliments.

4.3.4. Disponibilité du P dans les sols agrobiologiques

Les mesures de disponibilité que nous avons réalisées viennent appuyer la thèse que le P est moins disponible en AB qu'en systèmes de culture conventionnels d'après l'indicateur utilisé (Pellerin et al., 2006a ; Oehl et al., 2002). Cependant, aucune baisse de rendement n'a été observée chez les agriculteurs depuis des années, ce qui est en accord avec le fait que les cultures profitent de la fertilisation héritée des sols (Cornish, 2009 ; Watson et al., 2002), et

pose aussi la question de la pertinence de l'application des indicateurs conventionnels à l'AB. Nous n'expliquons que très peu ces valeurs de disponibilité de P dans les sols à l'aide des valeurs de bilan, d'accumulation de P ou d'antériorité de conversion en AB. Il serait pertinent de se pencher sur la question de la spéciation du P lors de son stockage dans les sols suite à des apports de MO (exemple de disponibilité faible pour des parcelles à bilan très positifs), ainsi que sur les études de longue durée, sur des sols bien caractérisés, plus à même d'aborder les questions relatives au P dont la dynamique est très lente.

4.4. Perspectives du travail réalisé

Ce travail représente un tout premier outil d'étude de la durabilité des pratiques d'entretien de la fertilité des sols en AB. Il peut représenter un intérêt pour des structures de développement comme AgroBio Périgord et soulève aussi des questions de recherche.

4.4.1. Applications

La méthodologie utilisée est simple d'utilisation et de compréhension, et le travail réalisé peut faire foi d'état initial pour AgroBio Périgord dans le cas de la mise en place d'un suivi des exploitations étudiées. Notre travail apporte un outil (le bilan, à différentes échelles), une base de données associées (sur les compositions en P de nombreux produits agricoles, ce qui facilite grandement cette démarche) et une application à plusieurs cas d'études représentatifs.

Ce genre d'étude et de méthodologie peut-être utilisée à des fins d'évaluation et de communication du fonctionnement des exploitations auprès des agriculteurs, dans le but de définir, concevoir ou d'améliorer des systèmes de productions suite à une conversion ou non. Nous pouvons aussi imaginer que cet outil serve de base à la régulation des échanges de matières entre agriculteurs en quantifiant les éléments échangés.

4.4.2. Question de recherche

Ce travail a permis de mettre en évidence une dynamique d'échange de matières (fumiers, composts, paille, etc.) entre agriculteurs au sein de la zone d'étude. Ce constat pose la question de l'étude et de la compréhension des flux de minéraux en AB à plus grande échelle, entre exploitations ou avec des collectivités et entreprises agro-alimentaires locales.

De plus, comme nous l'avons déjà mentionné, ce travail met la lumière sur le besoin d'un indicateur pertinent pour l'évaluation de la disponibilité du P dans les sols en AB.

5. CONCLUSION

L'AB fait partie des voies possibles qui s'offrent à nous dans la perspective de recherche de durabilité au sens large de la production agricole. Cependant, sa durabilité est remise en cause, notamment concernant l'entretien de la fertilité phosphorique des sols.

Le travail effectué met en évidence la diversité de l'AB, tant par les systèmes agricoles rencontrés (cultures pratiquées, successions culturales, types d'élevage), que par les pratiques agricoles employées en terme d'entretien de la fertilité des sols (types de MO utilisés, quantités épandues, raisonnement à la sole ou à la rotation, etc.).

Les bilans des exploitations agrobiologiques étudiées sont en majorité positifs (dans 90% des situations étudiées), et ont tendance à être plus équilibrés en présence d'élevage. Seulement, si à l'échelle de l'exploitation agricole ces bilans apparaissent comme durables à la vue des stocks de P disponibles faibles et du pouvoir fixateur des sols rencontrés, ce n'est pas forcément le cas quand nous changeons d'échelle de travail, de l'exploitation à la parcelle. Ce constat met en évidence une variabilité interne aux exploitations en terme d'entretien de la fertilité des sols, qui se traduit par un schéma de distribution des MO propre aux agriculteurs, répondant à des contraintes comme l'éloignement par exemple.

Quelque soit l'échelle spatiale d'approche, exploitation ou parcelle, ce sont les entrées de MO qui sont les facteurs prépondérants dans l'élaboration des bilans entrées/sorties de P. De plus, nous n'expliquons pas ces bilans par l'approche de la complexité des exploitations, ni par celle des orientations de production. Ceci renforce l'idée de s'intéresser plus en profondeur aux pratiques des agriculteurs.

Les niveaux de disponibilité de P dans les sols gérés en AB sont en moyenne assez faibles, voir même préoccupants dans certaines situations. Seule une approche sur le long terme permettrait de bien les expliquer. Cependant, l'utilisation de méthodes conventionnelles pour mesurer cette disponibilité de P fait l'objet de critiques. Cela implique la mise en place d'un indicateur plus pertinent pour son évaluation, ainsi qu'une meilleure compréhension des processus impliqués dans la dynamique de cet élément dans les systèmes agrobiologiques.

Une approche exclusivement centrée sur l'élément P ne permet pas à elle seule de juger de la durabilité des exploitations agrobiologiques, qui est une notion pluridisciplinaire. Ce qui ouvre le chemin à d'autres approches complémentaires et nécessaires à l'évaluation de la durabilité en AB. Cependant, ce travail a permis de conduire à des questions de recherches comme le besoin de développer un indicateur de disponibilité de P, de mieux comprendre les processus de sa dynamique en AB, ou encore d'étudier les flux de matières entre exploitations, collectivités et industries.

BIBLIOGRAPHIE

- Assuero, S. G., Mollier, A., Pellerin, S. 2004. **The decrease in growth of phosphorus-deficient maize leaves is related to a lower cell production.** *Plant, Cell and Environment* 27:887-895.
- Bennett, E. M., Carpentier, S.R., Caraco, N.F. 2001. **Human impact on erodible phosphorus and eutrophication: a global perspective.** *Bioscience* 51:227-234.
- Berry, P. M., Stockdale, E.A., Sylvester-Bradley, R., Philipps, L., Smith, K.A., Lord, E.I., 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* 19:112-118.
- Bolan, N. S. 1991. **A critical-review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants.** *Plant and Soil* 134:189-207.
- Capitaine, M., David, C., Freycenon, R. 2009. **Evaluation de la durabilité de l'agriculture biologique: éléments de débats.** *Innovations Agronomiques* 4:209-215.
- Capillon, A., Cordonnier, J. M., Roumain de la Touche, Y. 1972. **Les bilans minéraux.** Pp. 31-37 *in* L'agriculture biologique : éléments de diagnostic à partir d'une enquête sur 40 exploitations. Chaire d'Agriculture INA Paris-Grignon
- Chiera, J., Thomas, J., Rufty, T. 2002. **Leaf initiation and development in soybean under phosphorus stress.** *Journal of Experimental Botany* 53:473-481.
- Cornish, P. S. 2007. **Phosphorus management on 'extensive' organic farms with infertile soils.** Third QLIF Congress, Hohenheim, Germany.
- Cornish, P. S. 2009. **Phosphorus management on extensive organic and low-input farms.** *Crop and Pasture Sciences* 60:105-115.
- CORPEN. 1998. **Programme d'action pour la maîtrise des rejets de Phosphore provenant des activités agricoles.** 85 pages.
- Djordjic, F., Bergström, L., Grant, C. 2005. **Phosphorus management in balanced agricultural systems.** *Soil Use and Management* 21:94-1001.
- Ehlert, P., Morel, C., Fotyma, M., Destain, J.P. 2003. **Potential role of buffering capacity of soil in fertilizer management strategies fitted to environmental goals.** *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 166:409-415.
- Ekholm, P., Turtola, E., Grönroos, J., Seuri, P., Ylivainio, K. 2005. **Phosphorus loss from different farming systems estimated from soil-surface phosphorus balance.** *Agriculture, Ecosystems and Environment* 110:266-278.
- Fangueiro, D., Pereira, J., Coutinho, J., Moreira, N., Trindade, H. 2008. **NPK Farm-gate nutrient balances in dairy farms from Northwest Portugal.** *European Journal of Agronomy* 28:625-634.
- Fardeau, J. C. 1996. **Dynamics of phosphate in soil. An isotopic outlook.** *Fertilizer research* 45:91-100.
- Fardeau, J. C., Morel, C., Boniface, R. 1988. **Pourquoi choisir la méthode Olsen pour estimer le phosphore "assimilable" des sols?** *Agronomie* 8:577-584.
- 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 and Environment* 105:425-432.
- Gourley, C. J. P., Powell, J.M., Dougherty, W.J., Weaver, D.M. 2007. **Nutrient budgeting as an approach to improving nutrient management on Australian dairy farms.** *Australian Journal of Experimental Agriculture* 47:1064-1074.
- Hansen, B., Alroe, H.F., Kristensen, E.S. 2001. **Approaches to assess the environmental impact of organic farming with particular regard to Denmark.** *Agriculture, Ecosystems and Environment* 83:11-26.

- Lamine, C., Bellon, S. 2009. **Conversion to organic farming: a multidimensional research object at the crossroads of agricultural and social sciences. A review.** *Agronomy for Sustainable Development* 29:97-112.
- Lévêque, C. 2001. **Flux de matière et d'énergie dans les écosystèmes.** Pp. 502 in Dunod, ed. *Ecologie, de l'écosystème à la biosphère.*
- Lichtfousse, E., Navarrete, M., Debaeke, P., Souchère, V., Alberola, C., Ménassieu, J. 2008. **Agronomy for sustainable agriculture. A review.** *Agronomy for Sustainable Development* 29:1-6.
- Martin, R. C., Lynch, D.H., Frick, B., van Srtaaten, P. 2007. **Phosphorus status on Canadian organic farms.** *Journal of the Science of Food and Agriculture* 87:2737-2740.
- Mollier, A., Pellerin, S. 1999. **Maize root system growth and development as influenced by phosphorus deficiency.** *Journal of Experimental Botany* 50:487-497.
- Morel, C. 2002. **Caractérisation de la phytodisponibilité de Phosphore du sol par la modélisation du transfert des ions phosphates entre le sol et la solution.** INRA.
- Nelson, N. O., Janke, R.R. 2007. **Phosphorus sources and management in organic production systems.** *Horttechnology* 17:442-454.
- Öborn, I., Edwards, A.C., Witter, E., Oenema, O., Ivarsson, K., Withers, P.J.A., Nilsson, S.I., 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.
- Öborn, I., Modin-Edman, A.K., Bengtsson, H., Gustafson, G.N., Salomon, E., Nilson, S.I., Holmqvist, J., Jonsson, H., Sverdrup, H. 2005. **A systems approach to assess farm-scale nutrient and trace element dynamics: a case study at the Öjebyn dairy farm.** *Ambio* 34:301-310.
- 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* 62:25-35.
- Pellerin, S. 2008. **Cycles biogéochimiques du phosphore et du potassium dans les écosystèmes cultivés** (cours dispensé le 26/11/2008) 45 pages
- Pellerin, S., Le Clech, B., Morel, C., Linères, M. 2006a. **Gare à la baisse de la disponibilité du phosphore.** *Alter Agri* 79:21-23.
- Pellerin, S., Recous, S., Roger-Estrade, R. 2006b. **La composante chimique.** Pp. 177-198. *L'agronomie aujourd'hui* (éditions Quae).
- Pérès, G., Cluzeau, D. 2004. **L'approche "Hérody-BRDA" et l'approche classique.** *Alter Agri* 63:22-24.
- REGIFER. 1999. **Chapitre 2: Le diagnostic de la fertilité phosphatée du sol et les règles de fertilisation des grandes cultures.** Manuel de l'Agronome.
- Sandhu, H. S., Wratten, S.D., Cullen, R., Case, B. 2008. **The future of farming: The value of ecosystem services in conventional and organic arable land. An experimental approach.** *Ecological Economics* 64:835-848.
- Schröder, J. J., Scholefield, D., Cabral, F., Hofman, G. 2004. **The effects of nutrient losses from agriculture on ground and surface water quality: the position of science in developing indicators for regulation.** *Environmental Science and Policy* 7:15-23.
- Sharpley, A. N. 1995. **Soil phosphorus dynamics: agronomic and environmental impacts.** *Ecological Engineering* 5:261-279.
- Sharpley, A. N., Robinson, J.S., Smith, S.J. 1995. **Bioavailable phosphorus dynamics in agricultural soils and effects on water quality.** *Geoderma* 67:1-15.
- Tunney, H. 1990. **A note on a balance sheet approach to estimate the Phosphorus fertilizer needs of agriculture.** *Irish Journal of Agricultural Research* 29:149-154.

- Tunney, H., Csatho, P., Ehlert, P. 2003. **Approaches to calculating P balance at the field-scale in Europe.** Journal of Plant Nutrition and Soil Science 166:438-446.
- van Beek, C. L., Onduro, D.D., Gachimbi, L.N., de Jager, A. 2009. **Farm nitrogen of four farmer field schools in Kenya.** Nutrient Cycling in Agrosystems 83:63-72.
- van Veldhoven, P. P., Mannaerts, G.P. 1987. **Inorganic and organic phosphate measurements in the nanomolar range.** Analytical Biochemistry 161:45-48.
- 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 and Management 18:264-273.
- Withers, P. J. A., Edwards, A.C., Foy, R.H. 2001. **Phosphorus cycling in UK agriculture and implications for phosphorus loss from soil.** Soil Use and Management 17:139-149.

SITES INTERNET

Agence Bio (page consultée le 02/04/2009) **Statistiques 2008**
<http://www.agencebio.org/upload/pagesEdito/fichiers/>

Agreste (page consultée le 3/04/2009) **L'agriculture en région Aquitaine**
<http://agreste.agriculture.gouv.fr/en-region/aquitaine/>

Annuaire Professionnel de l'Agence Bio (pages consultées durant les mois d'Avril à Mai 2009) **Annuaire des producteurs** <http://annuaire.agencebio.org/>

FAO (page consultée le 3/04/2009) **Organic agriculture** <http://www.fao.org/organicag/oa-home/en/>

Météo France (consultée le 20/08/2009) **climatèque : Fiche climatologique Bergerac**
climatheque@meteo.fr

ANNEXES

ANNEXE I : LES MATIERES FERTILISANTES ET AMENDEMENTS AUTORISES EN AGRICULTURE BIOLOGIQUE

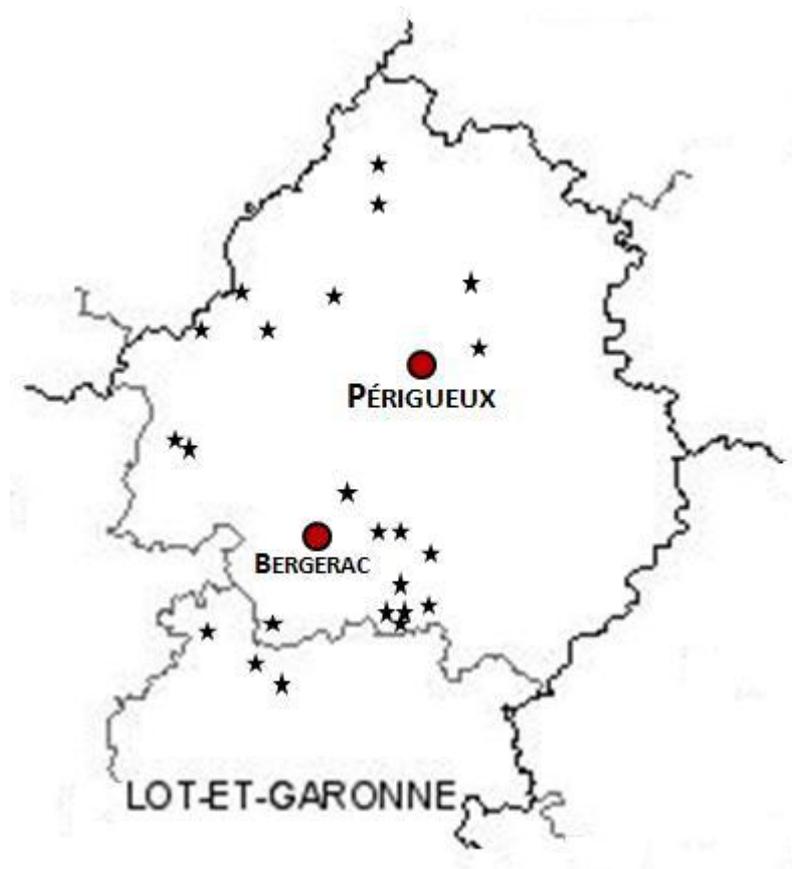
- Produits d'origine organique :
 - Produits bruts d'origine végétale ne contenant pas de produits chimiques de synthèse et pas de métaux lourds en excès comme les déchets verts, les cendres, sciures et écorces de bois, broussailles, tourteaux, etc.
 - Produits d'origine urbaine : boues de stations d'épuration, biodéchets ménagés compostés 4 jours minimum, etc.
 - Produits d'origine animale : cornes, onglons, os, viande, sang, peaux, laine, plume, arrêtes, ...
 - Effluents d'élevages et déjections : Lisiers, fumiers et fientes d'élevages extensifs (<2 UGB/ha), guano, ...

Ces produits bruts peuvent être transformés (compostage) et faire l'objet de mélanges pour la création de formules d'amendements et de fertilisants commerciaux.

- Produits d'origine minérale :

Pour le Phosphore ces produits correspondent aux phosphates naturels, phosphates aluminocalciques, et scories de déphosphorylation.

ANNEXE II : CARTOGRAPHIE DES AGRICULTEURS ENQUETES DANS LE
DEPARTEMENT DE LA DORDOGNE ET DU LOT-ET-GARONNE



ANNEXE III : QUESTIONNAIRE D'ENQUETE



UMR Inra - Enitab TCEM



Agrobio Périgord



Etude et évaluation de l'entretien de la fertilité des sols de grandes cultures en Agriculture Biologique

Enquêteurs : TOUBLANT Maxime (Agrocampus)
NESME Thomas (INRA / ENITA Bordeaux)

Date :
Numéro de l'enquête :

IDENTIFICATION

Nom Entreprise :

NOM Prénom :

Adresse :

Téléphone :

Statut de l'EA :

Coopératives de vente ou de productions :

Groupements (Gab, Civism, Ceta ...) :

Circuit court (VD) ou long

Age :

Formation :

e-mail :

Type :

Autres contrats :

Organisme certificateur :

HISTOIRE

Date d'installation : Début de conversion :

Gestion du P avant conversion : Assurance raisonnée

Chargement (UGB/SAU) :

Effluents : Nature

Quantité (T ou m3)

APPAREIL DE PRODUCTION

Le Foncier

Surface Totale : ha

SAU : ha, dont :

ha SCOP
ha Légumes
ha Irrigué
ha PP
ha PT

Alimentation : Autosuffisance (%)

Type d'achats à l'extérieur (conjoncturels ? ; nature)

Gestion des effluents :

compostage épandage échange stockage

Faire valoir

% Direct
% Fermage

Temps de pâturage par type d'animaux : (exportations / restitutions)

Consommation :

Foin Ensilage
Enrubannage Céréales

Le Travail

Nombre d'UTA :

Familiales
Salariées perm
Saisonnnières

Conseils et Informations techniques (à entourez) :

Technicien Formations Revues Autres :

Productions végétales

LES PRODUCTIONS

Si production(s) animale(s)

Type :

Nb d'animaux (par catégories) :

Part relative CA :

Variation annuelle des effectifs :

Taux de renouvellement :

Caractéristiques : (nombre d'hectares de gestion, distance, surface)

Caractérisation des 2 principaux sols :

	Text/Struc mauvais/bon	Profondeur	Topographie	% de la SAU	Contraintes
Sol 1					
Sol 2					

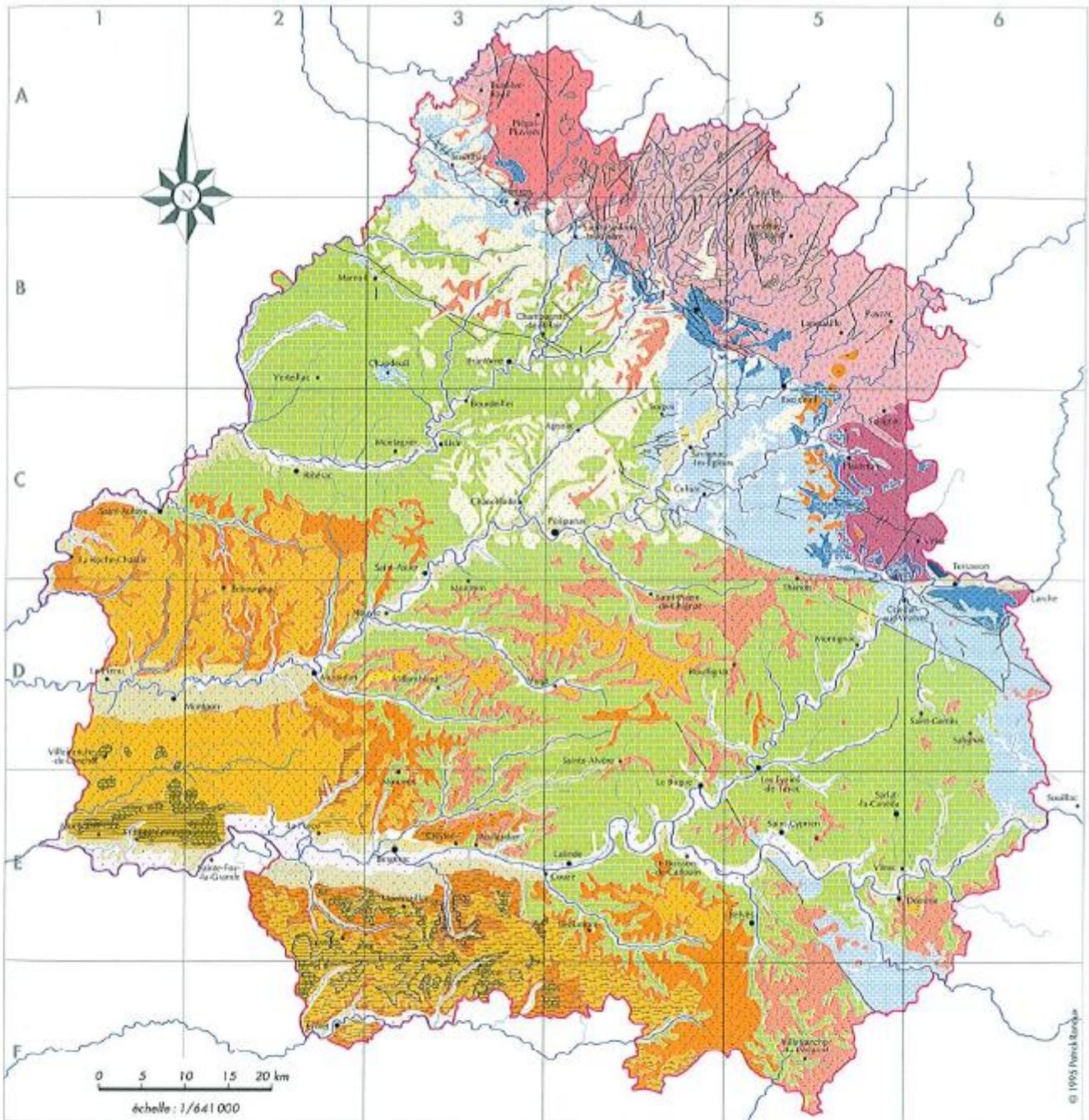
BILAN DE P A LA PARCELLE (à la rotation pour la parcelle 1)

ENTREES (qtté, nature, origine)		SORTIES (qtté, nature)		ENTREES (qtté, nature, origine)		SORTIES (qtté, nature)	
Engrais		Cultures		Engrais		Cultures	
Amendement		Exportations par les animaux		Amendement		Exportations par les animaux	
Restitutions au pâturage				Restitutions au pâturage			
Semences				Semences			
Engrais		Cultures		Engrais		Cultures	
Amendement		Exportations par les animaux		Amendement		Exportations par les animaux	
Restitutions au pâturage				Restitutions au pâturage			
Semences				Semences			
Engrais		Cultures		Engrais		Cultures	
Amendement		Exportations par les animaux		Amendement		Exportations par les animaux	
Restitutions au pâturage				Restitutions au pâturage			
Semences				Semences			

BILAN DE P A LA PARCELLE (à la rotation pour la parcelle 2)

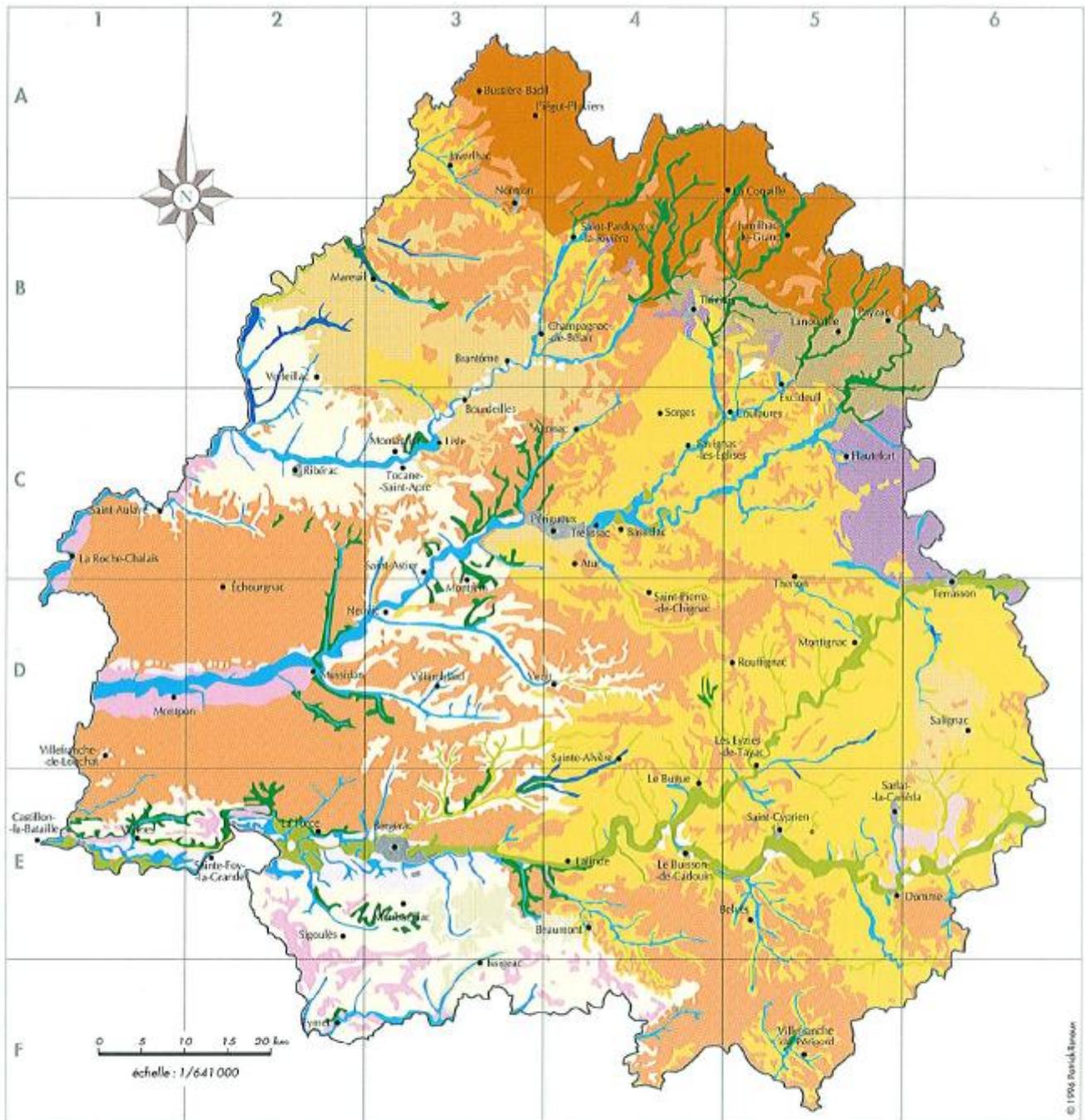
ENTREES (qtté, nature, origine)		SORTIES (qtté, nature)		ENTREES (qtté, nature, origine)		SORTIES (qtté, nature)	
Engrais		Cultures		Engrais		Cultures	
Amendement		Exportations par les animaux		Amendement		Exportations par les animaux	
Restitutions au pâturage				Restitutions au pâturage			
Semences				Semences			
Engrais		Cultures		Engrais		Cultures	
Amendement		Exportations par les animaux		Amendement		Exportations par les animaux	
Restitutions au pâturage				Restitutions au pâturage			
Semences				Semences			
Engrais		Cultures		Engrais		Cultures	
Amendement		Exportations par les animaux		Amendement		Exportations par les animaux	
Restitutions au pâturage				Restitutions au pâturage			
Semences				Semences			

ANNEXE IV : CARTE GEOLOGIQUE DU DEPARTEMENT DE LA DORDOGNE
(Source : Atlas de la Dordogne-Périgord, Patrick RANOUX)



Ère Quaternaire	Ère Tertiaire	Ère Secondaire	Ère Primaire	Roches sédimentaires	Roches cristallines
Holocène (10 000 ans à aujourd'hui)	Miocène (25 à 6 MA)	Crétacé sup. (100 à 65 MA)	Permien (280 à 225 MA)	alluvions	roches granitiques
Pléistocène supérieur (150 000 à - 10 000 ans)	Oligocène (37 à 25 MA)	Jurassique (175 à -140 MA)	Carbonifère houiller (343 à 280 MA)	argile	roches métamorphiques
Pléistocène moyen et inférieur (170 à -150 000 ans)	Éocène (55 à 37 MA)	Lias (185 à -175 MA)	Carbonifère granitique (345 à 280 MA)	argile, grès	filon de quartz
Pléistocène indifférencié	Ère tertiaire indifférencié	Trias (252 à -185 MA)	Cambrien ou Silurien (570 à 395 MA)	sable	Tectonique
				arène	Faïlle
				sables, argiles, graviers	
				grès	
				molasse	
				calcaire/molasse	
				calcaire tertiaire	
				calcaires du Crétacé	
				autres calcaires du Secondaire	

ANNEXE V : CARTE PEDOLOGIQUE DU DEPARTEMENT DE LA DORDOGNE
(Source : Atlas de la Dordogne-Périgord, Patrick RANOUX)



<p>Sols sur massif ancien</p> <ul style="list-style-type: none"> sur roches cristallines grenues sur roches cristallines schisteuses sur sédiments anciens 	<p>Sols lessivés des plateaux</p> <ul style="list-style-type: none"> sur graviers, sables et argiles Boulbènes Sarladais <p>Sols très pentus</p> <ul style="list-style-type: none"> Glacis des vallées 	<p>Sols sur calcaires durs</p> <ul style="list-style-type: none"> Causses (rendzines) Terres de groie (rendzines) <p>Sols sur calcaires tendres</p> <ul style="list-style-type: none"> Sols pentus : champagnes, calcaires tertiaires, terreforts Sols plats d'Issigeac 	<p>Sols de vallées</p> <ul style="list-style-type: none"> Vallées sèches Alluvions drainées et fertiles (alluvions anciennes et modernes et terrasses récentes) Graves Bas-fonds inondables Sols tourbeux
--	--	---	---

Source : Carte des aptitudes des terres de la Dordogne, Durand J.-H., INRA, Service spécial de l'aménagement régional d'Aquitaine, 1976.

ATLAS DE LA DORDOGNE - CARTE N° 07

ANNEXE VI : COMPOSITION DES DIFFERENTES SOURCES DE PHOSPHORE UTILISEES

Fourrages	% MS	P (kg P/T MS)
Ensilage herbe	20	2,4
Ensilage maïs	30	1,8
Enrubannage herbe	50	2,4
Foin luzerne	85	2,25
Foin Prairie Permanente	85	2,04
Foin Prairie Temporaire	85	2,51
Luzerne Déshydratée	91	2,53
Prairie permanente en vert	18,35	2,33
Prairie Temporaire en vert	18,13	2,94
Enrubannage méteil	50	2,4
Sorgho en vert	21	2,6

Pailles	% MS	P (kg P/T MS)
Paille avoine	86	1
Paille blé	88	0,74
Paille féverole	87	1
Paille orge	88	0,436
Paille pois	88	0,92
Paille seigle	88	1,3
Paille triticale	88	0,87
Paille méteil	88	0,89

Grains	% MS	P (kg P/T MS)
Avoine	85	3,27
Blé dur	85	3,71
Blé tendre	85	2,83
Colza	91	5,45
Féverole	86	5,23
Lentille	86	3,92
Lin	91	5,89
Lupin	86	3,27
Maïs grain	85	2,62
Maïs humide	64,8	3
Orge	85	2,83
Pois	86	3,49
Pois chiche	86	3,05
Sarrazin	87,3	3,4
Seigle	85	2,83
Soja	86	4,36
Sorgho	85	3,05
Tournesol	91	5,23
Trèfle	85	6,3
Triticale	85	2,83
Vesce avoine	85	3,63
Son	87,1	11,4
Méteil	85	3,05

Aliments	% MS	P (kg P/T MS)
Fibre B	100	6,5
Proteomix 18	100	9

Fruits et légumes	% MS	P (kg P/T MS)
Carotte	12	0,436
Kiwi	100	0,33
Noix	100	2,12
Poireau	11	0,35
Pomme de terre	20	0,95

Engrais de ferme et amendements	P (kg P/T MB)
Compost champignonnière	1,31
Compost de déchets verts	1,74
Compost fumier bovin	2,18
Compost fumier dindes	13,52
Compost fumier ovin	3,05
Compost fumier poulets	10,46
Ecorces et sciures	0,1
Farine os	69,76
Farine plumes	5,01
Farine viande	40,55
Fientes poule humides	6,1
Fientes poules pré séchées	8,72
Fientes poules séchées	17,44
Fumier bovin	1
Fumier caprin	2,27
Fumier champignonnière	1,85
Fumier dindes	11,55
Fumier équin	1,4
Fumier ovin	1,74
Fumier pintades	10,68
Fumier poulets de chaire	10,68
Fumier poulets labels	7,19
Lisier bovin	0,65
Marc de raisins	2,8458

Fertilisants du commerce	P (kg P/T MB)
Engrais bio (9%P)	39,24
Farine de plume	30,52
Farine de viande	52,32
Orgazote	5,7
Thalassol	9,5
Viofertil start	9,59

Produits animaux	P (kg P/T de poids vif)
Bovin	7,5
Equin	7,5
Laine	0,1
Œuf	2
Ovin caprin	6
Porcin	5
Poudre de lait	10,4
Poulet	4,8
Poussin	3,4

Lait	P (kg P/T)	Densité du lait (T/m³)
Lait de brebis	1,3	1,037
Lait de chèvres	0,9	1,031
Lait de vaches	0,9	1,031

ANNEXE VII : SOURCES DES COMPOSITIONS EN P DES DIFFERENTES MATIERES

Catégories	Sources
Fertilisants et amendements	Etiquettes, fabricants, Guides des matières organiques (Institut Technique de l'Agriculture Biologique, 2001), Norme AFNOR NF U 44-051
Aliments concentrés	Etiquettes des produits ; fabricants
Cultures (grains, paille, fourrages, etc.)	COMIFER (2007) ; Tables d'alimentation de l'INRA (2007) ; Bureau National Interprofessionnel du Kiwi ; Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes
Restitutions et Exportations au pâturage	CORPEN (1999 et 2001)
Animaux et sous-produits (viande, lait, etc.)	Forfaitaire gehalten voor de mineralenboekhouding (Laboratorium voor Bloembollenonderzoek, 1996) ; Food and Agriculture Organization (FAO) ; Institut de l'élevage, Institut Technique du Porcs, Institut Technique de l'AViculture, CEntre Machinisme Agricole Génie Rural Eaux et Forêts 1998